

ارتباط بین تغییرات دم مغناطیس سپهر (مگنتوتیل) و فعالیت‌های شفق در زمان زیرتوفان‌ها

براعتلی فیض‌آبادی^{۱*}، محمود میرزایی^۲ و ناصر حسین‌زاده گویا^۳

^۱ استادیار، گروه فیزیک دانشگاه تربیت معلم، سبزوار، ایران

^۲ استادیار، دانشکده علوم، دانشگاه اراک، ایران

^۳ دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۶/۱/۱۳، پذیرش نهایی: ۸۷/۱/۵)

چکیده

برهم‌کنش باد خورشیدی با مغناطیس سپهر زمین، سبب انتقال شار مغناطیسی به داخل دم مغناطیسی می‌شود و در نتیجه برای حفظ پیوستگی ساختار دم، یک همرفتی شار بازگشتی به داخل منطقه شبه دوقطبی قسمت شب و از آنجا به قسمت روز به وجود می‌آید. چون با این شار مغناطیسی، پلاسمای پرنرزی همراه است بنابراین جریان‌هایی الکتریکی وجود خواهد داشت که موجب تغییرات شدت مغناطیسی در نزدیکی سطح زمین (زیرتوفان مغناطیسی) می‌شود و به ویژه در برهم‌کنش با یون سپهر زمین موجب فعالیت‌های شفق می‌شود. ما در این مقاله نه فقط ارتباط بین تغییرات دم مغناطیسی و فعالیت‌های شفق را در طی ۳ زیرتوفان با استفاده از داده‌های GEOTAIL، Polar UltraViolet Imager (UVI) و Cluster spacecraft - 4 مقایسه کرده‌ایم. در زیرتوفان رخ داده در دسامبر ۱۹۹۶، نقصان و شدت‌های شفق همبستگی زیادی با شارش‌های سریع پلاسما، با تغییرات میدان مغناطیسی شمالی-جنوبی و با فشار کل در دم مغناطیسی داشته‌اند. Geotail در موقعیت حدود $21 R_E$ - واقع و چندین شارش سریع به سمت دم در نزدیکی فاز گسترش زیرتوفان، با میدان مغناطیسی جنوب‌سو و همراه با افزایش فشار کل مربوط به plasmoids مشاهده شده است. این شارش‌ها، هم‌زمان یا حدود یک دقیقه بعد از نقصان‌ها یا شبه‌نقصان‌های شفق مشاهده شده‌اند. در پایان فاز گسترش یا در فاز بازگشت بعضی شارش‌های سریع به سمت زمین با میدان مغناطیسی شمال‌سو مشاهده شده‌اند. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که کاهش فشار کل در دم مغناطیسی به‌طور قابل ملاحظه‌ای در طی نقصان‌های شفق یا در طی گسترش‌های به سمت قطب برآمدگی شفق، کاهش می‌یابد. مدت گسترش و اندازه برآمدگی شفق به ترتیب با مدت و آهنگ کاهش فشار کل در دم مغناطیسی وابسته هستند. این نتایج تأکیدی بر این مطلب است که زیرتوفان‌ها پاسخ مغناطیس سپهر به مسئله فشار هستند. در زیرتوفان سپتامبر ۲۰۰۲ نیز بررسی داده‌های مجموعه فضایی‌های Cluster همبستگی تغییر جهت شارش پلاسمای سریع با تغییرات فشار کل از طریق تغییرات میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: فیزیک مغناطیس سپهر، زیرتوفان‌های مغناطیسی، شارش پلاسما، فعالیت‌های شفق، اتصال مجدد مغناطیسی، فشار کل دم مغناطیسی.

Relation between magnetotail variations and auroral activities during substorms

Feizabady, B.¹, Mirzaei, M.² and Hosseinzadeh Guya, N.³

¹ Assistant Professor, Physics Department, Sabzevar Tarbiat Moallem University, Iran

² Assistant Professor, Physics Department, Arak University, Iran

³ Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 23 Jan 2008, Accepted: 24 Jan 2009)

Abstract

The interaction between the solar wind and the earth's magnetosphere results in the transport of magnetic flux into the magnetotail and to avoid a continued buildup in the tail, there is a return convection of magnetic flux from the magnetotail into the night-side dipole-like region and from there to the day-side. Since there is energetic plasma with this magnetic flux, hence electric currents exist that disturb the magnetic intensity in the earth's surface (substorms) and particularly by interaction with the earth's ionosphere producing auroral activities .

We have compared magnetotail variations with auroral activities during 3 substorms using GEOTAIL , Polar UVI and 4-Cluster spacecraft data . In the substorm event on 15 December 1996 , auroral breakups and intensifications were highly correlated with fast plasma flows, with the variations in the north-south magnetic field and with the total pressure in the magnetotail. GEOTAIL was located around $X \sim -21$, and several fast tailward flows were observed in the early expansion phase with the southward magnetic field and the total pressure enhancement, associated with plasmoids. These flows were observed simultaneously with or within 1min of auroral breakups or pseudobreakups. In the late expansion or recovery phase, some fast earthward flows were observed with small auroral intensifications. More investigations imply that the total pressure in the magnetotail significantly decreases during auroral breakups or poleward expansion of the auroral bulge. The duration of the expansion and the maximum size of the auroral bulge are closely correlated with the duration and amount of total pressure decrease in the magnetotail, respectively. These results also imply that the substorms are the response of magnetosphere to solar wind and its frozen-in magnetic field. Also in the substorm event on September 2002 investigation of Cluster data shows that direction reverse of fast plasma flow is highly correlated with total pressure variations in the magnetotail by magnetic disturbs.

Review GEOTAIL and Polar UVI data for December 1996 and March 1997 substorms shows high correlation between changes in rapid plasma flux and magnetic field north-south and changes in the magnetotail's total pressure. Fluxes begin towards the tail and then they come back. This implies that events of this activity that retreat near the Earth's neutral line are periodic.

The results show that communication between the auroral activity domain and substorms is dependent on energy dissipation in the magnetotail.

The data by 4- Cluster and earth's magnetograms for the September 2002 substorm also shows that the magnetic energy is stored during substorms and released when fast fluxes electron tubes are reversed . These results can be used to describe the substorms in following stages:

- The presence of a strong south component of interplanetary magnetic field (IMF) and increase in the magnetic reconnection and transmission magnetic flux into the magnetotail.
- Transfer pressure of magnetic flux from the tail to night- side and restriction of the magnetosphere.
- Creation of the new structure for magnetic flux in tail.
- Increase in the pressure of magnetic flux in side lobes and thinning the plasmashet and formation of the tail like magnetic field lines.
- Thinning the plasmashet sufficiently for broken (MHD) magnetohydrodynamic conditions and beginning magnetic reconnection again in places near the earth's neutral lines.
- Injection of energy and plasma in southward of the tail and re-coming toward the night-side of the earth and creating substorm's auroral activities.

Key words: Magnetosphere, Magnetic substorms, Plasma flow, Auroral activities, Magnetic reconnection, Magnetotail total pressure.

۱ مقدمه

ارتباط با ساختار شبه-چهارقطبی میدان مغناطیسی، روی قسمت‌های سمت دُم و سمت زمین، در بخش‌های شمالی و جنوبی لایه پلاسما نشان می‌دهند. همچنین از مشاهدات معلوم می‌شود که هر جریان خروجی از باریکه به دلیل وجود الکترون‌های درون آن، شامل الکترون‌های دارای انرژی کم و متوسط (تقریباً ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ الکترون ولت) است.

در طی زیرتوفان‌ها، پدیده‌های گوناگونی در مغناطیس‌سپهر، یون‌سپهر و روی زمین رخ می‌دهد: قطبش‌های الکتریکی، شکل‌گیری جریان‌های الکتریکی، فوران ذرات پرانرژی در اطراف مدار هم‌زمان زمین، شارش‌های توده‌ای متلاطم، درخشندگی‌های شفقی، الکتروجت‌های به سمت غرب و پولزاسیون $Pi2$. زیرتوفان‌های شفقی درخشندگی گسترش‌یابنده‌ای به سمت قطب دارند و منطقه قطع جریان دُم در حضور آنها به سمت دُم گسترش می‌یابد. بعضی دیگر از فعالیت‌های شفقی مانند افزایش به سمت قطب مرز (Poleward, PBI) Boundary Intensification) وجود دارند که مرتبط با فرایندهایی غیر از زیرتوفان هستند. PBI در فاصله زمانی یک ساعت از همه سطوح فعالیت‌های ژئومغناطیسی چندین بار اتفاق می‌افتد و مدت نوعی هر فعالیت آن کمتر از ۱۰ دقیقه است و شدت درخشندگی ایجاد شده با آن به اندازه شفقی زیرتوفان نیست. متناظر با PBIs شارش‌های متلاطم به سمت غرب همراه با میدان مغناطیسی شمال‌سو در ناحیه لایه پلاسما نیز دیده می‌شود ولی برخلاف زیرتوفان‌ها منطقه منبع شارش‌های متلاطم در انتهای دُم واقع است و فعالیت آن به یک آشفتگی بزرگ مقیاس تبدیل نمی‌شود. تعدادی از تحقیقات اخیر ارتباط بین فعالیت‌های شفقی و شارش‌های سریع پلاسمای ناپایدار در

در حال حاضر نقش کلیدی اتصال مجدد مغناطیسی در وقوع زیرتوفان‌های مغناطیسی به درستی پذیرفته شده است. براساس مدل خط خنثی نزدیک زمین (بیکر و همکاران، ۱۹۹۶) اتصال مجدد، فرایند اولیه است که در شروع زیرتوفان آغاز می‌شود. بعضی دیگر از مدل‌ها، مثل مدل قطع جریان (لویی، ۱۹۹۶) و مدل جفت‌شدگی مغناطیس‌سپهر-یون‌سپهر (کان، ۱۹۹۳)، سازوکارهای دیگری را برای شروع پیشنهاد می‌کنند و اتصال مجدد را به صورت یک نتیجه منطقی از آغاز زیرتوفان می‌دانند. در هر حال وقوع اتصال مجدد در دُم مغناطیسی نزدیک زمین در آغاز یا در طی زیرتوفان با بررسی مشاهدات گوناگونی از جمله داده‌های ماهواره‌های Geotail (ناگایی و همکاران، ۲۰۰۱) و Geotail & Interball (پتروویچ و همکاران، ۱۹۹۸) خاطر نشان شده است. همچنین فضاییمای چهارتایی Cluster با تجهیزات مشابه که آن را قادر می‌سازد تا تغییرات زمانی و فضایی مغناطیس‌سپهر را با اندازه‌گیری هم‌زمان میدان مغناطیسی در چهار نقطه، مشخص کند، از راه برآورد کردن گرادیان میدان مغناطیسی (چانتر، ۱۹۹۸) و محاسبه انحنا بردار میدان (شن و همکاران، ۲۰۰۳) ساختار خط خنثی مغناطیسی را در طی یک زیرتوفان قوی مشخص می‌سازد.

مدل‌های نظری گذشته شکل‌گیری سامانه جریان منفردی در اطراف خط خنثی را به دلیل وجود یون‌های غیرمغناطیسی و الکترون‌های منجمد در پلاسما پیشنهاد می‌دادند (تراساوا، ۱۹۸۳)، ولی مشاهدات ماهواره‌ای اخیر یک باریکه الکترونی به صف‌شده میدانی (field-aligned electron beam) نوعی را درون خط خنثی نشان می‌دهند. مشاهدات همچنین خروج سریع‌تر الکترون‌ها و یون‌ها از باریکه را، در مقابل ورود کندتر آنها به داخل آن، در

GSM (Geocentric Solar Magnetospheric Coordinates)، تقریباً در فاصله $18 R_E$ از مرکز زمین در مرکز لایه پلاسما واقع و جدایی چهارتایی آن ۴۰۰۰ کیلومتر بوده است. Geotail برای زیرتوفان ۱۵ دسامبر ۱۹۹۶ در موقعیت $R_E(21,7) \sim (X,Y)$ و برای زیرتوفان ۲۴ مارس ۱۹۹۷ در موقعیت $R_E(22,89) \sim (X,Y)$ در همان دستگاه مختصات واقع بوده است. داده‌های میدان مغناطیسی با بسامد قطع ۶۷ هرتز از تجهیزات FGM (بالوگ و همکاران، ۲۰۰۱)، داده‌های متوسط‌گیری شده اسپینی از تجهیزات CIS (ریمه و همکاران، ۲۰۰۱) و داده‌های الکترونی با تفکیک زیاد از تجهیزات EDI (پاشمان و همکاران، ۲۰۰۱) موجود در Cluster همراه با داده‌های مغناطیسی زمینی از شبکه IMAGE برای زیرتوفان ۲۰۰۲ و به منظور بررسی ساختار سه‌بعدی میدان مغناطیسی در طی فاصله زمانی معکوس شدن شارش سریع یونی و نیز ارتباط متناظر معکوس شدن میدان مغناطیسی و معکوس شدن شارش پلاسما که خود نشانه‌ای از اتصال مجدد مغناطیسی است، به کار رفته است. بررسی باریکه‌های الکترونی لایه مرزی لایه پلاسما (Plasma Sheet Boundary Layer, PSBL) نیز صورت گرفته است که نشان می‌دهد حضور آن به دلیل افزایش شیف‌ت مولفه B_y به طرف خط خنثی مغناطیسی است.

داده‌های اندازه حرکت‌های یونی و میدان مغناطیسی از تجهیزات اندازه‌گیری‌های ذرات با انرژی کم (LEP) و اندازه‌گیری‌های میدان مغناطیسی با تفکیک زمانی ۱۲ ثانیه موجود در Geotail مربوط به زیرتوفان‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۷ استفاده شده‌اند. همچنین به منظور بررسی فعالیت‌های شفق از داده‌های تصویری Polar UVI استفاده شده است. تصاویر شفق از باندهای با طول موج کوتاه‌تر ($1600 - 1400 \text{ \AA}$, BHS) و طول موج بلندتر

دُم مغناطیسی را بررسی کرده‌اند و نتیجه گرفته‌اند که انتقال شار مغناطیسی به سمت دُم، متناظر با درخشندگی‌های شفق، به زیرتوفان‌ها مربوط می‌شود. در این مقاله، چگونگی همبستگی تغییرات دُم مغناطیسی با فعالیت‌های شفق را برای ۳ زیرتوفان و از دیدگاه‌های متفاوت براساس مشاهدات Geotail و Cluster و تصاویر UVI Polar بررسی می‌کنیم و درمی‌یابیم که شارش‌های سریع پلاسما در ابتدا، جهت‌گیری به سمت دُم دارند و سپس به سمت زمین برمی‌گردند. به علاوه روی تغییرات فشار کل در دُم مغناطیسی تمرکز می‌کنیم و می‌بینیم که همبستگی خوبی بین شارش‌های پلاسما در دُم مغناطیسی و فعالیت‌های شفق در هر مورد وجود دارد. همچنین روشن خواهیم ساخت که کاهش فشار کل در دُم مغناطیسی همبستگی بهتری با فعالیت‌های شفق نسبت به شارش پلاسما نشان می‌دهد و پیشنهاد می‌کنیم که دامنه فعالیت‌های شفق وابسته به آهنگ پراکندگی انرژی در دُم مغناطیسی است. در بخش ۲ توضیحاتی راجع به داده‌های مورد استفاده و اسباب‌های اندازه‌گیری مربوط خواهد آمد و سپس در قسمت‌های گوناگون بخش ۳ هر کدام از زیرتوفان‌ها به تفکیک بررسی می‌شود و نتایج حاصل عرضه خواهد شد. در بخش ۴ نیز به نتیجه‌گیری نهایی می‌پردازیم.

۲ تشریح داده‌های مورد استفاده

برای بررسی تغییرات دُم مغناطیسی و فعالیت‌های شفق در طی ۳ زیرتوفان ثبت شده در سپتامبر ۲۰۰۲ و مارس ۱۹۹۷ و دسامبر ۱۹۹۶، به ترتیب از داده‌های فضاپیما Cluster و Geotail و UVI Polar استفاده شده است. چهارتایی Cluster در طی فاصله زمانی ۳۰ دقیقه بین ۱۸۰۰ تا ۱۸۳۰ از زمان بین‌المللی (UT) مربوط به زیرتوفان ۱۳ سپتامبر ۲۰۰۲، در موقعیت $R_E(25, 25, 175) \sim$ در دستگاه مختصات

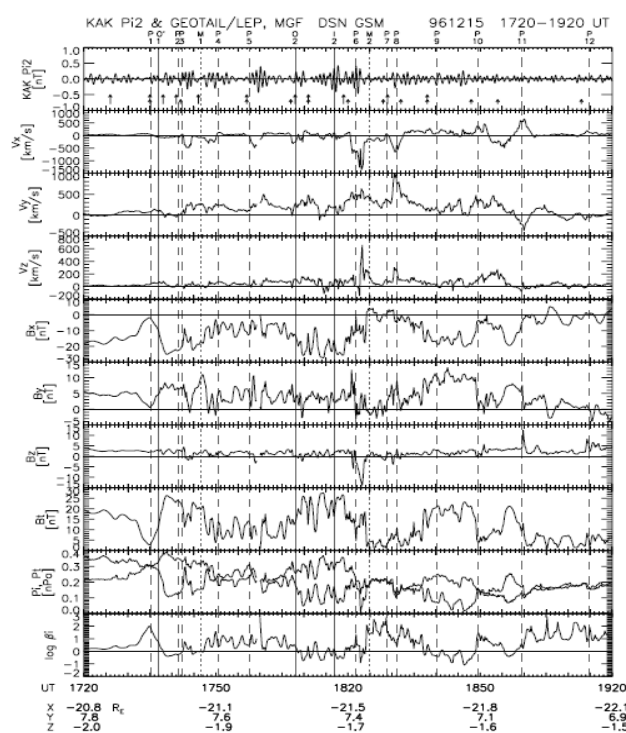
۱۹۲۰ نشان می‌دهد. این داده‌ها شامل پولزاسیون Pi2، سه مولفه شارش پلاسما و میدان مغناطیسی، میدان مغناطیسی کل و فشارهای کل (خط بالا) و یون (خط پایین) هستند. چون جهت‌گیری مولفه x میدان مغناطیسی B_x در طی این فاصله زمانی به سمت دُم بوده، Geotail تقریباً در تمام مدت در قسمت جنوبی دُم مغناطیسی قرار داشته است. مولفه Z میدان مغناطیسی B_z متناظر با نازک شدن لایه پلاسما از 1615 UT تا 1735 UT کاهش می‌یابد و فشار کل، متناظر با ذخیره انرژی در طی فاز رشد زیرتوفان از 1742 UT تا 1630 افزایش می‌یابد. بعد از 1742 UT تعدادی شارش‌های سریع به سمت دُم مشاهده می‌شوند که با plasmoids، که در آنها افزایش و کاهش‌های پی‌درپی میدان مغناطیسی جنوب‌سو و فشار کل وجود دارد، مرتبط هستند.

(LBHL, 1600-1800 Å) از طیف گسیلی N2 Lyman- ثبت شده با Imager به دست آمده‌اند. دوره‌های انتگرال‌گیری روی داده‌ها به ترتیب ۱۸ و ۳۶ ثانیه بوده است.

۳ بررسی موردی داده‌های مربوط به هر کدام از زیرتوفان‌ها و تعیین چگونگی ارتباط هر کدام با تغییرات دُم مغناطیسی و فعالیت‌های شفق

۱-۳ زیرتوفان ۱۵ دسامبر ۱۹۹۶

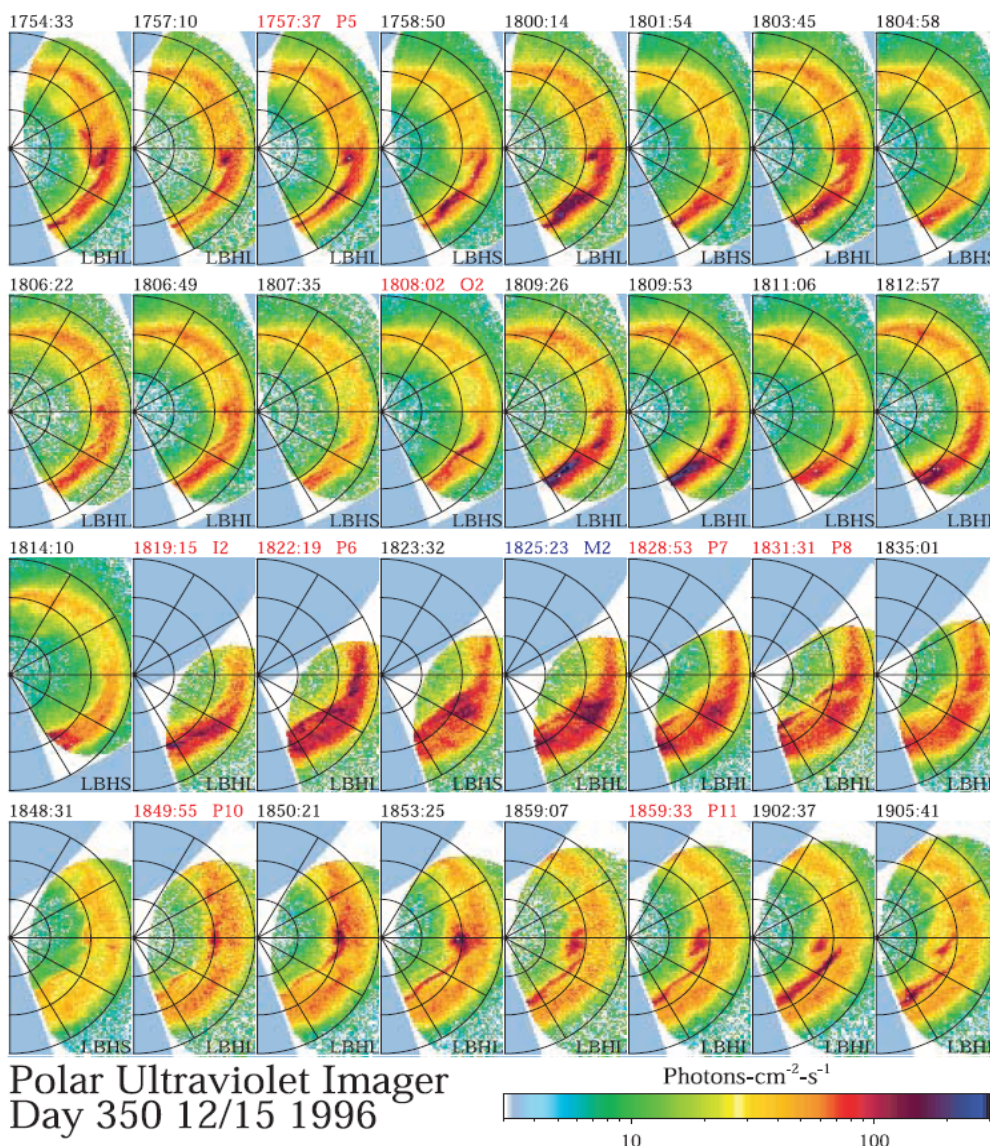
این زیرتوفان که تقریباً در 1737 UT در ۱۵ دسامبر ثبت شده مثال خوبی برای نشان دادن همبستگی بین شارش‌های سریع پلاسما در دُم مغناطیسی و فعالیت‌های شفق در یون‌سپهر است. در ابتدا شارش‌های پلاسما به طرف دُم بوده و سپس به سمت زمین برمی‌گردند. شکل ۱، دو ساعت پولزاسیون Pi2 و داده‌های Geotail را از 1720 UT تا



شکل ۱. از بالا به پایین: پولزاسیون Pi2 در کاکبوکا، سه مولفه سرعت شارش پلاسما، سه مولفه میدان مغناطیسی، میدان مغناطیسی کل، فشار کل (خط بالایی) و فشار یونی (خط پایینی) و β یون مشاهده شده با Geotail از 1720 UT تا 1920 UT. زمان‌های افت شفق (آغاز زیرتوفان) و تشدید آن (گسترش بیشتر برآمدگی شفق) به ترتیب با O و I مشخص شده‌اند. در بالای شکل زمان بیشینه‌های برآمدگی شفق با M و شبه بیشینه‌ها با P و روی شکل به ترتیب با خط‌نقطه‌ها و خط‌تیره‌های عمودی مشخص شده‌اند. زمان‌های شروع Pi2 در کاکبوکا و هرمانوس نیز به ترتیب با پیکان‌های بلند و کوتاه معلوم می‌شوند (می‌یاشینتا و همکاران، ۲۰۰۳).

آن همراه است. با استفاده از داده‌های Polar UVI زمان‌های آغازین زیرتوفان‌ها و گسترش بیشتر برآمدگی‌های شفق‌ی به ترتیب با O و I در بالای شکل مشخص شده‌اند. شکل ۲ نمونه‌هایی از شبه‌شکست‌ها (pseudobreakups)، شکست شفق‌ی و افزایش‌های آنها را نشان می‌دهد. نیمه‌شب و صبحدم مغناطیسی به ترتیب در بالا و سمت راست تصاویر واقع هستند.

اغلب شارش‌های به سمت دُم، مولفه‌های جنوب‌سو و به سمت استوا نیز دارند. به‌ویژه یک شارش به سمت دُم خیلی سریع (تقریباً ۱۴۰۰ کیلومتر بر ثانیه) با یک مولفه به سمت استوای بیشتر از ۶۰۰ کیلومتر بر ثانیه و B_z حدود ۱۴ nT در ۱۴ UT در ۱۸۲۳ مشاهده می‌شود. بعد از آن شارش‌های سریع به طرف زمین با میدان مغناطیسی شمال‌سو دیده می‌شود. این شارش‌ها با افزایش فشار کل و کاهش متعاقب



شکل ۲. تصاویر انتخاب‌شده قسمت شب از داده‌های Polar UVI در ۱۵ دسامبر ۱۹۹۶، نمونه‌هایی از شبه‌شکست‌ها و شکست‌های شفق‌ی (زمان‌های جهانی مشخص شده با رنگ سرخ، O,I,P) و بیشینه‌های برآمدگی شفق‌ی (زمان‌های جهانی مشخص شده با رنگ آبی، M) نشان داده شده‌اند (می‌باشینتا و همکاران، ۲۰۰۳).

Geotail (R_E) $\sim 21 - X$ قرار داشته و سپس به سمت دُم عقب نشینی کرده است. همچنین بررسی کاهش فشار کل (total pressure decrease, TPD) در دُم مغناطیسی نشان می‌دهد که با وجود آنکه موازنه فشار در جهت Z در ارتباط با زیرتوفان‌ها شکسته می‌شود، در کل مناطق لایه پلاسما (لایه مرزی لایه پلاسما و کناره‌های اطراف آغاز زیرتوفان) TPD اتفاق افتاده و منتشر می‌شود. همچنین می‌بینیم که TPD همبستگی خوبی با فعالیت شفق دارد. از شکل ۱ مشاهده می‌شود که افزایش و کاهش‌های متوالی فشار کل در دُم، به خوبی متناظر با شکست‌ها و شبه‌شکست‌های شفق و یا تشدیدهای کوچک است، برای مثال TPD در ۱۷۵۷ UT با P5 و P7 و P10 و P11 متناظر است. به علاوه فشار کل یک کاهش بزرگ در ارتباط با شکست شفق یا گسترش بیشتر به سمت قطب برآمدگی‌های شفق دارد، برای مثال فشار کل یک کاهش ۴۰٪ از ۱۷۳۹ UT تقریباً به مدت ۱۱ دقیقه دارد که متناظر با شکست شفق 0,1 است. همچنین مقایسه پولزاسیون Pi2 با داده‌های مغناطیسی زمینی در ردیف بالای شکل ۱، ۱۵ مورد پولزاسیون را نشان می‌دهد که بیشتر آنها تناظر خوبی با فعالیت شفق شبه‌شکست‌ها دارند.

۲-۳ زیرتوفان مارس ۱۹۹۷

زیرتوفان ثبت شده در ۱۰۲۸ UT در ۲۴ مارس ۱۹۹۷ مثال دیگری برای بررسی ارتباط بین TPD و فعالیت‌های شفق است. در شکل ۳، شفق قطبی در ۲۱,۰ MLT و ۶۶ درجه عرض مغناطیسی و در زمان (O1) ۱۰۲۸:۱۰ UT رخ داده است و برآمدگی شفق گسترش‌یافته، تقریباً به سمت قطب، دارای اندازه بیشینه در (MI) ۱۰۵۷:۳۶ UT تقریباً ۳۰ دقیقه بعد از (O1) مشاهده می‌شود. شبه‌شکست‌ها نیز در ۰,۵ MLT و عرض مغناطیسی تقریباً ۶۸ درجه در (P1) ۰۹۴۷:۰۴ و در (P2) ۱۰۰۶:۴۲ UT در مکان MLT

زمان مشخص شده در بالای هر تصویر میانه زمان دوره انتگرال‌گیری روی داده‌ها است. تصاویر ردیف بالا در شکل ۲ یک شبه‌شکست را در ۱۸ s UT $\pm 1757:37$ در ۲۲,۰ MLT (Magnetic Local Time) و در عرض مغناطیسی $67^\circ \sim$ نشان می‌دهند. این رخداد خیلی حجیم می‌شود و در زمان ۱۷۵۹:۴۶ UT (Labeled 1800:14) به بیشترین مقدار می‌رسد، اما گسترش جهانی ندارد. دو ردیف وسط، دومین شکست شفق و گسترش هرچه بیشتر برآمدگی شفق به سمت قطب را نشان می‌دهند. شدت شفق در ۲۲,۵ MLT و $65^\circ \sim$ عرض مغناطیسی در ۱۸۰۸:۰۲ UT شروع به افزایش می‌کند و سپس منطقه شدت به سمت غرب گسترش می‌یابد. برآمدگی شفق در مکان ۲۱,۰ MLT و در ۱۸۱۹:۱۵ UT شروع به گسترش بیشتر به سمت قطب می‌کند و در زمان ۱۸۲۵:۲۳ به وسیع‌ترین مقدار می‌رسد. بیشینه برآمدگی حدود ۴,۵ ساعت (از ۱۹,۵ تا ۰,۰) در MLT بین ۶۲ تا ۷۴ درجه عرض مغناطیسی، به ترتیب با دقت‌های ۰,۵ ساعت و ۱ درجه، واقع است. ردیف پایین، فعالیت‌های شفق را در انتهای فاز گسترش یا ابتدای فاز بازگشت نشان می‌دهد. یک تشدید کوچک در ۰,۰ MLT \sim و تقریباً ۷۰ درجه عرض مغناطیسی در زمان ۱۸۴۹:۵۵ UT و دو تشدید هم‌زمان کوچک‌تر در ۲۳,۰ MLT و ۷۱ درجه و ۲۰,۰ MLT و ۷۳ درجه ملاحظه می‌شود که می‌تواند مربوط به PBIs باشد که در نزدیک مرز طرف قطب اتفاق می‌افتد.

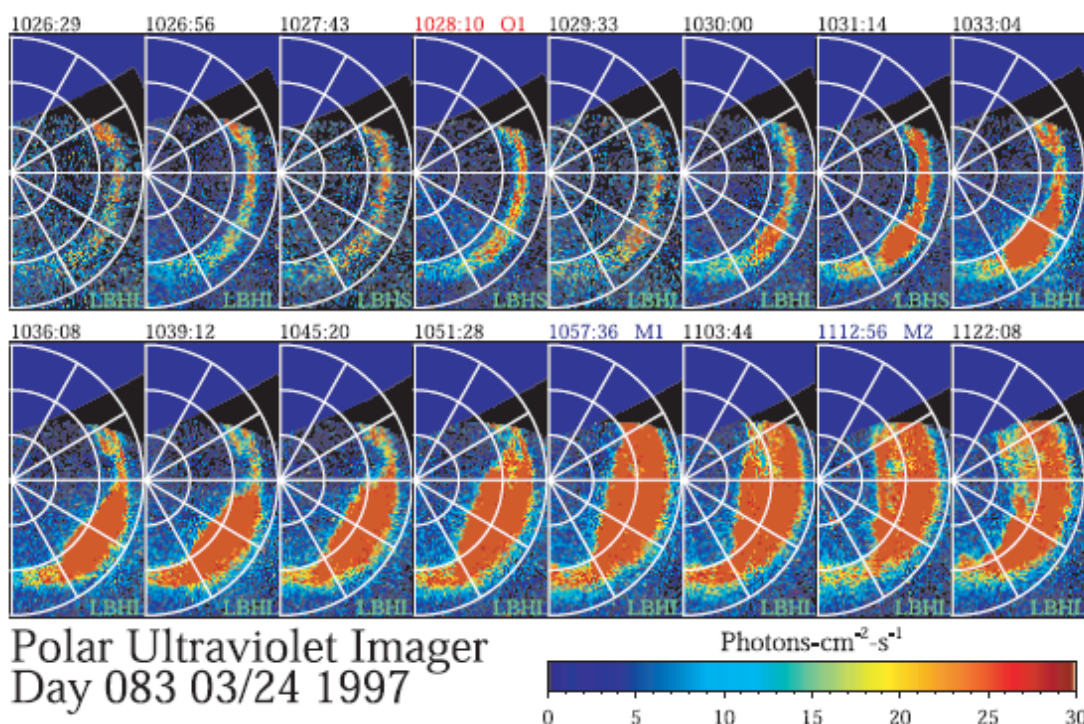
برای این زیرتوفان تعدادی شارش‌های به سمت دُم سریع مشاهده می‌شود که همبستگی خوبی با فعالیت‌های شفق در طی فاز گسترش دارند. سپس در ابتدای فاز بازگشت شارش‌های سریع پلاسما به سمت زمین برمی‌گردند و حدود یک دقیقه پیش از تشدید کوچک شفق مشاهده می‌شوند. این مشاهدات نشان می‌دهند که خط خنثی نزدیک زمین در آغاز در سمت سوی زمین

با وجود این، فشار کل تقریباً مدت ۲۷ دقیقه به اندازه ۶۵٪ کاهش می‌یابد که قابل مقایسه و متناظر با مدت زمان گسترش به سمت قطب برآمدگی شفق است. بعد از آن در ۱۰۵۸ UT افزایش فشار کل مشاهده می‌شود ولی ارتباط آن با گسترش قسمت پس از نیمه‌شب برآمدگی خیلی روشن نیست.

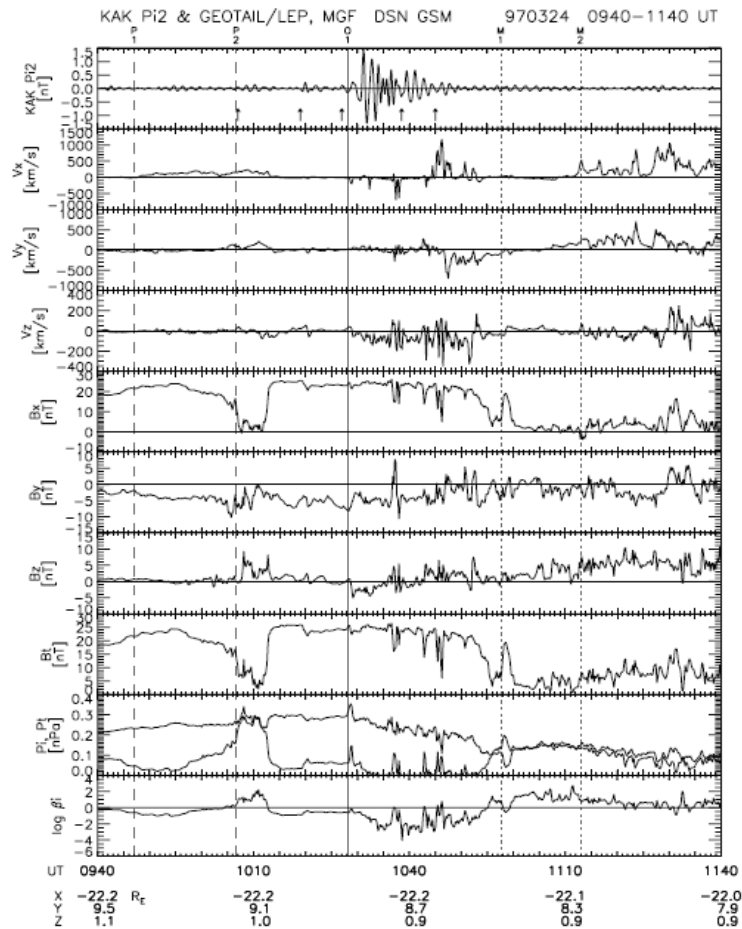
۳-۳ زیرتوفان سپتامبر ۲۰۰۲

شکل ۵ داده‌های نموداری ACE (قسمت‌های a تا c) و Cluster (قسمت‌های d تا f) همراه با داده‌های مغناطیس‌سنج‌های زمینی شبکه IMAGE (قسمت‌های g تا i) و ثبت‌های مغناطیس‌سنج Urumqi (قسمت‌های j و k) در فاصله زمانی ۱۷۰۰ - ۲۰۰۰ UT - سپتامبر ۲۰۰۲ را نشان می‌دهد. در طی این مدت فضاییمای Cluster در موقعیت مکانی $(X = -17.5, Y = 2.5, Z = 2.5) R_E$

و عرض مغناطیسی تقریباً ۶۸ درجه مشاهده می‌شوند. شکل ۴ نیز پولزاسیون Pi2 در کیوکا و داده‌های Geotail از ۰۹۴۰ UT تا ۱۱۴۰ UT را نشان می‌دهد. در طی این مدت Geotail در موقعیت $(X, Y) \sim (-22, 0.9) R_E$ واقع بوده است. فشار کل در دُم مغناطیسی در طی شبه‌شکست (P1) کاهش نمی‌یابد. بعد از (P2)، افزایش و کاهش متعاقب فشار کل در ارتباط با شارش به سمت زمین با مولفه B_z شمال‌سو در لایه پلاسما مشاهده می‌شود و سپس فشار کل تا شکست شفق (O1) تقریباً ثابت می‌ماند. بعد از (O1) فشار کل همانند شارش به سمت دُم در ارتباط با plasmoid به تدریج افزایش می‌یابد. سپس Geotail از قسمت اصلی plasmoid به سمت کناره منتقل شده و B_z جنوب‌سو متناظر با منطقه متراکم انتقالی به مدت تقریباً ۶ دقیقه مشاهده می‌شود.



شکل ۳. تصاویر انتخاب شده از داده‌های Polar UVI در ۲۴ مارس ۱۹۹۷ که شکست شفق و گسترش برآمدگی شفق را نشان می‌دهد (می‌یاشیتا و همکاران، ۲۰۰۳).



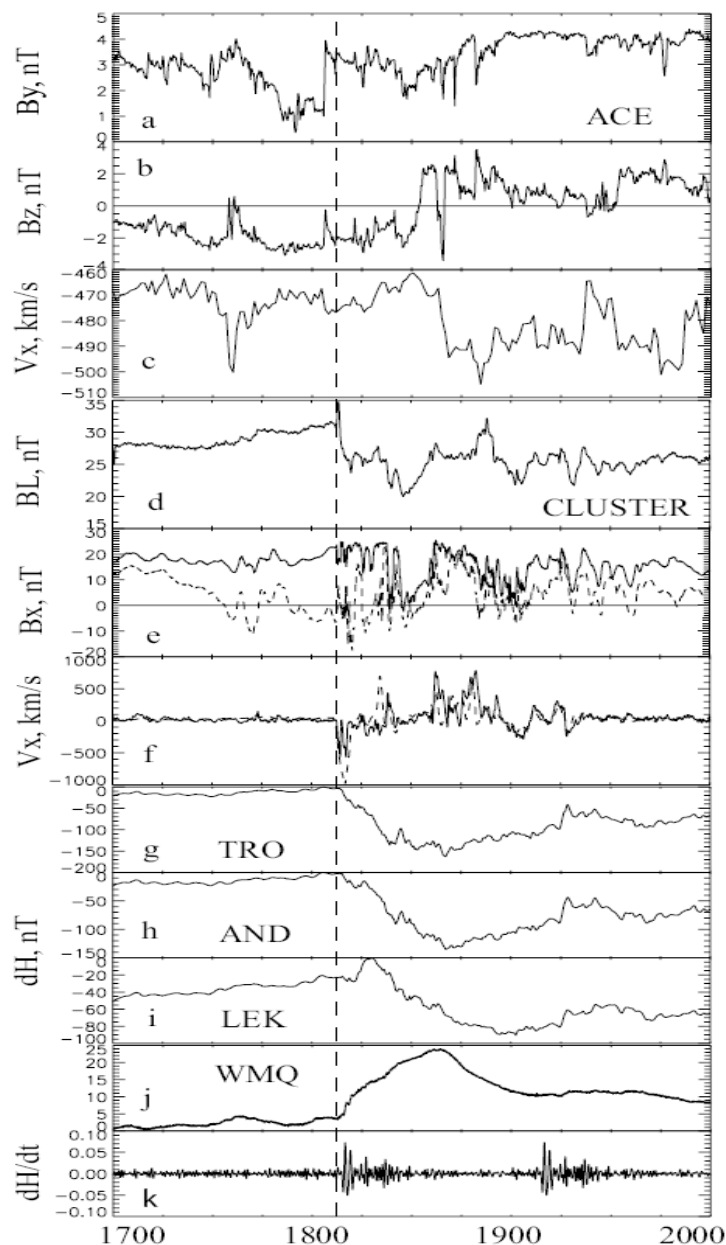
شکل ۴. دو ساعت پولزاسیون و داده های Geotail از 0940 UT تا 1140 UT در ۲۴ مارس ۱۹۹۷ (می یاشیتا و همکاران، ۲۰۰۳).

می رسد و سپس تا ۲۴ nT افت می کند که این دلالت بر آزاد شدن انرژی مغناطیسی ذخیره شده دارد. در UT ۱۸۰۸ مغناطیس سنچ زمینی یک Bay منفی را نشان می دهد و حدود دو دقیقه بعد آغاز پولزاسیون Pi2 با مغناطیس سنچ Urumqi ثبت شده است. ۵۰ دقیقه از سری تناوبی مولفه های B_y و B_z از میدان مغناطیسی بین سیاره ای IMF در قسمت های a و b شکل دیده می شود، B_z در طی ۳۰ دقیقه پیش از رخداد منفی بوده است و یک پرش ناگهانی در IMF درست پیش از شروع مشاهده می شود. در حدود UT ۱۸۲۰، Cluster شروع به آشکارسازی

در دستگاه مختصات GSM واقع بوده است. شاخه جنوبی فضاییما (Cluster 3)، خط تیره در قسمت e شکل) بیشتر اوقات در مرکز لایه خنثی قرار داشته است در حالی که شاخه شمالی آن (Cluster 1)، خط پیوسته در همان قسمت) در شروع فاصله زمانی در کناره شمالی واقع بوده و سپس وارد لایه پلاسما شده است. در UT ۱۸۰۷، Cluster یک شارش یونی به سمت دم با سرعت بسیار زیاد $\sim 800 \text{ km/s}^{-1}$ را ثبت کرده است و در همان زمان میدان مغناطیسی کناره $\{ B_1 = \sqrt{P_T} / 2\mu_0 \}$ ، که در آن $\{ P_T = nkT_i + B^2 / 2\mu_0 \}$ (قسمت d) که در قبل به تدریج افزایش می یافت، ابتدا خیلی سریع به ۳۵ nT

نیز در طی ۱۹۳۰ تا ۱۹۵۰ UT در منطقه دور از لایه خنثی ثبت شده‌اند که بیشتر موازی و متناظر با $B_x \sim 20 \text{ nT}$ هستند. بررسی موارد ذکر شده روشن می‌سازد که انحنای بردار میدان مغناطیسی، متناظر با معکوس شدن شارش‌ها، معکوس می‌شود.

شارش یونی خیلی سریع به سمت زمین کرده است. این شروع شارش، با کاهش میدان مغناطیسی کناره به 20 nT متناظر است. در طی فاصله زمانی حوالی B_1 کمینه، Cluster در ناحیه لایه خنثی قرار داشته و هیچ شارشی را ثبت نکرده است. دو شارش یونی متلاطم‌تر به سمت زمین



شکل ۵. از بالا به پایین: مولفه های Y و Z از IMF (a و b)، مولفه X سرعت باد خورشیدی (c)، میدان مغناطیسی کناره B_1 (d)، B_x از Cluster 1 (خط ممتد) و از Cluster 3 (خط تیره) (e)، ثبت‌های مغناطیس سنج زمینی از شبکه IMAGE (g تا i) و ایستگاه Urumqi (j و k) در ۱۳ سپتامبر ۲۰۰۲.

۴ نتیجه گیری

شب و محدود شدن مغناطیس سپهر و بنابراین ایجاد یک ساختار شار مغناطیسی در دُم. ۳- افزایش فشار شار مغناطیسی در کناره‌ها و نازک‌تر شدن لایه پلاسما و شکل‌گیری هرچه بیشتر خطوط میدان شبیه دُم. ۴- به حد کافی نازک‌شدن لایه پلاسما که شرایط مگنتوهیدرودینامیک شکسته شود و شروع اتصال مجدد در محل خط خنثی نزدیک زمین. ۵- حل مسئله انرژی با فوران انرژی و پلاسما در جهت پایین دُم، جایی که شار مغناطیسی دوقطبی وجود دارد و بازگشت مجدد آن به سمت زمین و ایجاد فعالیت‌های شفقی دیده می‌شود.

با توجه به موارد پیش گفته در این مقاله، بهتر است در تحقیقات آینده سهم شرایط خارجی مغناطیس سپهر و یون‌سپهر نیز در گسترش زیرتوفان‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

- Baker, D. N., Pulkkinen, T. I., Angelopoulos, V., Baumjohann, W. and McPherson, R. L., 1996, Neutral line model of substorms: Past results and present view, *J. Geophys. Res.*, **101**, 12975-13010.
- Balogh, A., Carr, C. M., Acuna, M. H., Dunlop, M. W., Beek, T. J., Brown, P., Fornaçon, K. H., Georgescu, E., Glassmerier, K. H., Harris, J., Musmann, G., Oddy, T., and Schwingenschuh, K., 2001, The Cluster magnetic field investigation: overview of hn-flight performance and initial results., *Ann. Geophys.*, **19**, 1207- 1277.
- Chanteur, G., 1998, Spatial interpolation for four spacecraft Data. ed. G. Paschmann and P. Daly, ESA, Paris, 349-369.
- Kan J.R., 1993, A global magnetosphere-ionosphere coupling model for substorms, *J. Geophys. Res.*, **98**, 17263- 17275.
- Lui, A. T. Y., 1996, Current disruption in the earth's magnetosphere: Observations and models, *J. Geophys. Res.*, **101**, 13067-13088.
- Miyashta, Y., Machida, S; Liou, K; Mukai, T; Saito, Y; Meng, C.I. and Parks, G. K., 2003, Relation between magnetotail variations and auroral activities during substorms, *J. Geophys. Res.*, **108**(A1), 1022-1033.

بررسی داده‌های Geotail و Polar UVI برای زیرتوفان‌های دسامبر ۱۹۹۶ و مارس ۱۹۹۷ همبستگی بسیار زیادی بین شارش‌های سریع پلاسما با تغییرات میدان مغناطیسی شمالی- جنوبی و با تغییرات فشار کل در دُم مغناطیسی نشان می‌دهد. شارش‌ها در آغاز جهت‌گیری به سمت دُم دارند و سپس جهت آنها به سمت زمین برمی‌گردد. این رخدادها بر این دلالت دارند که فعالیت و واپس‌نشینی خط خنثی نزدیک زمین، تناوبی است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاهش فشار کل در دُم مغناطیسی همبستگی بیشتری با فعالیت‌های شفقی نسبت به شارش سریع پلاسما دارد. از بررسی مشاهدات معلوم می‌شود که، کاهش شدید فشار کل در دُم مغناطیسی بر اثر شکست‌های شفقی یا گسترش به سمت قطب برآمدگی‌های شفقی و کاهش‌های آهسته‌تر آن را در اثر شبه‌شکست‌ها صورت می‌گیرد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که ارتباط دامنه فعالیت‌های شفقی به زیرتوفان، وابسته به چگونگی پراکندگی انرژی در دُم مغناطیسی است.

بررسی داده‌های چهارتایی Cluster و مگنتوگرام‌های زمینی برای زیرتوفان سپتامبر ۲۰۰۲ نیز نشان می‌دهد که انرژی مغناطیسی ذخیره شده در حین زیرتوفان و با معکوس شدن جهت شارش‌های سریع یونی آزاد می‌شود. این مشاهدات همچنین وجود یک باریکه الکترونی در داخل خط خنثی به دلیل اغتشاش‌های مولفه B_y میدان مغناطیسی در نزدیک مرز کناره لایه پلاسما را نشان می‌دهند. این نتایج را می‌توان برای توصیف زیرتوفان در چند مرحله به شکل زیر به کار برد:

- ۱- حضور یک مولفه قوی به سمت جنوب میدان مغناطیسی بین سیاره‌ای (IMF) و افزایش آهنگ اتصال مجدد مغناطیسی و انتقال شار مغناطیسی به داخل دُم مغناطیسی. ۲- انتقال فشار شار مغناطیسی از دُم به سمت

- Nagai, T. J. Shinohara, I., Fujimoto, M., Hoshino, Y., Saito, S., Machida, S., and Mukai, T., 2001, Geotail observations of the Hall current system : Evidence of magnetic reconnection in the magnetotail, *J. Geophys. Res.*, **106**, 25929-25941.
- Paschmann, G., et al., 2001, The Electron Drift instrument of Cluster: Overview of first results, *Ann. Geophys.*, **19**, 1273.
- Petrukovich, A. A., Sergeev, V. A. and Zeleniy, L. M., 1998, Two spacecraft observations of a reconnection pulse during an Auroral breakup, *J. Geophys. Res.*, **103**, 47-59.
- Reme, h., Aoustin, C., Bosqued, J. M., Pandourasi, I., Lavraud, B. and Sauvaud, J. A., 2001, First multi-spacecraft ion measurements in and near Earth's magnetosphere With the identical Cluster ion spectrometry (CHS) experiment, *Ann. Geophys.*, **19**, 1303- 1353.
- Runov, A., Asano, Y., vörös, Z., Nakamura, R., Bamnjohann, W., Psehann, G., Quinn, J., McIlwain, C., Balogh, A. and Reme, H., 2004, Cluster magnetotail probe during the 13 September 2002 substorm ,*Proc. ICS-7*.
- Shen, C., . Li, X; Danlop, M., Liu, Z. X., Balogh, A., Baker, D. N.; Hapgood, M and Wang, X., 2003, Analyses on the geometrical structure of magnetic field in the current sheet Based on Cluster measurements, *J. Geophys. Res.*, **108**, 1168, doi:10.1029/2002JA009612.
- Terasawa, T., 1983, Hall current effect on tearing mode instability, *Geophys. Res. Lett.*, **10**, 475-479.