

VZROKI ZA CURKE PLAZME V ZEMLJINEM MAGNETNEM OVOJU

PRIMOŽ KAJDIČ

Geofizikalni Inštitut, UNAM, Oddelek za vesoljske znanosti, Mehika.
E-pošta: kajdic@gmail.com

Sprejeto
8. 9. 2022

Izdano
18. 8. 2023

DOPISNI AVTOR
kajdic@gmail.com

Povzetek Curki plazme v Zemljinem magnetnem ovoju so trenutno pomembna tema na področju veje znanosti, ki se ukvarja s procesi interakcije Zemlje in Sonca. Ti curki lahko popačijo magnetopavzo, zato nam poznavanje pogojev, pod katerimi nastajajo, omogoča razumevanje njihovega vpliva na magnetosfero. Trenutno prevladuje mnenje, da 97 % curkov nastane kot posledica nagubanega površja sekcije Zemljinega udarnega vala s kvazi-vzporedno geometrijo. Nedavno izvedene obsežne statistične študije teh curkov so pokazale njihov obstoj tudi dolvodno od kvazi-pravokotne sekcije Zemljinega udarnega vala, vendar zeankrat še ni jasno kateri mehanizmi vodijo k njihovemu nastanku. Tukaj analiziram štiri dogodke v kvazi-pravokotnem magnetnem ovoju, ki izpolnjujejo enega glavnih kriterijev za curke plazme in sicer povečani dinamični tlak. Ti curki niso nastali zaradi nagubanega površja udarnega vala, temveč so jih povzročili: 1) cev magnetnega pretoka v stiku s kvazi-paralelno sekcijo udarnega vala, 2) tokovna plast v odsotnosti magnetnega prevezovanja 3) izpuh povezan z magnetnin prevezovanjem in 4) zrcalni valovi.

Ključne besede:

curki plazme,
cevi magnetnega
pretoka,
tokovna plast,
magnetno prevezovanje,
zrcalni valovi



1 Uvod

Interakcija Sončevega vetra (SV) z magnetosfero našega planeta povzroči, da gorvodno od Zemlje nastane superkritični (Tremann, 2009) udarni val (npr. Tsurutani & Stone, 1985). Glede na kot, ki ga tvorita lokalna normala na površje udarnega vala in gorvodno medplanetarno magnetno polje (MMP), θ_{BN} , lahko udarni val razdelimo na kvazi-vzporeden (»quasi-parallel«, Q_{par} , $\theta_{BN} < 45^\circ$) ali kvazi-pravokoten (»quasi-perpendicular«, Q_{per} , $\theta_{BN} > 45^\circ$). Gorvodno od Q_{par} udarnega vala nastane predudar (»foreshock«, Eastwood et al., 2005), zaradi česar je tam njegova površina nagubana in sicer na prostorskih skalah $\leq 100 d_i$, kjer je d_i inercijska dolžina ionov gorvodno od udarnega vala (glej npr. Burgess, 1989b; Krauss-Varban & Omidi, 1991).

Dolvodno od Zemljinega udarnega vala leži magnetni ovoj (npr. Luček et al., 2005), ki ga prav tako lahko razdelimo na Q_{per} in Q_{par} , glede na sekcijo udarnega vala, dolvodno od kater se nahaja (Raptis et al, 2020a). Sekciji magnetnega ovoja se razlikujeta v tem, da v Q_{par} magnetnem ovoju najdemo močnejše fluktuacije magnetnega polja polji in plazme ter ione z višjimi energijami in sicer do ~ 30 keV.

V magnetnem ovoju najdemo tudi curke plazme (Plaschke et al., 2018). Hietala et al. (2009) so predlagali, da ti curki nastanejo zaradi različnega procesiranja SVja na različnih lokacijah Q_{par} udarnega vala, kar je posledica gubanja njegovega površja. Hietala et al. (2013) so ocenili, da je nagubano površje vzrok za nastanek 97 % vseh curkov. Po drugi strani so Archer et al. (2012) predlagali, da curki nastanejo zaradi interakcije Zemljinega udarnega vala z rotacijskimi nezveznostmi MMPja, medtem ko je Savin et al. (2012) njihov nastanek povezal z anomalijami vročega toka (»Hot Flow Anomalies«, Lucek et al. 2004). Karlsson et al. (2012) so predlagali drugačen mehanizem, po katerem naj bi določeni tip curkov, t.i. plazmoidi, nastali zaradi prečkanja struktur iz predudara imenovanih SLAMS (npr. Giacalone et al. 1993), čez Zemljin udarni val v magnetni ovoj.

V preteklosti je bilo zvedenih veliko študij, v katerih so analizirali lastosti curkov plazme v Zemljinem magnetnem ovoju. Med njimi je bilo več statističnih študij (Plaschke et al. 2013; Plaschke et al., 2016; Archer & Horbury 2013; Raptis et al. 2020a; Raptis et al. 2020B; Liu et al. 2020). Kljub temu vzroki za nastanek curkov plazme še vedno niso zadovoljivo pojasnjeni.

Poznavanje vzrokov za curke plazme v magnetnem ovoju je pomembno, saj je so pretekle študije pokazale, da ti pojavi lahko zmotijo geomagnetno polje. Blanco-Cano et al., (2020) so pokazali, da med drugim curki lahko nastanejo kot posledica magnetnega prevezovanja («magnetic reconnection») v magnetopavzi. Nekateri od teh curkov lahko prispejo do in včasih prodrejo skozi magnetopavzo (Hietala et al., 2018; Wang et al., 2018; Shue et al. 2009; Plaschke et al., 2011; Savin et al., 2012; Dmitriev & Suvorova 2012; Plaschke et al., 2016) ter celo zmotijo ionosfero (Hietala et al. 2012; Archer & Horbury 2013; Wang et al., 2018). Archer & Horbury (2013) so ugotovili, da lahko so curki plazme lahko vzrok kompresijskim in poloidnim valovom Pc5 (2–7~mHz) v magnetosferi. Njihovi podpisi so bili zaznani celo v podatkih zemeljskih magnetnih observatorijev, o čemer so poročali Dmitriev & Suvorova (2012) ter Archer & Horbury (2013).

V tem delu pokažem, da določeni pojavi v Qper magnetnem ovoju lahko povzročijo podpise v podatkih vesoljskih plovil, npr. povečan dinamični tlak P_{dyn} , ki so značilni za curke plazme v magnetnem ovoju. Med temi pojavi so cevi magnetnega pretoka (magnetic flux tubes), ki se nahajajo v Qper magnetnem ovoju, vendar so povezane s Qpar sekcijo Zemljinega udarnega vala, tokovne plasti v odsotnosyi magnetnega prevezovanja, izpuhi povezani z magnetnim prevezovanjem ter zrcalni valovi (mirror mode waves, MM).

2 Podatki in inštrumenti

Poslužujem se opazovalnih podatkov treh vesoljskih misij, od katerih vsaka sestoji iz treh ali štirih identičnih sodnd: Cluster (Escoubet et al., 1997), THEMIS (Angelopoulos et al., 2008) in Magnetospheric Multiscale Mission (MMS, Sharma et al., 2005). Sonde Cluster imajo več instrumentov, vključno z magnetometrom FGM (Balogh et al., 2001) in spektrometrom CIS (Reme et al., 2001). Tukaj sem uporabil meritve vektorja magnetnega polja ter momente plazme s časovno ločljivostjo 0,2 s oziroma 4 s. Podatki misije THEMIS, uporabljeni v tem delu, so bili pridobljeni z magnetometrom FGM (Auster et al., 2008) in ionski elektrostatičnim analizatorjem iESA (Mcfadden et al. 2008) z ločljivostjo 0,25~s in 3~s.

Uporabil sem tudi meritve magnetnega polja misije MMS s časovno ločljivostjo 1/128 s in 1/16 s. Podatke o ionih zagotavlja inštrument FPI (Pollock et al., 2016), imajo pa časovno ločljivost 150 ms oziroma 4 s.

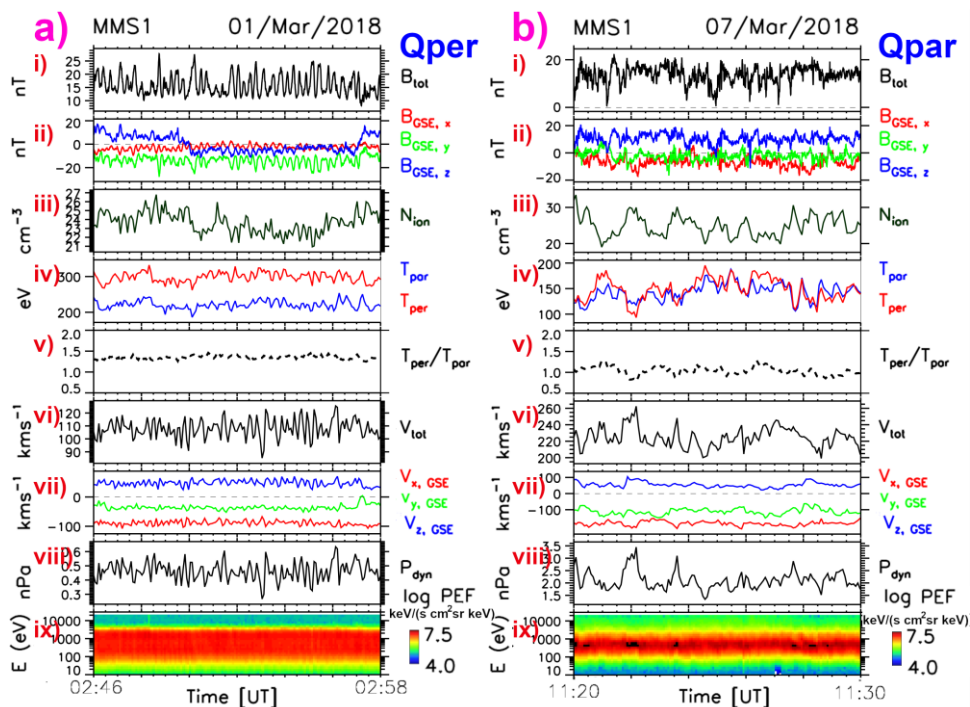
3 Meritve

V tej sekciji prikažem dogodke, ki so bili izbani zaradi znatno povečanega P_{dyn} v Q_{per} magnetnem ovoju. Ti dogodki izpolnjujejo vsaj nekatera merila, opisana v pretekli literaturi. Na primer, izbrali smo jih, če so povzročili povečanje P_{dyn} za $\geq 50\%$ v primerjavi s povprečjem v 10 minutnem časovnem intervalu centriranem na samih dogodkih, tako kot v Gutynska et al. (2015). Dva dogodka, potujoča cev magnetnega pretoka in tokovna plast (»current sheet«), izpolnjujeta merila uporabljena v Archer et al. (2012), da mora P_{dyn} preseči prag 1 nPa. Zrcalni valovi so presegli prag opisan v Karlsson et al. (2012), da mora biti gostota plazme znotraj 50 % višja v primerjavi z okoliškimi vrednostmi.

3.1 Cevi magnetnega pretoka v stiku s Q_{par} udarnim valom

Najprej razjasnimo, kaj pomenita izraza Q_{par} in Q_{per} v primeru magnetnega ovoja. Slika 1 prikazuje meritve sonde MMS1 med dvema časovnima intervaloma, 1. marca 2018 (a) in 7. marca 2018 (b). Paneli i) do ix) prikazujejo: jakost magnetnega polja in njegove komponente v enotah nT ter v koordinatah GSE (os X kaže od Zemlje proti Soncu, os Y leži v ravnini ekliptike in kaže v smeri proti večeru, os Z dopolnjuje desnoročni sistem), gostoto ionov (v enotah cm^{-3}), vzporedno (T_{par}) in pravokotno (T_{per}) temperaturo (eV), temperaturno anizotropijo, definirano kot $T_{\text{per}}/T_{\text{par}}$, hitrost ionov in njene komponente v koordinatah GSE (kms^{-1}), dinamični tlak (nPa) in ionski spektrogram z barvami, ki predstavljajo logaritem energijskega pretoka delcev (PEF) v enotah $\text{keV}/(\text{s cm}^2 \text{sr keV})$.

Ključni paneli so tisti, oštevilčene z rimskimi številkami iv), v) in ix). V primeru Q_{per} magnetnega ovoja (slika 1a) je T_{per} (rdeča krivulja) večja od T_{par} (modra). Tako ima $T_{\text{per}}/T_{\text{par}}$ vrednosti večje od 1. Zaradi velike T_{per} je rdeča sled SVja v ionskem spektrogramu na panelu ix zelo široka. Zelo malo ionov ima energije nad 2500 eV. Te panele lahko primerjamo s tistimi na sliki 1b, ki prikazuje Q_{par} magnetni ovoj. Zdaj imata T_{par} in T_{per} zelo podobne vrednosti, kar pomeni, da je temperaturna anizotropija $T_{\text{per}}/T_{\text{par}} \sim 1$. Ker sta ti temperaturi nižji od T_{per} v Q_{per} magnetnem ovoju, je rdeča sled na panelu ix) zdaj ožja, intenzivnost PEF pri energijah nad 2500 eV pa je veliko višja.



Slika 1: Qper (a) in Qpar (b) magnetni ovoj v podatkih sonde MMS1. Paneli prikazujejo: i) jakost magnetnega polja, ii) komponente magnetnega polja v koordinatnem sistemu GSE, iii) številčno gostoto ionov, iv) vzporedno (modra krivulja) in pravokotno (rdeča) temperaturo ionov, v) temperaturno anizotropijo, vi) hitrost ionov, vii) komponente hitrosti ionov v sistemu GSE, viii) dinamični tlak in ix) ionski spektrogram.

Vir: lasten

Usmerimo zdaj pozornost na sliko 2a). Format te slike je praktično enak formatu slike 1. Skozi večino prikazanega časovnega intervala se je sonda Cluster-3 nahajala v Qper magnetnem ovoju. Obstaja pa kratko časovno obdobje med 21:20:30-21:21:45 UT, ko lahko opazimo ione z $E \leq 30$ keV. V tem času se vrednosti jakosti magnetnega polja B_{tot} , ionske gostote N_{ion} , $T_{\text{per}}/T_{\text{par}}$ ter hitrosti V_{tot} zmanjšajo, medtem ko T_{par} in T_{per} narasteta. Te lastnosti so zelo podobne tistim, ki jih opazimo v Qpar magnetnem ovoju.

Izpostavljeni interval je omejen z roboma, kjer so vrednosti B_{tot} , N_{ion} in V_{tot} okrepljene, temperatura pa je znižana. V gorvodnem robu se smer magnetnega polja spreminja v času 4 s, kar sovпада s približnim trajanjem tega roba v podatkih B_{tot} .

Rotacija magnetnega polja v dolvodnem robu je veliko daljša in traja ~ 30 s. Med tema rotacijama se pojavijo (gorvodni rob) ali izginejo (dolvodni rob) ioni z visokimi energijami. Vidimo lahko tudi, da so vrednosti P_{dyn} v dolvodnem robu močno povišane, saj dosežejo 2,9 nPa, kar predstavlja 107 % povečanje v primerjavi z povprečno okoljno vrednostjo 1,4 nPa.

Ta struktura je bila ponešena mimo vesoljskega plovila Cluster. To se lahko vidi na sliki 2b), ki prikazuje profile B_{tot} vseh štirih sond Cluster. Prva sonda, ki je zaznala strukturo, je bila C3, sledile pa so C2, C4 in C1. Ta vrstni red je enak vrstnemu redu, v katerem se njihove X_{GSE} koordinate zmanjšujejo (slika 3c).

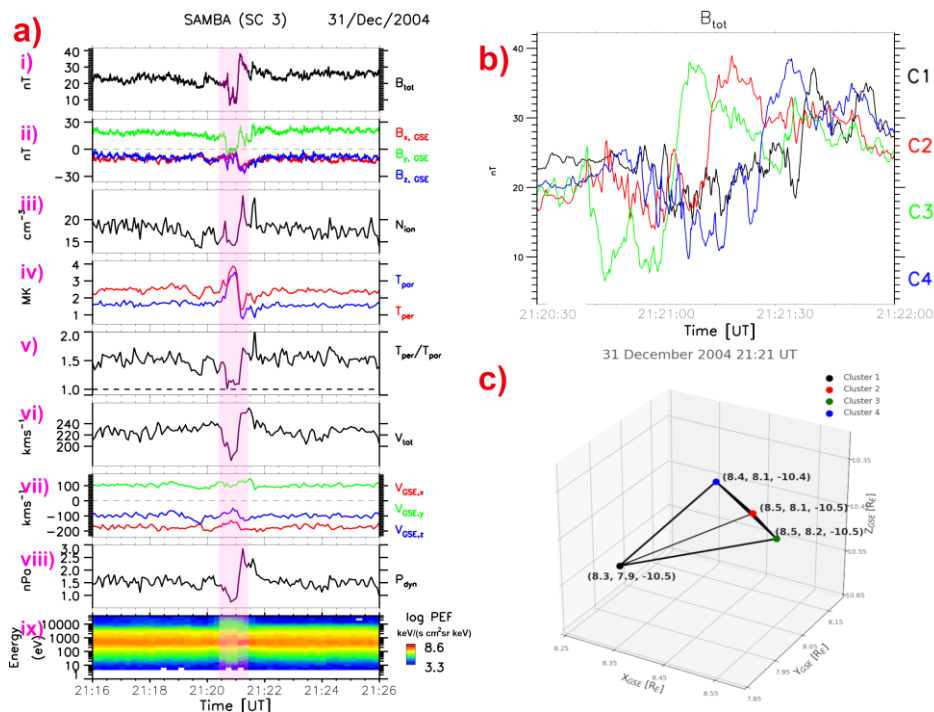
Ta struktura se razlikuje od "tipičnih" curkov, ki jih najdemo v Qpar magnetnem ovoju. Tukaj trdimo, da so podpisi, prikazani na sliki 2, posledica cevi magnetnega pretoka, ki je bila konvektirana mimo sond Cluster. Ta cev je imela majhen prečni radij ali pa je bila široka in jo je vesoljsko plovilo prečkalo blizu njenega roba.

Podobni pojavi so bili v preteklosti opaženi gorvodno od Qper sekcije Zemljinega udarnega vala. Tam se pogosto pojavljajo t.i. votline («cavities», Sibeck et al., 2002; Billingham et al., 2008), ki jih obdaja neokrnjen SV, vendar so lastnosti MMPja in plazme v njih enake tistim, ki jih običajno najdemo v Zemljinem predударu. V primerjavi s svojo okolico sta v votlinah gostota plazme ter jakost magnetnega polja manjši, medtem ko ti količini narasteta v robovih, ki obdajajo votline. Znotraj votlin se močno poveča tok supertermičnih ionov. Omidji et al. (2013) in Kajdič et al. (2017b) so pokazali, da so votline podrazred potujočih predударov, ki v podatkih vesoljskih plovil trajajo le nekaj minut. Predlagano je bilo, da le-te nastanejo zaradi cevi magnetnega pretoka MMPja, ki jih zaznamo gorvodno od Qper Zemljinega udarnega vala, vendar so povezane z Qpar odsekom tega udarnega vala.

Razlog, zakaj vemo, da je opazovani dogodek povzročila magnetna pretočna cev in ne premikanje meje med Qper in Qpar magnetnim ovojem, je v tem, da cevi magnetnega pretoka MMPja v podatkih vesoljskih misij puščajo tako imenovane konveksijske podpise, medtem ko premikanje omenjene meje ustvarja ugnezdene podpise (glej Kajdič et al. 2017).

Na sliki 2b) lahko vidimo, da je zaporedje, v katerem vesoljska plovila Cluster vstopijo v cev magnetnega pretoka, enako zaporedju, v katerem izstopijo iz nje. Če bi vesoljsko plovilo opazovalo gibanje meje med Qper in Qpar magnetnim ovojem,

bi sonde Cluster vstopile v Qpar magnetni ovoj v določenem zaporedju, vendar bi bilo zaporedje, v katerem bi iz njega izstopile, obrnjeno.

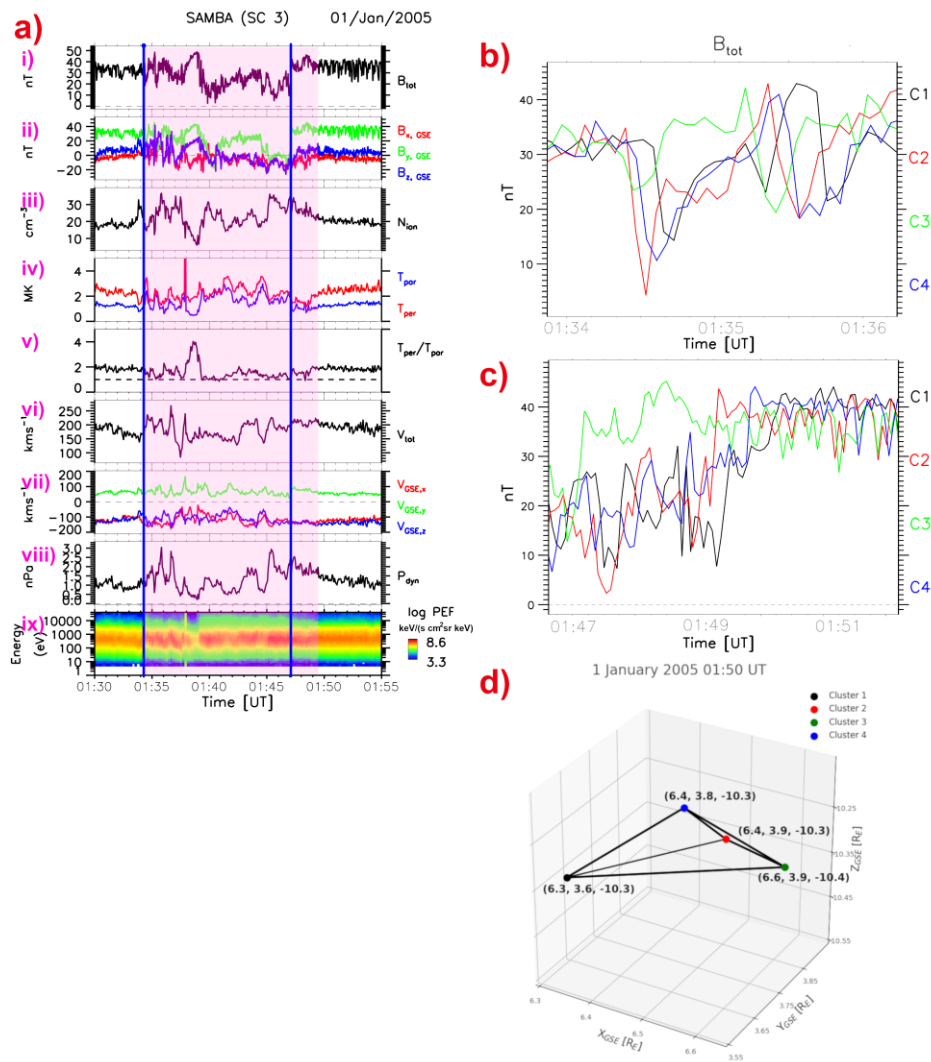


Slika 2: a) Podatki sonde Cluster 3 opazovanja. Format je enak kot na sliki 1a). b) Jakost magnetnega polja med intervalom, ki je osenčen na panelu a). Prikazane so meritve vseh štirih sond Cluster. c) Konfiguracija skupka Cluster 31. decembra 2004.

Vir: lasten

Poglejmo kako je videti v podatkih prehod dolgotrajnejše pretočne cevi. Tak dogodek je prikazan na sliki 3. Opazimo lahko da se je sonda Cluster 3 pred in po dogodku (osenčeno z vijolično barvo), nahajala v Qper magnetnem ovoju, medtem ko med samim dogodkom MMP in plazma kaže lastnosti, značilne za plazmo v Qpar magnetnem ovoju. Sonda Cluster 3 je dogodek opazovala ~15 minut. Med dogodkom kažejo lastnosti plazme ter MMPja veliko fluktuacij, kar povzroči več maksimumov P_{dyn} (panel viii), ki doseže vrednosti do 3 nPa. Te maksimume lahko smatramo za curke, saj vrednosti P_{dyn} presegajo močno presegajo vrednost 1 nPa v okolišnji plazmi. Osenčeni interval na sliki 3a) omejujeta dve rotacijama MMPja. Za časovno analizo dogodka sem naprej v podatkih magnetnega polja

poiskal dve strukturi, ki sta prepoznavni v podatkih vseh sond Cluster. Ena struktura je bila opažena približno na začetku, druga pa proti koncu osenčenega intervala na Sliki 3a) in sta označeni z modrima črtama. Siki 3b) in 3c) prikazujeta obse strukturi od blizu. Črna, rdeča, zelena in modra krivulja prikazujejo podatke sond Cluster 1, 2, 3 in 4. Vidimo lahko, da je vesoljsko plovilo C3 prvo zaznal obe strukturi, sledile pa so mu Cluster 2, 4 in 1. Ker je ta vrstni red vesoljskega plovila enak za obe strukturi, lahko sklepamo, da je bila tudi ta dogodek mimo sond Cluster ponesel SV s konvekcijo, zato se spet gre za cev magnetnega pretika, ki je v stiku s Qpar udarnim valom.



Slika 3: a) Podatki sonde Cluster 3. Format je enak kot na sliki 1a) . b) in c) Jakost magnetnega polja v strukturah blizu gorvodnega in dolvodnega roba cevi magnetnega pretoka (modri navpični črti na panel a) v podatkih vseh štirih vesoljskih plovil Cluster. d) Konfiguracija misije Cluster 1. januarja 2005.

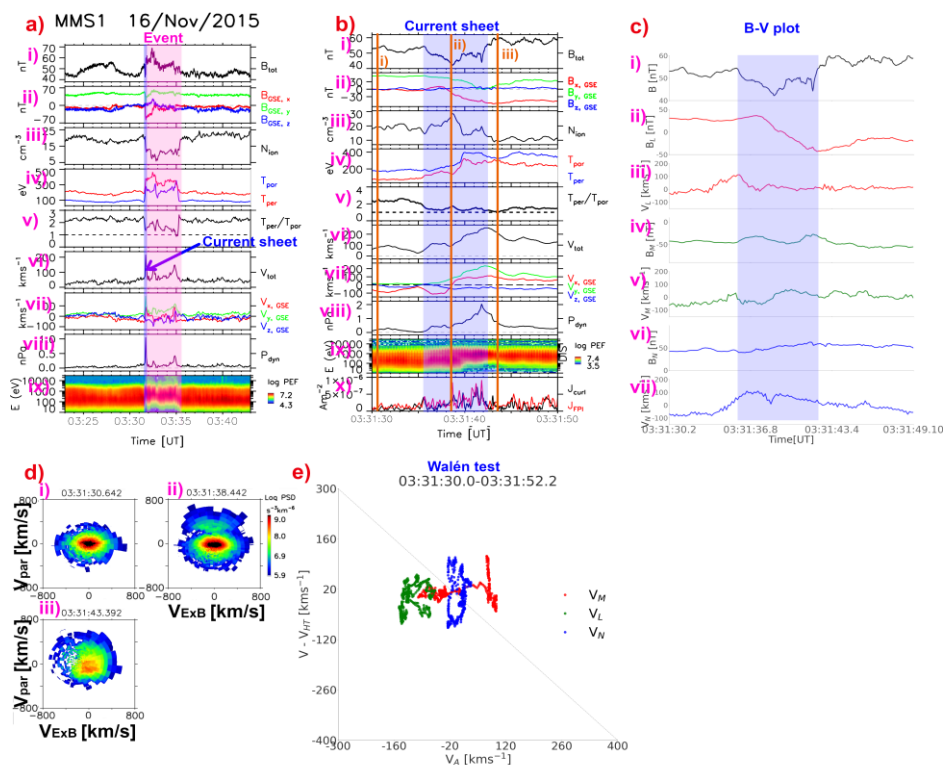
Vir: lasten

3.2 Tokovna plast brez magnetnega prevezovanja

Slika 4a) prikazuje podatke sonde MMS1 v 20-minutnem časovnem intervalu 16. novembra 2015. GSE koordinate vesoljskega plovila so bile (10,5, 0,02, -0,54) R_E (Zemljinih polmerov). Parametri MMPja in plazme kažejo, da je bil v tem času MMS1 v Qper magnetnem ovoju, razen med 03:31:35-03:35:02 UT (osenčeno z vijolično), ko ga je prešla struktura. Ta dogodek bi lahko bil še ena cev magnetnega pretoka, čeprav se razlikuje od prejšnjih primerov, saj je manj turbulenten in je tok energije ionov z $E \leq 30$ keV v njej precej nizek. Druga možnost je, da gre za tako imenovani FTE (»flux transfer event«, Paschmann et al., 1982). Na to kaže povečana jakost magnetnega polja, zmanjšana gostote, povišana temperatura, prisotnost ionov z $E \leq 30$ keV in proti negativne vresnosti Z_{GSE} komponente MMPja (glej Petrinec et al., 2020). Argument proti FTEju je pomanjkanje bipolarnega podpisa MMPja. Taista struktura je podobna tudi curkom plazme, ki nastanejo zaradi magnetnega prevezovanja v magnetopavzi (Blanco-Cano et al., 2020), vendar so ti avtorji pokazali, da v imajo takšnih dogodkih porazdelitve ionov v faznem prostoru dve različni populaciji, kar tukaj ne drži (slika 4c), panel iii). Ker nedvoumna identifikacija dogodka ni mogoča, ga bom imenoval preprosto „struktura“.

Osredotočimo se sedaj na tokovno plast (slika 4a), kjer je viden visok maksimum P_{dyn} (~ 1 nPa) na gorvodnem robu strukture (navpična modra črta). Kratek časovni interval, ki prikazuje podrobnosti tokovne plasti, je prikazan na sliki 4b). Ti podatki imajo boljšo časovno ločljivost in na tej sliki P_{dyn} doseže ~ 2 nPa. Na sliki 4b) obstaja dodaten panel x), ki prikazuje gostoto električnega toka, izračunano z metodo rotometra (»curlometer method«, črna črta) in iz momentov delcev (rdeča barva). Tokovna plast kaže nekatere znake, ki spominjajo na izpuhe magnetnega prevezovanja, kot je padec B_{tot} , povečanje gostote in hitrosti ionov ter rotacije magnetnega polja in vektorja hitrosti. Na sliki 4d), ki prikazuje porazdelitev ionov v faznem prostoru pred, med in po tokovni plasti, vidimo, da sta znotraj plasti prisotni dve populaciji - ena iz zunanjega magnetnega ovoja in druga, ki glede na prvo potuje s hitrostjo > 200 km s⁻¹ in sicer vzdolž magnetnega polja. Čeprav bi se ti ioni lahko pospešili v sami tokovni plasti, pa lahko opazimo, da ioni s podobnimi hitrostmi v referenčnem okviru plazme obstajajo tudi dolvodno od plasti, torej znotraj "strukture" in bi lahko preprosto od tam ušli v tokovno plast. Dokazi proti temu, da je v tokovni plasti prisotno magnetno prevezovanje, so predstavljeni na sliki 4c). Tam je prikazana magnituda MMPja (panel i), ter komponente magnetnega polja in hitrosti plazme (ii-vii) v koordinatah NLM. Ti so bili pridobljeni z analizo minimalne

variance (»minimum variance analysis«, MVA, Ssonnerup, 1998), pri čemer so za vhodne podatke bile uporabljene meritve vektorja magnetnega polja. Prikazana hitrost je delni moment navidezno pospešene komponente v porazdelitveni funkciji ionov, in sicer za delce z energijami med med 210 eV in 3300 eV, katerih vektorji hitrosti z magnetnim poljem oklepajo kot $\leq 45^\circ$. Vidimo lahko, da komponente magnetnega plja in hitrosti ne zadostujejo kriterijem za magnetno prevezovanje, da torej ni zahtevanih (anti)korelacij na robovih tokovne plasti. Poleg tega Walénov test (glej Paschmann, 2000) na sliki 4e) prav tako kaže, da pri tem dogodku ne gre za izpuh zaradi magnetnega prevezovanja.



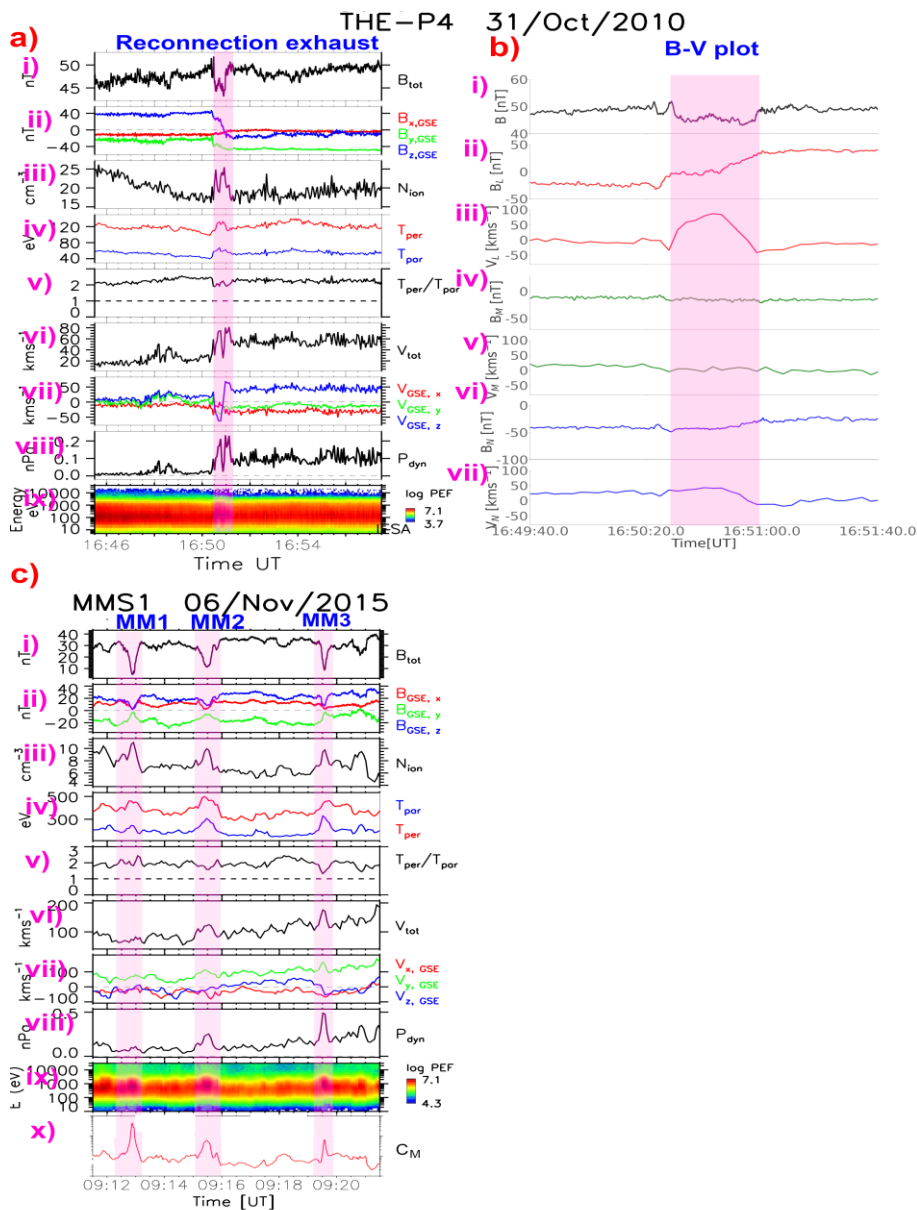
Slika 4: Podatki sonde MMS1. a) Dogodek, ki je povzročil tokovno plast. b) Podroben pregled tokovne cevi. Navpične črte označujejo čase porazdelitve ionov prikazanih na sliki 4d. b) i) Magnituda MMPja, (ii-vii) kponente MMPja in hitrostji plazmev koordinatah N, L, M. d) Porazdelitve ionov v faznem prostoru pred, med in po tokovni plasti. Na osi x (y) je komponenta hitrosti pravokotna (vzporedna) na magnetnopolje. d) Walénov test. Na osi x y je hitrost ionov v deHoffman-Tellerjevem sistemu, na osi x pa je Alfvénova hitrost. Podstki prikazujejo komponente hitrostui v koordinatah LMN (npr. Voros et al., 2017).

Vir: lasten

3.3 Izpuh zaradi magnetnega prevezovanja

Izpuhi zaradi magnetnega prevezovanja so pogost pojav v neokrnjenem SVju (npr. Gosling et al., 2005). V Qpar magnetnem ovoju je magnetno prevezovanje pogosto opaženo, ne pa tudi z njim povezani izpuhi. Temu naj bi botrovalo dejstvo, da se v Qpar magnetnem ovoju ne razvijejo ionski curki, kot je to primer v SVju, kar naj bi bilo posledica močne turbulence v tej regiji (Phan et al., 2018). Po drugi strani je Qper magnetni ovoj veliko manj turbulenten, zato se tam izpuhi lahko pojavijo (npr. Phan et al., 2007; Oieroet et al., 2017; Eastwood et al., 2018). V tej sekciji je prikazan izpuh, ki ga je zaznamoval visok porast vrednosti P_{dyn} .

Ta dogodek se je zgodil 31. oktobra 2010 (slika 5) kot posledica nezveznosti v MMPju. Najden je bil v podatkih vesoljskega plovila THEMIS-E. Dogodek je bil izvorno predstavljen v Oieroet et al. (2017), vendar v drugačnem kontekstu kot tukaj. Med predstavljenim časovnim intervalom se je THEMIS-E nahajalo na (11.0, -11.6, 2.4) R_E v koordinatah GSE. Vektorja MMPja pred in po izpuhu v koordinatah GSE sta bila (-15,2, -25,8, -6,0) R_E oziroma (-1,9, -52,3, 20,5) R_E , kar pomeni, da je kot med njima $\sim 43^\circ$. Dogodek je trajal ~ 32 sekund (osenčeno z vijolično). Na panelu viii) lahko vidimo, da se je med dogodkom močno povišal P_{dyn} . Njegove vrednosti pred, med in po izpuhu so bile 0,01 nPa, 0,23 nPa in 0,1 nPa. Tako je P_{dyn} znotraj izpuha narstel za 2200 % oziroma 130 % glede na vrednosti v gorvodnem in dolvodnem območju. Slika 5b) prikazuje jakost magnetnega polja ter komponente polja ter hitrosti plazme v koordinatah GSE. Opazimo lahko, da so spremembe komponent B in V korelirane na eni strani izpuha in antikorelirane na drugi strani, kot se pričakuje za izpuhe.



Slika 5: a) Podatki sonde THEMIS-E. Prikazan je izpuh zaradi magnetnega prevezovanja (osenčeno v vijolično) 31. oktobra 2010. Format te slike je enaka kot na sliki 1a). b) B-V graf, ki prikazuje i) magnitudo MMPja, (ii-vii) komponente MMPja in hitrosti v koordinatah N, L, M. c) Podatki sonde MMS1 kjer so prikazani zrcani valovi MM1, MM2 in MM3 (osenčeno) 6. novembra 2015.

Vir: lasten

3.4 Zrcalni valovi

Zrcalni načini valovanja je pogosto prisoten v Qper magnetnem ovoju (npr. Dimmock et al., 2015). Glavna značilnost teh valov je antikorelacija jakosti magnetnega plja in gostote plazme. V podatkih se zrcalni valovi lahko pojavljajo v obliki vrhov ali dolin. Magnetne doline zaradi antokorelacije pomenijo vrhove gostote, kar načeloma pomeni porast dinamičnega tlaka.

Tukaj prikazujem opazovalne podatke sonde MMS1 na sliki 5c) med 10 minutnim časovnim intervalom na dan 6. novembra 2015. Takrat se je plovilo MMS1 nahajalo na GSE koordinatah (11,0, 4,7, -0,8) R_E . Na panelu x) je prikazan parameter $C_M = \beta_{i,perp}(T_{i,perp}/(T_{i,para}-1))$ (Genot et al., 2009), kjer je β razmerje med termičnim tlakom izračunanim s $T_{i,perp}$ in magnetnim tlakom. Indeks »i« omeni, da se gre za momente ionov. Vrednosti $C_M > 1$ ($C_M < 1$) označujejo plazmo, ki je zrcalno nestabilna (stabilna). Vidimo, da je plazma, ki obdaja valove MM, zrcalno stabilna, medtem ko znotraj valov MM kaže vrednosti $C_M >> 1$). Zrcalni valovi so zelo stabilne strukture, ki se lahko pojavijo daleč od območja, kjer so dejansko nastali. To je možen vzrok zakaj jih v tem primeru najdemo obdane s plazmo, ki je zrcalno stabilna. Trije dominantni valovi so osenčeni v rožnati barvi in označeni kot MM1, MM2 in MM3. Ta opazovanja so bila izvedena zelo blizu magnetopavze, ki je bila zaznana skoraj takoj po predstavljenem časovnem intervalu (ni prikazano). V podatkih magnetnega polja so trije zrcalni valovi prikazani kot doline, kjer se jakost magnetnega polja zmanjša za med 72 % in 93 % v primerjavi z vrednostmi v okolici. V njih lahko opazimo povečano gostoto in temperaturo. Temperaturna anizotropija je rahlo povečana v primeru MM1. Vrednosti anizotropije v MM2 so podobne tistim v okolici ($\sim 1,8$), v primeru MM3 pa so manjše od okolišnjih vrednosti ($\sim 1,2$).

Hitrost plazme v MM1 je približno enaka kot v okolici, medtem ko je znotraj MM2 in MM3 povečana (za ~ 50 % oz. ~ 116 %). Variacije vrednosti gostote in hitrosti povročijo spremembe dinamičnega tlaka znotraj zrcalnih valov. V primerjavi z njihovo neposredno sosesčino je dinamični tlak MM1 nespremenjen, medtem ko so v MM2 in MM3 njegove vrednosti za ~ 270 % ~ 250 % višje od okolišnjih. Zaradi dejstva, da so vrednosti P_{dyn} v okolici valov najvišje okoli MM3, ta struktura izstopa na panleu viii). Ta dogodek izpolnjuje opazovalne kriterije za tip curkov plazme, imenovanih diamagnetni plazmoidi (Karlsson et al. 2012; Karlsson et al. 2015), katerih glavni značilnosti sta večja gostote plazme in nižja jakost magnetnega polja.

4 Zaključek

V tem delu sem pokazal, da imajo lahko curki plazme v Qper magnetnem ovoju drugačen izvor kot tisti v Qpar magnetnem ovoju. To je posledica dejstva, da površje Qper udarnega vala Zemlje ni nagubano na prostorskih skalah nekaj deset do ~ 100 di, zaradi česar tam ne prihaja do razlik pri procesiranju SVja, ko ta prečkajo udarni val.

Curki v magnetnem ovoju lahko se lahko pojavijo zaradi cevi magnetnega pretoka, ki jih SV ponese v Qper magnetni ovoj, ki pa so povezane s Qpar sekcijo udarnega vala. Znotraj teh cevi so lastnosti MMPja in plazme enake tistim v Qpar magnetnem ovoju. Do povišanj P_{dyn} lahko pride v robovih in/ali v notranjosti teh cevi.

Drugi primer curka plazme je povezan s tokovno cevjo, ki se nahaja na gorvodnem robu strukture, ki bi lahko bila FTE. Znotraj tokovne plasti P_{dyn} naraste na 2 nPa, kar v primerjavi z okoljno vrednostjo 0,5 nPa predstavlja ~ 300 % povečanje. Ker znotraj tokovne plasti ni opaziti dokazov za prisotnost magnetnega prevezovanja, predlagam, da je povišana hitrost dela ionov in posledično in P_{dyn} v njej posledica gradienta in/ali ukrivljenosti magnetnega polja.

Tretji primer curka plazme je povezan z izpuhom zaradi magnetnega prevezovanja. Med tem dogodkom se P_{dyn} poveča za 1200 % oziroma 270 % v primerjavi z vrednostmi v okolju pred in po dogodku.

Zadnji primer curka se zgodi zaradi zrcalnih valov. Predvsem v notranjosti enega takega vala, ki ga je zaznala sonda MMS1, je prišlo do povečanja gostote in hitrosti plazme, zaradi česar je v njem močno narastel P_{dyn} .

Eden od razlogov, zakaj je pomembno preučevati curke plazme v magnetnem ovoju, je ta, da ti pojavi lahko povzročijo motnje geomagnetnega polja, kar so v preteklosti zaznali celo observatoriji na Zemljo (npr. Dmitriev & Suvorova 2012; Archer & Horbury 2013). Različni fizikalni pogoji v medplanetarnem prostoru lahko privedejo do curkov, ki so različnega izvora. Kakšen je vpliv razločnih curkov na geomagnetno polje, bo nedvomno tema bodočih raziskav.

Literatura

- Angelopoulos, V. (2008, December). The THEMIS Mission. *Space Science Reviews*, 141 (1-4), 5-34. doi:10.1007/s11214-008-9336-1
- Archer, M. O., & Horbury, T. S. (2013, February). Magnetosheath dynamic pressure enhancements: occurrence and typical properties. *Ann. Geophys.*, 31, 319-331. doi:10.5194/angeo-31-319-2013
- Archer, M. O., Horbury, T. S., & Eastwood, J. P. (2012, May). Magnetosheath pressure pulses: Generation downstream of the bow shock from solar wind discontinuities. *J. Geophys. Res.*, 117, A05228. doi:10.1029/2011JA017468
- Auster, H. U., Glassmeier, K. H., Magnes, W., Aydogar, O., Baumjohann, W., Constantinescu, D., Wiedemann, M. (2008, December). The THEMIS Fluxgate Magnetometer. *Space Science Reviews*, 141 (1-4), 235-264. doi:10.1007/s11214-008-9365-9
- Balogh, A., Carr, C. M., Acuña, M. H., Dunlop, M. W., Beek, T. J., Brown, P., Schwingschuh, K. (2001). The cluster magnetic field investigation: overview of in-flight performance and initial results. *Annales Geophysicae*, 19 (10/12), 1207-1217. Retrieved from <https://www.ann-geophys.net/19/1207/2001/> doi:10.5194/angeo-19-1207-2001
- Billingham, L., Schwartz, S. J., & Sibeck, D. G. (2008, November). The statistics of foreshock cavities: results of a Cluster survey. *Ann. Geophys.*, 26, 3653-3667. doi:10.5194/angeo-26-3653-2008
- Blanco-Cano, X., Preisser, L., Kajdič, P., & Rojas-Castillo, D. (2020, September). Magnetosheath Microstructure: Mirror Mode Waves and Jets during Southward IP Magnetic Field. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 125 (9), e27940. doi:10.1029/2020JA027940
- Burgess, D. (1989). Cyclic behavior at quasi-parallel collisionless shocks. *Geophysical Research Letters*, 16 (5), 345-348. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1029/GL016i005p00345> doi:10.1029/GL016i005p00345
- Dimmock, A. P., Osmane, A., Pulkkinen, T. I., & Nykyri, K. (2015, Jul). A statistical study of the dawn-dusk asymmetry of ion temperature anisotropy and mirror mode occurrence in the terrestrial dayside magnetosheath using THEMIS data. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 120 (7), 5489-5503. doi:10.1002/2015JA021192
- Dmitriev, A. V., & Suvorova, A. V. (2012, August). Traveling magnetopause distortion related to a large-scale magnetosheath plasma jet: THEMIS and ground-based observations. *J. Geophys. Res.*, 117, A08217. doi:10.1029/2011JA016861
- Eastwood, J. P., Balogh, A., Lucek, E. A., Mazelle, C., & Dandouras, I. (2005). Quasi-monochromatic ulf foreshock waves as observed by the four-spacecraft cluster mission: 1. statistical properties. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110 (A11), n/a-n/a. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1029/2004JA010617> (A11219) doi:10.1029/2004JA010617

- Eastwood, J. P., Mistry, R., Phan, T. D., Schwartz, S. J., Ergun, R. E., Drake, J. F., Russell, C. T. (2018, May). Guide Field Reconnection: Exhaust Structure and Heating. *Geophysical Research Letters*, 45 (10), 4569-4577. doi: 10.1029/2018GL077670
- Escoubet, C., Schmidt, R., & Goldstein, M. (1997, Jan 01). Cluster – science and mission overview. *Space Science Reviews*, 79 (1), 11–32. Retrieved from <https://doi.org/10.1023/A:1004923124586> doi:10.1023/A:1004923124586
- Génot, V., Budnik, E., Hellinger, P., Passot, T., Belmont, G., Trávníček, P. M., Dandouras, I. (2009, February). Mirror structures above and below the linear instability threshold: Cluster observations, fluid model and hybrid simulations. *Annales Geophysicae*, 27 (2), 601-615. doi:10.5194/angeo-27-601-2009
- Giacalone, J., Schwartz, S. J., & Burgess, D. (1993). Observations of suprathermal ions in association with slams. *Geophys. Res. Lett.*, 20 (2), 149–152. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1029/93GL00067> doi:10.1029/93GL00067
- Gosling, J. T., Eriksson, S., McComas, D. J., Skoug, R. M., & Forsyth, R. J. (2005, Dec). Reconnection Exhausts in the Solar Wind Well Beyond 1 AU: Ulysses. In *Agu fall meeting abstracts* (Vol. 2005, p. SM13C-04).
- Gutynska, O., Sibeck, D. G., & Omid, N. (2015, September). Magnetosheath plasma structures and their relation to foreshock processes. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 120, 7687-7697. doi:10.1002/2014JA020880
- Hietala, H., Laitinen, T. V., Andr´eev´a, K., Vainio, R., Vaivads, A., Palmroth, M., Réme, H. (2009, December). Supermagnetosonic Jets behind a Collisionless Quasiparallel Shock. *Phys. Rev. Lett.*, 103 (24), 245001. doi: 10.1103/PhysRevLett.103.245001
- Hietala, H., Partamies, N., Laitinen, T. V., Clausen, L. B. N., Facsk´o, G., Vaivads, A., Lucek, E. A. (2012, January). Supermagnetosonic subsolar magnetosheath jets and their effects: from the solar wind to the ionospheric convection. *Ann. Geophys.*, 30, 33-48. doi:10.5194/angeo-30-33-2012
- Hietala, H., Phan, T. D., Angelopoulos, V., Oieroset, M., Archer, M. O., Karlsson, T., & Plaschke, F. (2018, Feb). In Situ Observations of a Magnetosheath High-Speed Jet Triggering Magnetopause Reconnection. *Geophysical Research Letters*, 45 (4), 1732-1740. doi:10.1002/2017GL076525
- Hietala, H., & Plaschke, F. (2013, November). On the generation of magnetosheath high-speed jets by bow shock ripples. *J. Geophys. Res.*, 118, 7237-7245. doi: 10.1002/2013JA019172
- Kajdič, P., Blanco-Cano, X., Omid, N., Rojas-Castillo, D., Sibeck, D. G., & Billingham, L. (2017). Traveling foreshocks and transient foreshock phenomena. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122 (9), 9148–9168. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1002/2017JA023901> (2017JA023901) doi: 10.1002/2017JA023901
- Karlsson, T., Brenning, N., Nilsson, H., Trotignon, J.-G., Vallières, X., & Facsko, G. (2012, March). Localized density enhancements in the magnetosheath: Three-dimensional morphology and possible importance for impulsive penetration. *J.*

- Geophys. Res., 117, A03227. doi:10.1029/2011JA017059
- Karlsson, T., Kullen, A., Liljeblad, E., Brenning, N., Nilsson, H., Gunell, H., & Hamrin, M. (2015, September). On the origin of magnetosheath plasmoids and their relation to magnetosheath jets. *J. Geophys. Res.*, 120, 7390-7403. doi:10.1002/2015JA021487
- Katircio ğlu, F. T., Kaymaz, Z., Sibeck, D. G., & Dandouras, I. (2009). Magnetosheath cavities: case studies using cluster observations. *Annales Geophysicae*, 27 (10), 3765–3780. Retrieved from <https://angeo.copernicus.org/articles/27/3765/2009/> doi:10.5194/angeo-27-3765-2009
- Krauss-Varban, D., & Omidi, N. (1991). Structure of medium mach number quasi-parallel shocks: Upstream and downstream waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 96 (A10), 17715–17731. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1029/91JA01545> doi:10.1029/91JA01545
- Liu, T. Z., Hietala, H., Angelopoulos, V., Omelchenko, Y., Vainio, R., & Plaschke, F. (2020). Statistical study of magnetosheath jet-driven bow waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125 (7), e2019JA027710. Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JA027710> (e2019JA027710 2019JA027710) doi:<https://doi.org/10.1029/2019JA027710>
- Lucek, E. A., Constantinescu, D., Goldstein, M. L., Pickett, J., Pin çon, J. L., Sahraoui, F., Walker, S. N. (2005, Jun). The Magnetosheath. *Space Science Reviews*, 118 (1-4), 95-152. doi:10.1007/s11214-005-3825-2
- Lucek, E. A., Horbury, T. S., Balogh, A., Dandouras, I., & Réme, H. (2004). Cluster observations of hot flow anomalies. *J. Geophys. Res.*, 109, A06207. doi:10.1029/2003JA010016
- McFadden, J. P., Carlson, C. W., Larson, D., Ludlam, M., Abiad, R., Elliott, B., Angelopoulos, V. (2008, December). The THEMIS ESA Plasma Instrument and In-flight Calibration. *Space Science Reviews*, 141 (1-4), 277-302. doi:10.1007/s11214-008-9440-2
- Øieroset, M., Phan, T. D., Shay, M. A., Haggerty, C. C., Fujimoto, M., Angelopoulos, V., Mozer, F. S. (2017, August). THEMIS multispacecraft observations of a reconnecting magnetosheath current sheet with symmetric boundary conditions and a large guide field. *Geophysical Research Letters*, 44 (15), 7598-7606. doi:10.1002/2017GL074196
- Omidi, N., Sibeck, D., Blanco-Cano, X., Rojas-Castillo, D., Turner, D., Zhang, H., & Kajdić, P. (2013, February). Dynamics of the foreshock compressional boundary and its connection to foreshock cavities. *J. Geophys. Res.*, 118, 823-831. doi:10.1002/jgra.50146
- Paschmann, G., Haerendel, G., Papamastorakis, I., Scokopke, N., Bame, S. J., Gosling, J. T., & Russell, C. T. (1982, April). Plasma and magnetic field characteristics of magnetic flux transfer events. *Journal of Geophysical Research*, 87 (A4), 2159-2168. doi:10.1029/JA087iA04p02159
- Paschmann, G., & Sonnerup, B. U. O. (2008, January). Proper Frame Determination and Walen Test. *ISSI Scientific Reports Series*, 8, 65-74.

- Petrinec, S. M., Burch, J. L., Chandler, M., Farrugia, C. J., Fuselier, S. A., Giles, B. L., Zhao, C. (2020, July). Characteristics of Minor Ions and Electrons in Flux Transfer Events Observed by the Magnetospheric Multiscale Mission. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 125 (7), e27778. doi:10.1029/2020JA027778
- Phan, T. D., Eastwood, J. P., Shay, M. A., Drake, J. F., Sonnerup, B. U. Ö., Fujimoto, M., Magnes, W. (2018, May). Electron magnetic reconnection without ion coupling in Earth's turbulent magnetosheath. *Nature*, 557 (7704), 202-206. doi:10.1038/s41586-018-0091-5
- Phan, T. D., Paschmann, G., Twitty, C., Mozer, F. S., Gosling, J. T., Eastwood, J. P., Lucek, E. A. (2007, July). Evidence for magnetic reconnection initiated in the magnetosheath. *Geophysical Research Letters*, 34, L14104. doi:10.1029/2007GL030343
- Plaschke, F., & Glassmeier, K.-H. (2011, October). Properties of standing Kruskal-Schwarzschild-modes at the magnetopause. *Ann. Geophys.*, 29, 1793-1807. doi:manuscript submitted to *Geophysical Research Letters* 10.5194/angeo-29-1793-2011
- Plaschke, F., Hietala, H., & Angelopoulos, V. (2013, October). Anti-sunward high-speed jets in the subsolar magnetosheath. *Ann. Geophys.*, 31, 1877-1889. doi:10.5194/angeo-31-1877-2013
- Plaschke, F., Hietala, H., Angelopoulos, V., & Nakamura, R. (2016). Geoeffective jets impacting the magnetopause are very common. *J. Geophys. Res.*, 121 , 3240-3253. doi:10.1002/2016JA022534
- Plaschke, F., Hietala, H., Archer, M., Blanco-Cano, X., Kajdič, P., Karlsson, T., Sibeck, D. (2018, Aug). Jets Downstream of Collisionless Shocks. *Space Science Reviews*, 214 (5), 81. doi:10.1007/s11214-018-0516-3
- Pollock, C., Moore, T., Jacques, A., Burch, J., Gliese, U., Saito, Y., Zeuch, M. (2016). Fast plasma investigation for magnetospheric multiscale. *Space Science Reviews*, 199 (1), 331-406. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0245-4> doi:10.1007/s11214-016-0245-4
- Raptis, S., Aminalragia-Giamini, S., Karlsson, T., & Lindberg, M. (2020). Classification of magnetosheath jets using neural networks and high resolution omni (hro) data. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 7, 24. Retrieved from <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fspas.2020.00024> doi:10.3389/fspas.2020.00024
- Raptis, S., Karlsson, T., Plaschke, F., Kullen, A., & Lindqvist, P.-A. (2020). Classifying magnetosheath jets using mms: Statistical properties. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125 (11), e2019JA027754. Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JA027754> (e2019JA027754 10.1029/2019JA027754) doi: <https://doi.org/10.1029/2019JA027754>
- Rème, H., Aoustin, C., Bosqued, J. M., Dandouras, I., Lavraud, B., Sauvaud, J. A., Sonnerup, B. (2001, October). First multispacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster ion spec-

- trometry (CIS) experiment. *Annales Geophysicae*, 19, 1303-1354. doi: 10.5194/angeo-19-1303-2001
- Russell, C. T., Anderson, B. J., Baumjohann, W., Bromund, K. R., Dearborn, D., Fischer, D., Richter, I. (2016). The magnetospheric multiscale magnetometers. *Space Science Reviews*, 199 (1), 189–256. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0057-3> doi:10.1007/s11214-014-0057-3
- Savin, S., Amata, E., Zelenyi, L., Nemecek, Z., Borodkova, N., Buechner, J., Lezhen, L. (2012). Super fast plasma streams as drivers of transient and anomalous magnetospheric dynamics. *Ann. Geophys.*, 30, 1-7. doi:10.5194/angeo-30-1-2012
- Sharma, A. S., & Curtis, S. A. (2005). Magnetospheric multiscale mission. In W. Burton et al. (Eds.), *Nonequilibrium phenomena in plasmas* (pp. 179–195). Dordrecht: Springer Netherlands. Retrieved from https://doi.org/10.1007/1-4020-3109-2_8 doi:10.1007/1-4020-3109-2_8
- Shue, J.-H., Chao, J.-K., Song, P., McFadden, J. P., Suvorova, A., Angelopoulos, V., Plaschke, F. (2009, September). Anomalous magnetosheath flows and distorted subsolar magnetopause for radial interplanetary magnetic fields. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L18112. doi:10.1029/2009GL039842
- Sibeck, D. G., Kudela, K., Lepping, R. P., Lin, R., Nemecek, Z., Nozdrachev, M. N., Yermolaev, Y. (2000, November). Magnetopause motion driven by interplanetary magnetic field variations. *J. Geophys. Res.*, 105, 25155-25170. doi: 10.1029/2000JA900109
- Sibeck, D. G., Phan, T.-D., Lin, R., Lepping, R. P., & Szabo, A. (2002, October). Wind observations of foreshock cavities: A case study. *J. Geophys. Res.*, 107 , 1271. doi:10.1029/2001JA007539
- Sonnerup, B. U. Ö., & Scheible, M. (1998). Minimum and maximum variance analysis. In G. Paschmann & P. Daly (Eds.), *Analysis methods for multi-spacecraft data* (p. 185-220). Noordwijk: ESA. Retrieved from <http://adsabs.harvard.edu/abs/1998ISSIR...1..185S>
- Treumann, R. A. (2009, December). Fundamentals of collisionless shocks for astrophysical application, 1. Non-relativistic shocks. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 17 (4), 409-535. doi:10.1007/s00159-009-0024-2
- Tsurutani, B. T., & Stone, R. G. (1985, Jan). Collisionless shocks in the heliosphere: Reviews of current research. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 35 . doi:10.1029/GM035
- Voros, Z., Yordanova, E., Varsani, A., Genestreti, K. J., Khotyaintsev, Y. V., Li, W., Saito, Y. (2017, Nov). MMS Observation of Magnetic Reconnection in the Turbulent Magnetosheath. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 122 (11), 11,442-11,467. doi:10.1002/2017JA024535
- Wang, B., Nishimura, Y., Hietala, H., Lyons, L., Angelopoulos, V., Plaschke, F., Weatherwax, A. (2018). Impacts of magnetosheath high-speed jets on the magnetosphere and ionosphere measured by optical imaging and satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123 (6), 4879-4894. Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2017JA024954> doi:https://doi.org/10.1029/2017JA024954