

Jana Šafránková; Zdeněk Němeček

Vliv směru meziplanetárního magnetického pole na formování magnetosféry Země

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 47 (2002), No. 3, 230--242

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141135>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2002

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

# Vliv směru meziplanetárního magnetického pole na formování magnetosféry Země

Jana Šafránková a Zdeněk Němeček, Praha

## Úvod

Fyzika vztahů Slunce – Země, jejíž součástí je i výzkum zemské magnetosféry, záleží především ve studiu vzájemných interakcí nabitých částic s elektrickými a magnetickými poli vyskytujícími se v meziplanetárním prostoru. Některé projevy těchto interakcí je možno pozorovat ze zemského povrchu pomocí různých přístrojů (kamer, fotometrů, spektrometrů, magnetometrů), citlivých na procesy probíhající v horní atmosféře, nebo např. i magnetosféře, ale již od šedesátých let minulého století probíhá současně intenzivní výzkum „*in situ*“ pomocí raket, balonů a umělých družic.

Nebudeme se zde zabývat historií studia magnetosféry Země umělými objekty, i když je to historie velmi zajímavá, ale soustředíme se pouze na poslední léta, kdy rozvoj výzkumu pomocí družic nabyl na intenzitě. Co bylo nebo je příčinou tohoto rozmachu? Obrovský rozvoj technologií na konci minulého století přinesl výrazný pokrok do vývoje experimentálních metod, který se ve svém důsledku odrazil v přesnějším a objektivnějším měření všech fyzikálních veličin. Zároveň s tímto rozvojem však vědci pochopili, že jedna družice pohybující se po jakkoliv „dokonalé“ dráze okolo Země a vybavená sebecitlivějšími přístroji již další podstatné zlepšení našeho poznání nepřinese. To byl důvod, proč od 80. let směřovalo úsilí velkých kosmických agentur (americké NASA, evropské ESA, japonské i ruské) k současnému vypouštění více družic rozmístěných v meziplanetárním prostoru a v okolí Země. Tento trend vyvrcholil realizací projektů INTERBALL a CLUSTER, z nichž každý byl složen dokonce ze čtyř družic.

## Proč je třeba více družic?

Ne každý si uvědomí, že celkový objem magnetosféry Země ohraničené magnetopauzou (hranice, kde se tlak slunečního větru vyrovnává s tlakem zemského magnetického pole) je možno odhadnout na  $10^{17}$  km<sup>3</sup>. Pokud nebudeme počítat vlastní Zemi s její gravitačně vázanou atmosférou, nachází se v tomto obrovském objemu pouze nepatrné množství hmoty ( $\sim 10^3$  kg), která je z podstatné části tvořena plazmatem — elektrony

---

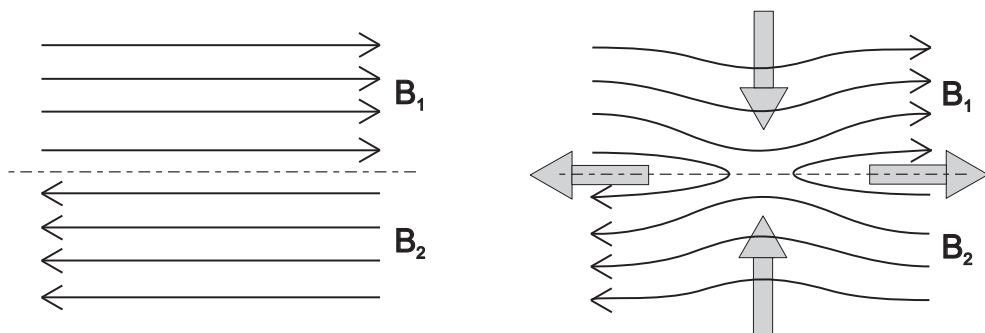
Doc. RNDr. JANA ŠAFRÁNKOVÁ, DrSc. (1947), a doc. RNDr. ZDENĚK NĚMEČEK, DrSc. (1947), katedra elektroniky a vakuové fyziky, MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8.

a ionty slunečního původu. Tato hmota není samozřejmě v prostoru rozdělena rovnoměrně, ale soustřeďuje se do různých oblastí, kde se koncentrace částic může měnit v širokém rozsahu, od  $10^2$  do  $10^8 \text{ m}^{-3}$ . Pohyb tohoto nepatrného množství hmoty způsobuje na jedné straně jevy známé jako polární záře, na druhé straně může být i příčinou výpadků nebo alespoň zkrvení v radiovém spojení a v krajních případech může vést, prostřednictvím výrazných změn v intenzitě geomagnetického pole, k poškození nebo úplnému zničení rozvodných sítí a dálkových ropovodů či plynovodů, jak se již několikrát stalo. Pro pochopení těchto procesů musíme znát vzájemné vztahy mezi jednotlivými oblastmi, a to samozřejmě není možné bez koordinovaného měření více družicemi.

## Plazma a magnetické pole

Jak jsme již předeslali, fyzika magnetosféry je do značné míry fyzikou magnetizovaného plazmatu. Můžeme vytypovat dva limitní případy — pokud je koncentrace (vodivost) plazmatu dostatečně vysoká a gradienty magnetického pole jsou malé, nemůže se magnetické pole v libovolném objemu změnit, a pokud se toto plazma navíc pohybuje, unáší magnetické pole s sebou. Tento efekt se nazývá *zamrznutí magnetického pole v plazmatu*. Typickým příkladem je meziplanetární magnetické pole, které je vlastně magnetickým polem Slunce, unášeným slunečním větrem.

Pokud je naopak gradient magnetického pole velký, dochází k *difúzi magnetického pole*, při které je energie magnetického pole předávána plazmatu. Speciálním případem difúze magnetického pole je *přepojování* magnetických polí (magnetic reconnection)<sup>1)</sup>. Proces přepojování je schematicky znázorněn na obrázku 1.



Obr. 1. Schematické znázornění procesu přepojování magnetických polí. V levé části obrázku je výchozí situace, v pravé pak stav dynamické rovnováhy, která se ustaví vlivem přepojování antiparalelních magnetických polí. Šipky znázorňují směry toku plazmatu vyvolané přepojováním polí.

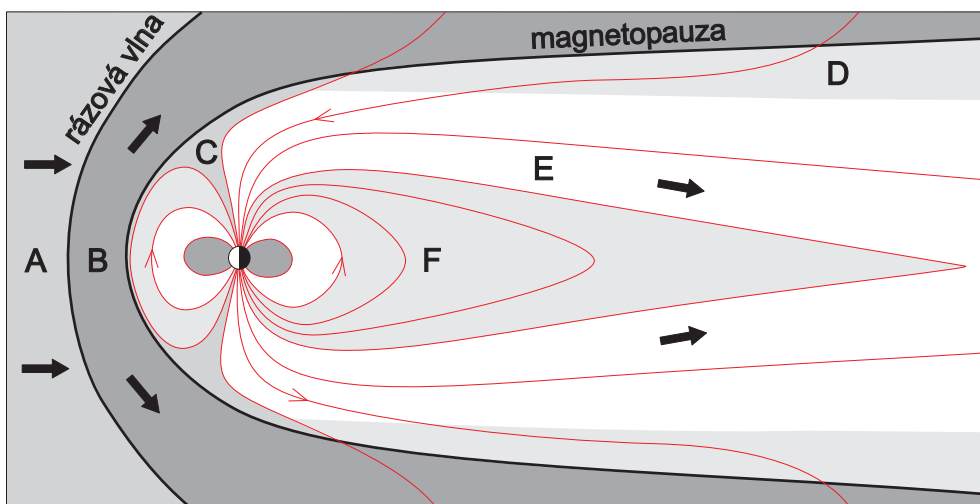
<sup>1)</sup> Pro mnoho pojmů z magnetosférické fyziky neexistuje ustálená terminologie. My v tomto příspěvku používáme sice české ekvivalenty, ale pro přesnost uvádíme vždy při prvním použití i originální anglický název.

Předpokládejme dvě homogenní magnetická pole  $B_1$  a  $B_2$  orientovaná antiparalelně. Nulový gradient pole je tedy podél rozhraní. Pokud v některém místě dojde vlivem fluktuací k intenzivnější difúzi magnetického pole, je uvolněná energie předána částicím plazmatu, které jsou urychleny podél rozhraní. V tomto místě tedy klesá tlak a tlakový gradient způsobí, že plazma se začne pohybovat proti směru tohoto gradientu. Pohyb plazmatu přináší další zamrzlé magnetické siločáry a proces dále pokračuje. Výsledná geometrie pole bude podobná té, která je v pravé části obrázku 1. Přitom není rozhodující, zda siločáry na dvou stranách rozhraní pocházejí z jednoho nebo ze dvou různých zdrojů. My zde budeme nadále pojem „přepojování“ používat pro vzájemnou interakci meziplanetárního a magnetosférického magnetického pole.

Obrázek přepojování i jeho popis je vzhledem k podmínkám v meziplanetárním prostoru velmi zjednodušený, ale představuje jedinou konfiguraci, kterou dokážeme matematicky popsat. Ve skutečných podmínkách se obvykle na rozhraní mění parametry plazmatu, často až o několik řádů, nebo se plazma na jedné straně rozhraní pohybuje. Takové konfigurace prozatím vypočítat nedokážeme, a proto zbývá jen experimentální výzkum.

## Magnetosférické oblasti, hranice mezi nimi a jejich formování

Jaké jsou hranice magnetosféry a jak jsou formovány? Přehledně jsou různé hranice a oblasti znázorněny na obr. 2. Sluneční vítr, který vzniká při expanzi sluneční korony, naráží na překážku, již je původně dipólové magnetické pole Země. Do bilance vzájemného působení je třeba zahrnout na jedné straně dynamický tlak slunečního



Obr. 2. Řez zemskou magnetosférou v rovině určené přímkou Slunce – Země a geomagnetickým dipólem. Šedě jsou vyznačeny oblasti s vyšší ( $10^6 \text{ m}^{-3}$  a více) koncentrací plazmatu. Šípky ukazují směr obtékání magnetosféry slunečním větrem, tenké čáry znázorňují geomagnetické siločáry. Jednotlivé oblasti jsou označeny písmeny: A – sluneční vítr, B – přechodová oblast, C – kasp, D – plazmový plášť, E – magnetosférický lalok, F – plazmová vrstva.

větru, na druhé straně pak tlak magnetického pole Země. Družicová měření ukázala, že takto zjednodušená rovnováha je pro většinu úvah dostatečná, neboť ostatní veličiny (tepelný tlak plazmatu, tlak meziplanetárního magnetického pole, ...) jsou zanedbatelné. V místě, kde se hodnoty těchto tlaků vyrovnají, se nachází vnější hranice magnetosféry, *magnetopauza* (magnetopause). Magnetopauza tvoří překážku, která stojí v cestě toku slunečního větru, pohybujícího se nadzvukovou rychlostí, a proto se před ní vytváří *rázová vlna* (bow shock), obdobně jako v případě nadzvukových letadel. Na rázové vlně dochází ke skokové změně parametrů plazmatu slunečního větru (rychlost, teplota, koncentrace) a změně intenzity meziplanetárního pole. Také z těchto důvodů se turbulentní oblast za rázovou vlnou (po směru toku plazmatu) nazývá *přechodová oblast* (magnetosheath). Je vyplněna „zpomaleným a ohřátým“ plazmatem slunečního větru, které proudí podél magnetosféry. Při tom dále unáší i zamrzlé meziplanetární magnetické pole. Jeho intenzita je díky kompresi plazmatu vyšší než v neporušeném slunečním větru a směr je odlišný. V principu by bylo možno výsledný směr i velikost magnetického pole v přechodové oblasti určit řešením magnetohydrodynamických rovnic, ale toto řešení je vzhledem k okrajovým podmínkám značně obtížné a prozatím nebylo provedeno.

Pro procesy, o kterých budeme dále mluvit, je však důležité, že malá část plazmatu přechodové oblasti proniká do vnitřní magnetosféry. Díky své hybnosti unáší zemské magnetické pole do značných vzdáleností a vytváří dobře známý *chvost magnetosféry* (magnetospheric tail), který se táhne nejméně do vzdálenosti 1 milionu kilometrů.

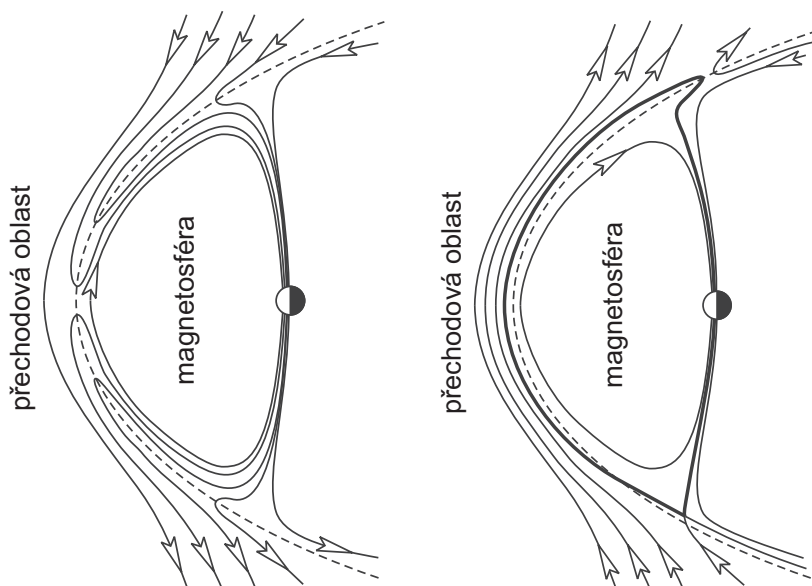
Meziplanetární magnetické pole se na magnetopauze stýká se zemským magnetickým polem a při vhodné vzájemné orientaci může dojít k jejich propojení. Toto propojení může být stacionární (*steady state reconnection*) nebo impulzní (*flux transfer events — FTE*). Nové poznatky získané v posledních letech naznačují, že tyto dva pojmy označují pouze dva limitní případy procesu vzájemného propojování siločar, který může přejít spojitě od jednoho extrému ke druhému v závislosti na vnějších podmínkách. V okamžiku, kdy dojde k vzájemnému propojení siločar, může plazma slunečního větru pronikat do hraničních vrstev magnetosféry a naopak částice magnetosférického původu mohou uniknout do přechodové oblasti. Tento jev se nazývá impulzní přenos plazmatu (*plasma transfer events — PTE*) a dochází k němu s poměrně velkou četností.

Vraťme se však k formování magnetosférických oblastí. Vzhledem ke geometrii zemského magnetického pole je zřejmé, že siločáry, které tvoří magnetopauzu, přicházejí na povrch Země v malé oblasti poblíž geomagnetického pólu a tvoří jakousi nálevku — *kasp* (cusp) a právě do této oblasti se soustředí plazma přechodové oblasti, které se po přepojení siločar dostalo na geomagnetické siločáry zakotvené k Zemi. V oblastech polárních kaspů vstupuje tedy plazma z přechodové oblasti do magnetosféry a zachovává si své původní energetické charakteristiky. Nabitě částice plazmatu se pohybují jednak do horních vrstev atmosféry, jednak se odrážejí v silném magnetickém poli dipólového charakteru v blízkosti Země a vnikají do *plazmového pláště* (plasma mantle), který přiléhá k magnetopauze ve chvostu magnetosféry. Siločáry plazmového pláště jsou tedy otevřené a napojené do meziplanetárního magnetického pole.

Část plazmatu však proniká i do oblasti uzavřených siločar a akumuluje se v *plazmové vrstvě* (plasma sheet), kde se koncentrace částic pohybuje okolo  $10^6 \text{ m}^{-3}$ . Mezi plazmovým pláštěm a plazmovou vrstvou se nacházejí *laloky* (lobes). Magnetické siločáry těchto laloků jsou otevřené, a proto veškeré plazma, které tam pronikne, odchází do meziplanetárního prostoru a průměrná koncentrace částic v této oblasti je tedy pouze  $10^4 \text{ m}^{-3}$ .

### Vliv orientace meziplanetárního magnetického pole

Jak jsme již ukázali, intenzita a charakter přepojování magnetických siločar závisí především na vzájemné orientaci meziplanetárního a zemského magnetického pole. Protože však zemské magnetické pole přes drobné poruchy svoji orientaci nemění, ovlivňuje konfiguraci magnetosféry hlavně směr meziplanetárního magnetického pole. V současné době je interakce těchto polí dobře popsána v případě, kdy má meziplanetární pole směr přibližně totožný se směrem zemského magnetického dipólu. V běžně užívané soustavě GSM (Geocentric Solar Magnetic Coordinates), kdy osa  $X$  směřuje ke Slunci, osa  $Z$  leží v rovině dané osou  $X$  a zemským magnetickým dipólem a osa  $Y$  doplňuje pravotočivou soustavu, se jedná o případ, kdy meziplanetární pole má dominantní složku  $B_z$ . Je-li tato složka záporná (směřuje k jihu), probíhá proces přepojování podle schématu na obr. 3a. Toto přepojení probíhá poblíž subsolárního bodu a propojená siločára je unášena podél magnetopauzy do chvostu a vytváří postupně *plazmový plášť* (plasma mantle). Tímto procesem se zmenší magnetický tok



Obr. 3. Konfigurace magnetického pole v okolí kaspu pro meziplanetární magnetické pole orientované k jihu (a) a k severu (b).

na denní straně magnetosféry, jenž je průběžně doplňován magnetosférickou konvekcí. Plazma přechodové oblasti proniká podél propojených siločar do kaspu a po odrazu doplňuje dále plazmový plášť.

V případě, že meziplanetární magnetické pole směřuje k severu, dochází k propojování polí v oblasti za kaspem, jak je znázorněno na obr. 3b. Geometrie pole je v tomto případě velmi komplikovaná, průnik plazmatu je obtížnější a je možný pouze tehdy, když urychlení plazmatu vlivem přepojení polí je dostatečné. Z porovnání obrázků 3a a 3b vyplývá, že v případě jižního meziplanetárního pole budou siločáry kaspu protínat zemský povrch blíže k rovníku než v případě pole severního. Plazma kaspu je možno dobře identifikovat v měření družic na nízkých oběžných drahách ( $\sim 1000$  km), kterých je vypouštěno velké množství. Statistickým zpracováním měření z amerických meteorologických družic DMSP byl zmíněn posuv kaspu směrem k rovníku prokázán [1].

Dlouhodobá měření meziplanetárního pole však ukazují, že intervaly, kdy má toto pole severní nebo jižní směr, jsou poměrně řídké. Ve většině případů převažují zbývající dvě složky, z nich je důležitější složka ve směru východ–západ (tj. složka  $B_y$ ). Pro takový případ není možno nakreslit jednoduchý ilustrační obrázek, ale opět statisticky bylo pro kaspovou oblast v nižších výškách (do  $\sim 1000$  km) zjištěno, že pokud je tato složka kladná, posouvá se kasp v severní polokouli směrem k odpoledním lokálním časům a jižní kasp naopak.

Teprve nyní končí vlastně velmi dlouhý úvod k tomu, co bychom chtěli v tomto příspěvku ukázat. Rádi bychom čtenářům přiblížili význam české družice MAGION-4<sup>2)</sup> pro experimentální výzkum parametrů plazmatu v magnetosféře, prezentovaný zde na příkladu dlouhodobého pozorování kaspu a následného statistického zpracování. Její přínos však nespočívá jen v samostatném měření, a proto bychom v další části rádi prezentovali i její význam pro studium globálních charakteristik magnetosféry v kontextu jejího zařazení do souboru družic pohybujících se po různých oběžných drahách v různých místech prostoru v širokém okolí Země.

## Kasp ve velkých výškách

I my jsme se zabývali analýzou pozorování kaspu, ale ve výškách nad  $5 R_E$ <sup>3)</sup>, kde se pohybovaly družice projektu INTERBALL. V měření družice MAGION-4 byly identifikovány takové úseky dráhy, na kterých byla pozorována plazma s charakteristikami (teplota, koncentrace, rychlost) odpovídajícími plazmatu v kaspu. Tyto úseky byly pak projektovány podél magnetických siločar na zemský povrch. K projektování byl použit model magnetosférického magnetického pole (Tsyganenko, 1996 [2]). Tato projekce je založena na předpokladu, že plazma se v magnetosféře pohybuje podél magnetických siločar, a pokud je v nějakém místě pozorováno, bude pozorováno všude podél siločáry.

---

<sup>2)</sup> Družice série MAGION byly vyvinuty v Ústavu fyziky atmosféry AV ČR. Podrobnosti je možno nalézt na www stránkách: <http://www.ufa.cas.cz/magion/>.

<sup>3)</sup>  $R_E$  — zemské poloměry ( $1 R_E \sim 6370$  km).

Tento předpoklad je v magnetosféře v zásadě splněn, ale není možno ho samozřejmě aplikovat na oblasti vně magnetopauzy.

Siločáry použitého modelu byly trasovány k zemskému povrchu a výsledek je nakreslen v obrázku C.4 (viz barevnou přílohu) v polárních souřadnicích s počátkem v geomagnetickém pólu. Vzdálenost od středu znázorňuje geomagnetickou šířku a paprskovité linie odpovídají lokálním časům. Barevnou stupnicí je vyznačena doba pozorování kaspu v příslušném místě. Obrázek dobře odpovídá tomu, co bylo zjištěno v malých výškách, ale přináší i řadu nových poznatků. Prvním je, že kasp může být pozorován v poměrně širokém rozsahu souřadnic, nikoli pouze v malé oblasti kolem lokálního poledne, jak se běžně předpokládalo. Druhým významným poznatkem je, že pravděpodobnost pozorování kaspu v libovolném místě nepřevyšuje  $\sim 30\%$ . Z toho můžeme vyvodit, že kasp je i ve vysokých výškách poměrně úzký, ale vlivem vnějších podmínek se přesunuje na různá místa. Nejdůležitějším poznatkem ovšem je, že pravděpodobnost výskytu kaspu není největší v okolí lokálního poledne, ale že existují dvě srovnatelná maxima, jedno kolem 10. a druhé kolem 14. hodiny lokálního času. Tento efekt jsme přisoudili již zmíněnému vlivu složky  $B_y$  meziplanetárního magnetického pole.

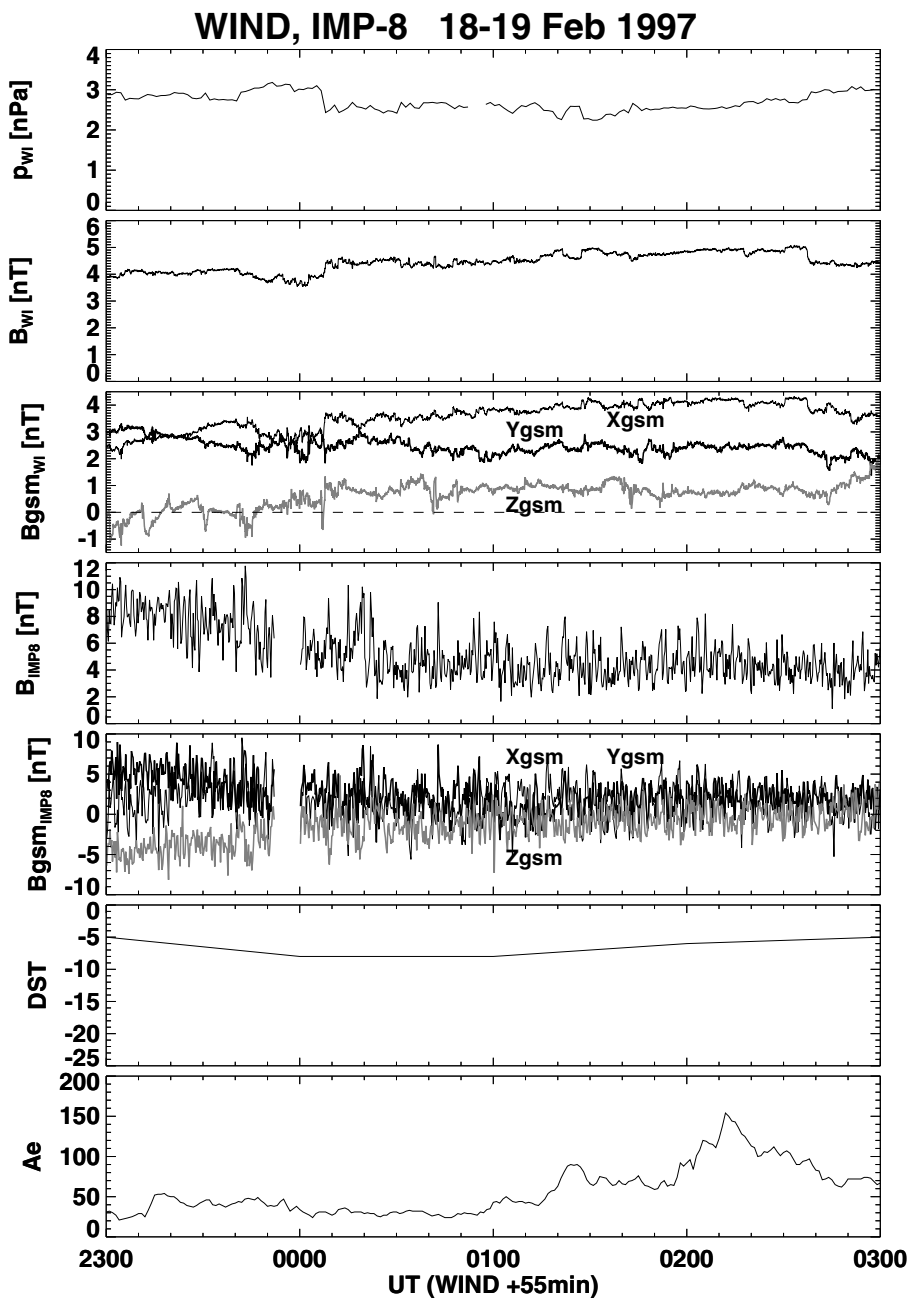
Lépe tuto skutečnost vystihuje obrázek C.5 (viz barevnou přílohu), ve kterém je barvou znázorněna pravděpodobnost pozorování kaspu v závislosti na lokálním čase (horizontální osa) a velikosti  $B_y$  složky meziplanetárního magnetického pole. V obrázku jasně vidíme, že pro dostatečně velké hodnoty této složky můžeme najít dvě maxima pravděpodobnosti, jedno v ranních a jedno v odpoledních lokálních časech. Poloha těchto maxim se od sebe vzdaluje s rostoucí absolutní hodnotou  $B_y$ . Tento efekt je způsoben současným přepojením siločar v obou polokoulích [3].

## Vícebodová studie konfigurace magnetosféry

Závěr učiněný v předchozí kapitole na základě statistického vyhodnocení pozorování kaspu jedinou družicí je spekulativní a je možno jej potvrdit pouze současným pozorováním v různých místech magnetosféry. Družice na různých drahách mají ovšem různou dobu oběhu, a proto je dostatečné pokrytí interakčního prostoru v zásadě náhodné a můžeme ho zlepšit pouze prodloužením doby pozorování. Družice se ovšem pohybují, a proto musíme také předpokládat, že studovaná oblast se v čase nemění a že pozorované změny jsou důsledkem její prostorové struktury. Vlivem značné proměnlivosti parametrů slunečního větru a velikosti a směru meziplanetárního magnetického pole je tento předpoklad obtížně splnitelný. Přesto se podařilo vybrat dostatečně dlouhý časový interval, ve kterém byly vnější podmínky blízké stabilním, jak je vidět na obrázku 6 pro pozorování 18. – 19. února 1997. Obrázek ukazuje měření ve slunečním větru (družice WIND ve vzdálenosti asi 1,2 milionu kilometrů směrem ke Slunci) a v přechodové oblasti (družice IMP-8 na večerní straně).

Z obrázku vidíme, že hodnoty dynamického tlaku i modulu magnetického pole ve slunečním větru byly po celou dobu pozorování stálé a blízké dlouhodobým středním hodnotám ( $\sim 2$  nPa, resp.  $\sim 5$  nT). Směr meziplanetárního pole se sice v průběhu





Obr. 6. Měření velikosti tlaku slunečního větru ( $p_{wi}$ ), modulu meziplanetárního magnetického pole a jeho složek ( $B_{wi}$ ), ( $B_{gsm_{wi}}$ ) spolu s měřením modulu magnetického pole ( $B_{IMP8}$ ) a jeho složek ( $B_{gsm_{IMP8}}$ ) v přechodové oblasti. Data ze slunečního větru, měřená družicí WIND, jsou v čase posunuta o 55 minut, což respektuje předpokládanou dobu šíření slunečního větru od místa měření k Zemi. Poslední dva panely ukazují hodnoty geomagnetických indexů Dst a Ae.

času pomalu měnil, ale základní orientace (minimální hodnota složky  $B_z$  a srovnatelné hodnoty složek  $B_x$  a  $B_y$ ) zůstávala zachována. Směr magnetického pole, které přichází do kontaktu s magnetopauzou, je ovšem ovlivněn přítomností rázové vlny. Jak ale vidíme z měření družice IMP-8 v přechodové oblasti, základní orientace, které dominují složky  $B_x$  a  $B_y$ , zůstala zachována. Vysokofrekvenční fluktuace magnetického pole, které moduluji jeho střední hodnotu, jsou pro přechodovou oblast typické a nemají podstatný vliv na strukturu magnetosféry. Poslední dva panely ukazují vývoj geomagnetických indexů. Tyto indexy ukazují velikost odchylky zemského magnetického pole od klidového stavu v oblasti rovníku (Dst) a v polárních oblastech (AE). Geomagnetické pole je považováno za porušené, pokud absolutní hodnota Dst indexu přesáhne 50 nT a hodnota AE indexu 200 nT.

Obrázek 6 tedy ukazuje, že podmínky ve slunečním větru, přechodové oblasti a vnitřní magnetosféře byly stabilní. Můžeme tedy očekávat, že družice budou po tuto dobu procházet oblastmi, které se v čase příliš nemění a pozorované variace bude možno připsat prostorové struktuře. Protože se zajímáme o oblast kaspu, budou pro nás základem měření družic mezinárodního projektu INTERBALL, tj. ruské družice INTERBALL-1 a české družice MAGION-4. Tyto družice se pohybovaly po stejné dráze s časovým odstupem asi 80 minut, a jak vidíme z obrázku C.7 (viz barevnou přílohu), sondařily oblast kaspu od vzdálenosti  $\sim 5 R_E$ . Po průchodu magnetopauzou, který je na obrázku označen černým bodem, obě družice měřily parametry přechodové oblasti přiléhající ke kaspu. V obrázku naznačené siločáry byly převzaty z již zmíněného magnetosférického modelu [2]. Krátké čárky podél dráhy družice ukazují hodnoty měřených složek magnetického pole. Vidíme, že v oblasti kaspu je směr měřeného i modelového pole obdobný, ale po průchodu magnetopauzou se směry výrazně liší. To je přirozené, protože model nemůže popisovat směr pole v přechodové oblasti.

Vybraná měření parametrů plazmatu družicí INTERBALL-1 jsou na obrázku C.8 v levé části (viz barevnou přílohu). Kasp od přechodové oblasti nejsnáze rozlišíme v horním panelu ukazujícím průběh iontového toku ( $f_{VDP}$ ). Tento tok je v kaspu téměř nulový, neboť plazma zde má malou rychlost a postupně narůstá po přechodu magnetopauzy (to je v čase 01:07 UT) na hodnotu odpovídající neporušené přechodové oblasti (od 01:50 UT). Na dalších dvou panelech vidíme, že v kaspu můžeme odlišit další oblasti. Zhruba do půlnoci magnetické pole rychle klesá až k hodnotě odpovídající hodnotám obvyklým v přechodové oblasti ( $\sim 10$  nT) a nemá výrazné vysokofrekvenční fluktuace. Oblast, kterou družice procházela mezi 00:00 UT a 01:07 UT, je nazývána *turbulentní hraniční vrstvou* (outer or exterior cusp) a je součástí vnějšího kaspu. Přechod magnetopauzy není možno za těchto podmínek v magnetických měřeních identifikovat.

Následující dva panely zobrazují měření toku nadteplných iontů pro tři energie. Těchto iontů je sice velmi málo a jejich přítomnost nemůže ovlivnit strukturu pozorované oblasti, ale právě proto můžeme z jejich pozorování odvodit důležité informace. Vidíme, že ve vlastním kaspu intenzita toku vysokoenergetických iontů všech sledovaných energií postupně narůstá s časem (a tedy se vzdáleností od Země). To nám říká, že zdroj je třeba hledat ve větších vzdálenostech od Země, a vyvrací hypotézu, že zdrojem by mohla být některá z magnetosférických oblastí, např. plazmová vrstva. Dále od

Země, v turbulentní hraniční vrstvě, je tok nadteplných iontů prakticky konstantní. Za zmínku stojí, že jejich rozdělovací funkce se s časem stává „tvrdší“, tj. zvyšuje se podíl vysokých energií. Je to patrné zejména po průchodu magnetopauzou, i když vlastní přechod magnetopauzy se na tocích nadteplných iontů výrazněji neprojevil. Velmi výrazná změna v toku iontů nastala naopak v 01:50 UT. Tok iontů měřený ve směru ke Slunci (směr osy  $X_{\text{GSM}}$ ) poklesl o více než jeden řád a ve směru kolmém se objevila pravidelná modulace s periodou rotace družice (2 minuty). To znamená, že rozdělení rychlostí přestalo být izotropní a ionty mají nyní jeden výrazný směr. Maximum toku je měřeno v okamžiku, kdy osa detektoru je nejbližší k tomuto směru, což se opakuje jednou za otáčku družice. Je však třeba poznamenat, že jsme se v popisu dat věnovali pouze celkovému trendu a ignorovali jsme veškeré fluktuační. Tyto fluktuační jsou vyvolány fluktuačními směry magnetického pole, které řídí pohyb nadteplných částic a nemají pro naše globální pozorování podstatný význam.

Nejúplnější informaci o vlastnostech plazmatu přináší energetické rozdělovací funkce jeho jednotlivých složek, tj. buď elektronů, nebo iontů. Jejich jednorozměrné řezy, tzv. dynamická spektra, jsou prezentovány v posledních třech panelech. Na svislé ose je vždy vynesena energie  $E$  a barvou je kódován počet částic zaregistrovaných v energetickém intervalu  $(E \pm \Delta E)$  za jednotku času. Protože z principu měření elektrostatickými analyzátory vyplývá, že  $\Delta E$  je úměrné  $E$ , znázorňuje barevné kódování zároveň diferenciální tok energie. Panely  $E_{\text{C}30}$  a  $E_{\text{C}150}$  ukazují dynamická spektra iontů směřujících (v prvním přiblížení) od Slunce ( $E_{\text{C}30}$ ) a ke Slunci ( $E_{\text{C}150}$ ). Vidíme, že ve vlastním kaspu a turbulentní hraniční vrstvě převládá mírně tok iontů směrem ke Slunci, ale v přechodové oblasti výrazně dominuje tok směrem od Slunce. Na charakteru dynamických spekter vidíme jasnou změnu při přechodu z kaspu do turbulentní hraniční vrstvy ( $\sim 00:00$  UT) i vlastní přechod magnetopauzy (01:07 UT), ale přechod poslední hranice, kterou jsme identifikovali v měření nadteplných iontů ( $\sim 01:50$  UT), není možno odhalit bez další podrobné analýzy.

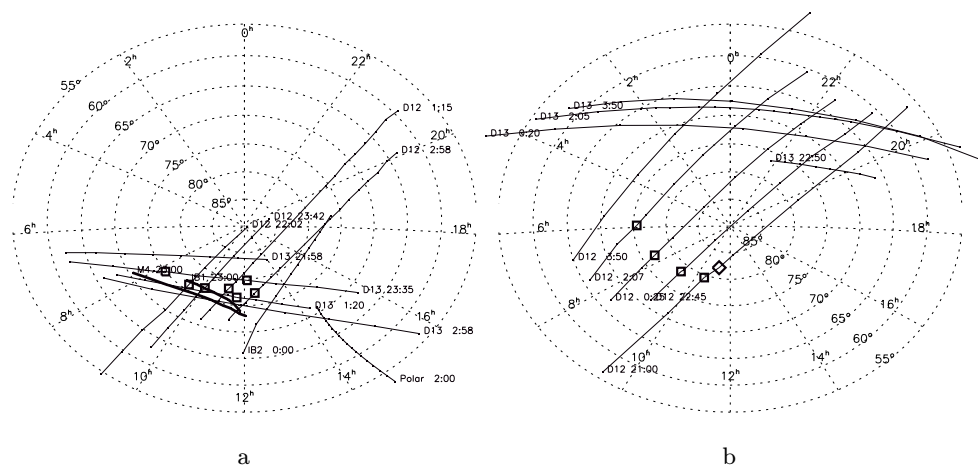
Oba iontové panely vykazují periodickou modulaci danou rotací družice. Tato modulace naopak prakticky zcela chybí v posledním panelu ( $E_{\text{eo}}$ ) představujícím dynamická spektra elektronů, protože elektronová rozdělovací funkce je díky vysokým tepelným rychlostem prakticky symetrická.

Stabilitu celého systému kasp–přechodová oblast můžeme posoudit z porovnání levé části s pravou částí v obrázku C.8, která zobrazuje obdobné parametry plazmatu, avšak měřené družicí MAGION-4. Družice série MAGION byly ovšem velmi malé a počet měřených parametrů i měřicí rozsahy byly proto velmi limitované. Jak jsme již poznamenali, družice MAGION-4 se pohybovala po stejné dráze jako družice INTERBALL-1 se zpožděním asi 80 minut, a pokud je splněn náš předpoklad o stabilitě celého interakčního prostoru, měla by procházet stejnými oblastmi o 80 minut později. Za 80 minut se ovšem Země a s ní i celá magnetosféra vůči družici pootočí o  $20^\circ$ , a proto je třeba bez detailní analýzy brát časování s jistotou rezervou. Nicméně můžeme v datech jasně identifikovat v 02:24 UT přechod magnetopauzy, charakterizovaný opět prudkým nárůstem iontového toku, i vstup do turbulentní hraniční vrstvy okolo 01:00 UT. Změna charakteru iontového toku na magnetopauze je v dynamických

spektrech MAGIONu mnohem výraznější než v měření INTERBALLu v levé části obrázku, protože směrové charakteristiky detektorů na MAGIONu byly mnohem užší.

Doposud prezentovaná měření ukazují, že obě družice se nacházely po několik hodin v oblasti kaspu. Protože jím procházely víceméně vertikálně (obr. C.7), není z těchto měření možno udělat závěr o celkové lokalizaci kaspu a je nutno použít měření dalších družic. Aby se článek nezměnil v tlustou knihu, budeme prezentovat pouze projekci podél magnetických siločar.

Projekce drah všech družic, jejichž data byla v dané době k dispozici<sup>4</sup>), je na obrázku 9. K projekci byl opět použit magnetosférický model [2]. Obrázek 9a ukazuje projekci v severní polokouli. Na drahách jednotlivých družic je vyznačena čtverečkem oblast, ve které byl pozorován kasp. Výjimku tvoří družice MAGION-4 a INTERBALL-1, které pozorovaly kasp podél celého projektovaného úseku dráhy. Z obrázku je vidět, že ačkoliv se obvykle předpokládá, že kasp je symetrický kolem lokálního poledne, je v tomto případě zřetelně posunut směrem k ranním lokálním časům, kdežto v odpoledních lokálních časech ho žádná z družic nepozorovala.



Obr. 9. Projekce drah jednotlivých družic podél magnetických siločar na povrch Země. Komentáře u jednotlivých drah zobrazují vždy název družice a čas měření. Čtverečky na nich pak místo, kde byl pozorován kasp (a – projekce ze severní polokoule směrem k severnímu pólu, b – projekce z jižní polokoule směrem k jižnímu pólu).

Jak jsme se již zmínili, posuv kaspu byl na základě statistických vyhodnocení dat z družic na nízkých oběžných drahách pozorován již dříve, ale vzhledem k tomu, že v našem případě magnetické pole v přechodové oblasti (obr. C.8) má dominující kladnou složku  $B_y$ , měl by se kasp posunout na druhou stranu, tj. na stranu odpolední!

Obdobná mapa jižních polárních oblastí (obrázek 9b) ukazuje, že na jižní polokouli byl kasp pozorován také v ranních lokálních časech, tedy zcela ve shodě se současnými

<sup>4</sup>) Použili jsme 3 družice projektu INTERBALL, americké družice POLAR a DMSP 12 a 13, které se všechny pohybovaly v polární magnetosféře.

představami. V odpoledních lokálních časech bohužel chybí měření v příslušných geomagnetických latitudách.

Vysvětlení celého procesu formování kaspu je možno nalézt na obrázku C.10 (viz barevnou přílohu). Tenkými čarami jsou znázorněny ty siločáry, které vytvářejí povrch magnetopauzy. Žlutě jsou vyznačeny siločáry meziplanetárního magnetického pole. Ty jsou přímkové ve slunečním větru, ale deformované za rázovou vlnou (tučná černá čárkovaná čára) vlivem obtékání magnetopauzy. Tato deformace vede k tomu, že v oblasti kaspu má meziplanetární pole směr osy  $+Y$ . V místě styku tohoto pole se siločarami magnetopauzy orientovanými antiparalelně může dojít k vzájemnému propojení magnetických siločar obou polí a podél propojených siločar pak může plazma přechodové oblasti pronikat do kaspu. Siločáry magnetopauzy, které v některém bodě směřují opačně než meziplanetární magnetické pole, jsou pro názornost zvýrazněny modře, místa antiparalelní orientace obou polí jsou označena zelenými kroužky. Vidíme, že bod, kde plazma může volně pronikat k Zemi, je na severní polokouli v oblasti odpolední (kladná souřadnice  $Y$ ), kdežto na jižní polokouli tento bod leží v oblasti ranní (souřadnice  $Y$  je záporná). Z těchto důvodů jsme pozorovali plazma kaspu na jižní polokouli v ranních lokálních časech. Pokud by zdrojem plazmatu pozorovaného na severní polokouli byl analogický proces, byl by kasp pozorován v odpoledních časech. Jediným možným zdrojem plazmatu pozorovaného na severní polokouli je tedy propojení magnetických polí na jižní polokouli. Na severní polokouli je ovšem situace zdánlivě zcela symetrická, ale plazma kaspu tam pozorováno nebylo. Nabízejí se dvě možná vysvětlení. Buď k propojování polí z nějakého důvodu nedochází, nebo dochází, ale v tom případě není tento proces zdrojem plazmatu, které by mohlo být pozorováno uvnitř magnetosféry.

Rozhodnout mezi těmito dvěma možnostmi nám umožní měření částic vysokých energií (obr. C.8, 4. a 5. panel). Zdrojem těchto částic jsou procesy na rázové vlně. Analýza měření v přechodové oblasti ukazuje, že částice přicházejí ke kaspu z odpolední strany (vyšrafovaná oblast) a po propojení polí jsou uzavřeny v turbulentní hraniční vrstvě, kde jsou vlivem interakce s fluktuacemi magnetického pole termalizovány a jejich rozdělení je izotropní s úzkým únikovým kuželem. INTERBALL-1 je ovšem pozoruje s téměř nezmenšenou intenzitou i v oblasti nad magnetopauzou. Zdrojem těchto částic je propojení magnetických polí na severní polokouli a částice k INTERBALLu přicházejí podél propojených siločar, naznačených v obrázku C.10 zelenou čarou.

Můžeme tedy udělat závěr, že k propojení polí dochází, ale toto propojení neumožňuje plazmatu přechodové oblasti na severní polokouli proniknout do magnetosféry. Příčinou severo-jížní nesymetrie je v tomto případě sklon magnetického dipólu vzhledem k toku slunečního větru. Rychlost toku plazmatu v přechodové oblasti je totiž nejnižší v blízkosti subsolárního bodu a postupně narůstá směrem do chvostu a v oblasti nad kaspem se blíží rychlosti zvuku. Poloha kaspu se ovšem vzhledem k subsolárnímu bodu během roku mění vlivem rotace Země, oběhu Země kolem Slunce a sklonu magnetického dipólu vzhledem k rovině ekliptiky. V únoru, kdy byla popisovaná měření prováděna, byl jižní pól nakloněn směrem ke Slunci a jižní kasp se nacházel blíže subsolárnímu bodu, a proto rychlost plazmatu nad ním byla podstatně

menší než nad severním kaspem. Rozbor měření ukazuje, že nad severním kaspem byla tato rychlost  $\sim 250$  km/s při rychlosti zvuku okolo 100 km/s. Proces přepojení polí plazma sice urychluje, ale nemůže mu ve směru pole udělit rychlost větší, než je rychlost zvuku. Tato rychlost se skládá s původní rychlostí plazmatu, ale výsledná rychlost nemůže na severní polokouli směřovat k Zemi, a proto k pronikání plazmatu nedochází.

## Závěr

V tomto krátkém příspěvku jsme se pokusili čtenářům přiblížit metodiku používanou při současném výzkumu magnetosféry. Úmyslně jsme vybrali případ, který demonstruje význam českých družic série MAGION. Tyto družice byly sice malé (50 kg oproti běžným několika tunám u velkých družic), ale data z nich získaná mají stejnou váhu jako měření na jiných objektech. Přináší nové poznatky nejen samy o sobě, ale jejich význam vyniká zejména v kombinaci s pozorováním dalších družic.

K problémům, k jejichž vyřešení družice MAGION podstatně přispěly, patří například stanovení závislosti polohy kaspu na sklonu geomagnetického dipólu, zpřesnění predikce polohy rázové vlny a magnetopauzy nebo popis vytváření struktury hraničních vrstev. I z měření ukázaných v tomto článku plyne řada dalších důležitých závěrů, které jsme nemohli pro stručnost prezentovat.

Závěrem lze říci, že výzkum magnetosféry Země se bude jistě ubírat naznačeným směrem, tj. analýzou vícebodových měření doplněných numerickými simulacemi, které budou využívány ve stále větší míře. Tomuto trendu nasvědčuje nejen právě probíhající projekt CLUSTER, ale i další plánované/připravované projekty.

**Poděkování.** Děkujeme kolegům LUBOMÍRU PŘECHOVI, JIŘÍMU ŠIMŮNKOVI a JIŘÍMU PAVLŮ za připomínky k textu a přípravu obrázků.

## L i t e r a t u r a

- [1] NEWELL, P. T., MENG, C.-I.: *The cusp and the cleft/boundary layer: Low-altitude identification and statistical local time variation*. J. Geophys. Res. 93 (1988), 14549–14556.
- [2] TSYGANENKO, N. A., STERN, D. P.: *A new-generation global magnetosphere field model based on spacecraft magnetometer data*. ISTP Newsletter 6/1 (1996), 21.
- [3] MĚRKA, J., ŠAFRÁNKOVÁ, J., NĚMEČEK, Z.: *Cusp-like plasma in high altitudes: a statistical study of the width and location of the cusp from Magion-4*. Annales Geophysicae 20 (2002), 311–320.