

Kavitoni – nov pojav v območju pred Zemljinim udarnim valom

Cavitons - new phenomenon in the Earth's foreshock

Primož Kajdič¹, Xochitl Blanco-Cano¹, Nojan Omid², Christopher T. Russell³

¹Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria / México D.F., México

²Solana Scientific Inc. / Solana Beach, California, USA

³Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California / Los Angeles, California, USA

E-Mails: primoz@geofisica.unam.mx ; xbc@geofisica.unam.mx ; omidi@roadrunner.com ; ctrussel@igpp.ucla.edu

*Avtor za korespondenco; Tel.: +52 5556224142

Povzetek: Območje pred Zemljinim udarnim valom (angl. “foreshock region”) je zelo turbulentno. Poseljeno je s fluktuacijami gostote plazme ter magnetnega polja. Poleg fluktuacij, ki jim pravimo valovi, se pojavljajo tudi prehodne strukture, znane kot gostotne luknje (angl. “density holes”), anomalije vročega toka (angl. “hot flow anomalies”) ter votline v območju pred udarnim valom (angl. “foreshock cavities”). Nedavno so rezultati globalnih hibidnih simulacij (kinetični ioni, elektroni brezmasna tekočina z nabojem) nakazali obstoj še enega tipa prehodnih struktur, t.i. kavitonov v območju pred udarnim valom (angl. “foreshock cavitons”). Kavitoni in votline so si na prvi pogled v marsičem podobni, vendar je njihov nastanek posledica dveh različnih formacijskih mehanizmov. V tem članku na kratko predstavimo območje pred Zemljinim udarnim valom ter opišemo lastnosti najbolj tipičnih populacij delcev, valov ter prehodnih struktur, ki se v njem nahajajo. Posebej natančno, na dveh primerih, primerjamo opazovalne lastnosti votlin ter kavitonov ter razpravljamo o njihovih podobnostnih in razlikah.

Ključne besede: magnetosferna fizika; planetarni uarni valovi; kavitoni v območju pred udarnim valom

Abstract: The region upstream of the earth's bow shock is highly turbulent. It is populated by fluctuations of plasma density and magnetic field. Besides the fluctuations known as waves, there are also transient structures, such as density holes, hot flow anomalies and foreshock cavities. The recent global hybrid (kinetic ions + fluid electrons) simulations results suggested the existence of a new type of transient structures called the foreshock cavitons. At first glimpse, the cavities and the cavitons share many similarities, but they form due to different physical processes. In this work we present the region upstream of the earth's shock, i.e. the earth's foreshock, and describe the properties of the most typical populations of particles, waves and transient structures that populate it. We compare in detail the observational properties of foreshock cavities and cavitons by presenting two case studies and we discuss their similarities and differences.

1. Uvod

Sončev veter (SV) je vroča plazma s Sonca, ki po medplanetarnem prostoru potuje s tipičnimi hitrostmi med 400 in 2000 kms⁻¹. Ta plazma je prežeta z medplanetarnim magnetnim poljem (MMP), ki prav tako izvira s Sonca. Med svojim potovanjem lahko SV naleti na številne ovire, med katerimi so tudi *magnetosfere* (angl. “magnetosphere”) planetov. Tudi Zemljino magnetno polje predstavlja oviro za SV. Zaradi interakcije Zemljinega magnetnega polja s SV se okoli Zemlje ustvari *ukrivljen*

udarni val (angl. “bow shock”, Slika 1). Ob prehodu čez udarni val se plazma upočasni in preusmeri, tako da obteka Zemljino magnetosfero, v katero pa praviloma ne prodre. Območje med udarnim valom in magnetosfero je *magnetna ovojnica* (angl. “magnetosheath”). V ovojnici se nahaja plazma, ki izvira izključno iz SV, vendar so njene lastnosti tu drugačne (manjša hitrost, spremenjena smer napredovanja, višji temperatura in gostota). Meji med magnetno ovojnico in magnetosfero pravimo *magnetopavza* (angl. “magnetopause”). Ta meja predstavlja tangentno nezveznost med obema območjema, kar pomeni,

da sta na obeh straneh tik ob magnetopavzi normalni komponenti magnetnega polja ter hitrosti plazme enaki nič.

Ukrivljen udarni val okoli Zemlje se močno razlikuje od udarnih valov, ki smo jih vajeni iz hidrodinamike (HD) in magnetohidrodinamike (MHD). Razlog je v tem, da je gostota SV na razdalji 1 astronomske enote (ae) od Sonca le $\sim 5 \text{ cm}^{-3}$. Povprečna prosta pot delcev na tej razdalji je tako enaka 1 ae, kar pomeni, da le-ti med sabo praktično ne trkajo. Populacijo delcev v SV lahko opišemo z Maxwellovo porazdelitvijo s tipično povprečno energijo $\sim 1 \text{ keV}$. To pomeni, da obstaja mehanizem za izmenjavo energije ter gibalne količine med delci in njihovo posledično termalizacijo. Ker neposrednih trkov med delci ni, igra v tem mehanizmu pomembno vlogo MMP, preko katerega so delci v medplanetarnem prostoru sklopljeni. Tudi udarni val okoli Zemlje je udarni val brez trkov (angl. "collisionless shock"). Njegova debelina je v največji meri odvisna od kota, ki ga oklepata lokalna normala na udarni val ter MMP, θ_{Bn} .

Hitrost SV v medplanetarnem prostoru je veliko večja od tipične zvočne in Alfvenove hitrosti na razdalji 1 ae od Sonca, ki znašata $\sim 100 \text{ kms}^{-1}$ ter $\sim 60 \text{ kms}^{-1}$. Pravimo, da je SV nadzvočen ter superalfveničen. Ko plazma v sončevem vetru prispe do Zemljinega ukrivljenega udarnega vala se velik del njene kinetične energije spremeni v notranjo energijo (poviša se ji temperatura). Če bi bila hitrost SV le rahlo višja od Alfvenove, bi se to lahko zgodilo z disipacijo, ki je posledica upornosti plazme. Takim udarnim valom pravimo *podkritični*. Ker pa je hitrost plazme v SV dosti večja od Alfvenove, ta proces ne zadošča. Udarni val se odvečne energije znebi tako, da del delcev iz SV ($\sim 1 \%$) preusmeri nazaj v smeri proti Soncu. Pravimo, da je udarni val nadkritičen. Preusmerjenim delcem pravimo *povratni delci* (angl. "backstreaming particles"). Interakcija povratnih delcev z delci v prihajajočem SV ustvari turbulentno območje pred Zemljinim udarnim valom (OZUV, angl. "foreshock region" ali "Earth's foreshock", glej npr. Le & Russell 1992a in 1992b, Eastwood et al., 2005, Greenstadt et al., 1995)

OZUV je območje, ki je magnetno povezano z udarnim valom (magnetne silnice v njem dosežejo udarni val). V njem se prihajajoči SV prvič "zave" obstoja udarnega vala. OZUV ima v grobem obliko stožca, katerega orientacija in velikost zavisita od trenutne orientacije MMP in hitrosti SV (Slika 2). V OZUV najdemo različne populacije delcev, magnetne valove ter t.i. prehodne pojave. Pomemben parameter od katerega so odvisne lastnosti pojavov, ki jih bomo opazili v različnih regijah OZUV, je kot med lokalno normalo na udarni val in MMP, θ_{Bn} . V grobem delimo OZUV na kvazi-vzporedno regijo, če se nahaja pred udarnim valom kjer je $\theta_{Bn} \leq 45^\circ$ in na kvazi-pravokotno

regijo, če je $\theta_{Bn} > 45^\circ$.

Prehod čez kvazi-pravokoten udarni val je zelo oster – jakost magnetnega polja, gostota, in temperatura se ob prehodu čez udarni val hitro ter močno spremenijo. Prehod čez kvazi-vzporeden udarni val je manj oster, saj je območje pred njim poseljeno z valovi magnetnega polja in plazme z zelo velikimi amplitudami, tako da je meja udarega vala deloma zabrisana.

1.1. Delci

Delce, ki sestavljajo SV smo že omenili, zato jih tukaj ne bomo še enkrat opisovali. Dovolj bo če omenimo, da predstavljajo 99 % vseh delcev v OZUV.

OZUV nastane kot posledica povratnih delcev. Njegovo mejo določa t.i. tangentna magnetna silnica, torej tista, ki se z udarnim valom le stika v točki, kjer je $\theta_{Bn} = 90^\circ$. Tik ob meji se k Soncu vračajo le elektroni, ki se gibljejo vzdolž magnetnih silnic. Nekoliko bolj znotraj OZUV se elektronom pridružijo tudi ioni. Ker so hitrosti teh delcev vzporedne MMP, jim pravimo *s poljem poravnani curki* (angl. "field-aligned beams", Slika 3). Regije, ki so še bolj znotraj OZUV so poseljene s turbulencami in valovi magnetnega polja. Povratni delci se na teh nepravilnostih sipljejo. Njihove smeri gibanja so popolnoma naključne v prostoru, zato jim pravimo *difuzni delci* ("diffuse particles"). Seveda obstajajo tudi druge populacije delcev, ki pa jih tukaj ne bomo posebej omenjali. Energije povratnih delcev so tipično 10 do 10^5 -krat večje od povprečnih energije delcev v SVju. Ti delci povzročajo lokalni presežek gostote in tlaka, zato perturbirajo plazmo v OZUV in tako povzročajo valove v plazmi in v magnetnem polju. Pozneje se s taistimi valovi sklapljajo in se na njih, kot smo že omenili, sipljejo. Ker se difuzni delci dejansko več ne vračajo k Soncu in ker imajo visoke energije, vse delce, ki ne sestavljajo sončevega vetra, imenujemo *supertermični delci* (angl. "suprathermal particles").

1.2. Valovi

Fizikalne lastnosti plazme v OZUV so močno spremenjene – prisotne so močne fluktuacije gostote, ki jih velikokrat spremljajo fluktuacije magnetnega polja. Te fluktuacije imajo lahko obliko valov. Tipični so valovi z ultra nizko frekvenco (UNF, angl. "ultra-low frequency waves", Slika 3, glej tudi Hoppe & Russell, 1981, Greenstadt et al., 1995), katerih periode znašajo med 10 in 100 sekundami. Imajo zelo velike amplitude ($\Delta B/B \sim 1$) ter valovne dolžine med $0.5 R_E$ ter $1 R_E$ (R_E je radij Zemlje). V grobem obstajata dva tipa UNF valov – prvi so krožno polarizirani, nekompresivni (valuje le magnetno polje, ne pa tudi plazma) valovi, ki se razširjajo približno vzdolž

MMP. Njihov spekter je kvazi monokromatski, s prevladujočimi periodami ~30 sekund. Drugi tip so linearno polarizirani, kompresivni valovi, ki se razširjajo v smereh, ki oklepajo z MMP kot, ki je odvisen od stopnje stisljivosti in lahko znaša tudi 90 stopinj. Tipično so valovi, ki se nahajajo bližje udarnemu valu, bolj stisljivi in bolj strmi, njihov spekter pa je bolj širok.

Poleg UNF valov so prisotni tudi valovi whistler (Hoppe & Russell, 1981), ki se tipično nahajajo v območju blizu udarnega vala. Njihove frekvence v referenčnem sistemu plazme SV znašajo med 0.5 Hz in 5 Hz, njihove valovne dolžine pa so reda 100 km. Imajo lahko različne stopnje kompresivnosti in se razširjajo pod različnimi koti glede na MMP (vendar ne vzdolž polja), njihove amplitude pa so bistveno manjše od amplitud UNF valov ($\Delta B/B \sim 0.2$).

1.3. Prehodni pojavi

Poleg valov je bilo v OZUV identificiranih več t.i. prehodnih pojavov. Sem spadajo t.i. *gostotne luknje* (angl. "density holes"), ki so območja z zmanjšano gostoto plazme (Parks et al., 2006 in 2008, Wilber et al., 2008), *anomalije vročega toka* (angl. "hot flow anomalies") (Schwartz, 1995, Schwartz et al., 2000) ter *votline v območju pred Zemljinim udarnim valom* (angl. "foreshock cavities"). Slednje v satelitskih podatkih opazimo kot območja, znotraj katerih sta jakost magnetnega polja in gostota plazme zmanjšana glede na povprečni vredosti v okolici, obdana pa so z robom, kjer imata taisti količini vrednosti, ki so večje od tistih v okoliški plazmi. Hkrati je znotraj votlin pomembno povečan tok supertermičnih delcev (Sibeck et al., 2001, 2002, 2008, Billingham et al., 2008, Schwartz et al., 2006).

Omidí (2007) in Blanco-Cano et al. (2009) so na podlagi rezultatov globalnih hibridnih numeričnih simulacij predlagali obstoj še enega pojava, ki so ga Blanco-Cano et al. (2009) poimenovali *kavitoni v območju pred udarnim valom* (angl. "foreshock cavitons"). Podobno kot votline, se kavitoni v simulacijah pojavljajo kot območja, kjer sta jakost magnetnega polja in gostota plazme nižji od okoliških vrednosti (vsaj 40 %, lahko tudi do 60 %), povečini pa so obdani z robom, kjer imata ti dve količini višje vrednosti od povprečja v okolici. Za razliko od votlin pa so vrednosti toka supertermičnih delcev znotraj kavitonov enake tistim v njihovi neposredni okolici. Kavitoni so nepravilnih oblik, nastanejo pa zaradi nelinearnih interakcij dveh tipov UNF valov, opisanih v podpoglavju 1.2. Blanco-Cano et al. (2009) so kavitone prvič našli v opazovalnih podatkih misije Cluster (<http://caa.estec.esa.int/caa/home.xml>) in ugotovili, da se njihove opazovalne lastnosti (trajanje, globina v magnetnem polju in plazmi, itd.) dobro ujemajo z

napovedmi iz simulacij.

Kajdič et al. (2010) so našli kavitone v območju neposredno pred Zemljinim udarnim valom v podatkih misije Cluster. Ti avtorji so kavitone definirali kot območja v OZUVu, kjer se jakost magnetnega polja in gostota plazme hkrati znižata za vsaj 40 % v primerjavi z povprečnimi vrednostmi v okolici. V večini primerov so kavitoni obdani z robom, kjer ti dve količini izkazujejo nadpovprečne vrednosti v primerjavi z okolico. Kavitoni v opazovalnih podatkih misije Cluster trajajo med 30 in 60 sekundami. Trajanje kavitona je definirano kot časovni interval, v katerem imata B in n podpovprečne vrednosti. Ker se kavitoni nahajajo globoko znotraj OZUV, so vedno obdani z "morjem" UNF valov in supertermičnih delcev.

Kajdič et al. (2011) so proučevali dva kavitona s podatki vseh štirih satelitov misije Cluster. Izračunali so relativno hitrost kavitonov glede na plazmo v sončevem vetru in glede na Zemljo, ter njihovo velikost. Ugotovili so, da kavitoni potujejo v smeri proti Soncu v opazovalnem sistemu plazme s hitrostjo, ki je manjša od hitrosti sončevega vetra, zato jih le-ta, odnaša v smeri k Zemlji. Iz hitrosti kavitonov in njihovega trajanja v podatkih misije Cluster so Kajdič et al. (2011) izračunali, da so velikosti kavitonov reda dveh zemljinih radijev. To je približno dva-do štirikrat več kot znaša valovna dolžina UNF valov (Hoppe & Russell, 1981, 1983). S tem so avtorji ovrgli hipotezo, da bi opazovani kavitoni bili le nekakšne "luknje" v turbulentnem polju UNF valov.

2. Kavitoni in votline

2.1. Votline

Ker so si v opazovalnih podatkih votline in kavitoni zelo podobni, je treba najprej razčistiti, da ne gre za isti pojav. Slika 4 (iz Schwarz et al., 2006) prikazuje "podpis" votline v podatkih štirih satelitov misije Cluster. Votlina je bila opažena 15. februarja 2001 ob 5:30:00 UT. Prikazane so sledeče količine (od zgoraj navzdol): jakost medplanetarnega magnetnega polja v nanoteslih (nT), orientacija MMP, dolžina časovnega intervala med katerim je bila trenutna magnetna silnica povezana z Zemljinim udarnim valom pod kotom $\theta_{Bn} < 45^\circ$ (rdeča črta) oziroma $\theta_{Bn} < 60^\circ$ (črna črta), številčna gostota termičnih delcev (delcev v SV) (cm^{-3} , zelena črta) ter gostota supratermičnih delcev z energijami < 32 keV pomnožena s 1000 (izmerjena z inštrumentom CIS, glej Rème et al., 2001), hitrost sončevega vetra (kms^{-1}), smer SVja, temperatura SVja (K), tok supratermičnih delcev z energijami > 35 keV (izmerjen z inštrumentom RAPID, glej Wilken et al., 1997), ter celotni tlak (P_{tot}) ter njegove komponente: tlak magnetnega polja (P_B), tlak delcev v SV (P_i), tlak elektronov (P_e) in tlak supertermičnih delcev energijami $<$

32 keV (P_{HIE}).

Pomembno pri tem dogodku je, da se jakost magnetnega polja in gostota plazme v votlini sočasno spremenita na enak način – v notranosti imata vrednosti, ki so nižje od povprečja v okolici votline, ob robu pa so te vrednosti povišane. Orientacija magnetnega polja se v votlini močno spremeni (vektor magnetnega polja polja rotira), gostota supertermičnih CIS delcev ter tok delcev opazovanih z inštrumentom RAPID pa se v votlini močno povečata. V okolici votline je magnetno polje zelo malo perturbirano, večje pa so fluktuacije gostote termičnih delcev. To nakazuje, da se je v času opazovanja votlina nahajala znotraj UZOV, vendar verjetno blizu meje tega območja, saj bi bile drugače fluktuacije MMP dosti večje. Tlak magnetnega polja prevladuje znotraj večjega dela prikazanega časovnega intervala. Sledita mu tlak ionov v sončevem vetru ter tlak elektronov. Ti trije tlaki se v notranosti votline močno zmanjšajo, poveča pa se tlak supertermičnih delcev, ki je tam največji. Vrednosti celotnega tlaka znotraj votline so približno enake vrednostim v okoliški plazmi. Skupen tlak pa je močno povečan v “ramenih” votline, to se pravi na robu. To je predvsem na račun povečanega tlaka magnetnega polja in termičnega tlaka SV.

Votline so bile do sedaj opažene znotraj UZOV, blizu njegove meje (glej Sliko 1 v Billingham et al., 2008), točno na meji UZOV (Sibeck et al., 2008) ali celo v neperturbiranem sončevem vetru izven UZOV (Billingham, 2009, Schwartz et al., 2006). Razlog za to deloma tiči v načinu, kako so omenjeni avtorji iskali votline – izbirali so območja, ki so manj poseljena z magnetnimi ali plazemskimi valovi, da bi tako votline bolj izstopale. Schwartz et al. (2006) in Sibeck et al. (2008) so predlagali dve možni razlagi za nastanek votlin.

Razlaga, ki jo predlagajo Schwartz et al. (2006) pravi, da se v območjih OZUV, kjer so magnetne silnice sicer povezane z Zemljinim udarnim valom na kvazi-pravokoten način, nek skupek silnic poveže z udarnim valom na kvazi-vzporeden način. To povzroči, da vzdolž teh silnic supertermični delci lahko potujejo v smeri proti Soncu. Ti delci se znotraj votline nekako difuzno sipljejo do visokih energij in povzročijo lokalni presežek termičnega tlaka v plazmi. Zaradi tega presežka se plazma začne lokalno širiti, to pa povzroči “izkop” votline. Ko satelit potuje skozi tako strukturo zazna tipičen profil votline. Dejstvo, da znotraj votlin tok supertermičnih delcev zelo naraste, je močno v prid omenjeni razlagi. Razlog, kako bi se kvazi-vzporedno povezane silnice znašle v kvazi-pravokotnem območju bi naj bil v časovni spremenljivosti konfiguracije MMP ter SV (hitrost SV V_{SV} , orientacija MMP glede na zveznico Sonce-Zemlja, θ_{BX} , ter glede na smer potovanja SV, θ_{BV}), kar bi imelo za posledico nenadno spemembo velikosti ter orientacije OZUV.

Po drugi strani Sibeck et al. (2008) predlagajo, da gre pri delu votlin le za to, da sateliti prečkajo kompresivno mejo OZUV (angl. “foreshock compressive boundary, FCB”, glej sliko 2). Ta meja je namreč zelo kompresivna, odlikujejo jo pa močne fluktuacije gostote plazme in magnetnega polja. Načeloma je enostavno videti, kdaj gre za mejo OZUV, kdaj pa za pravo votlino. V primeru, da satelit prečka mejo OZUV, so lastnosti plazme in MMP na obeh straneh meje drugačne – na eni strani plazma pripada neperturbiranemu sončevemu vetru, na drugi pa sta tako v MMP in plazmi prisotne močne fluktuacije. Na strani pristnega SV imamo le eno populacijo delcev, na drugi strani pa imamo v grobem dve – eno, ki pripada pristnemu SV ter populacijo povratnih delcev.

Kakšna bi bila oblika takih votlin? Čeprav opazovalnih podatkov, s katerimi bi lahko neposredno določili njihovo obliko, ni, je smiselno pričakovati, da bi prvi mehanizem ustvaril podolgovate strukture, ki bi se stegovale vzdolž magnetnih silnic v stran od udarnega vala.

2.2. Kavitioni

Slika 5 (iz Kajdič et al., 2011) prikazuje kaviton, ki je bil opažen na isti dan kot votlina, se pravi 15. februarja 2001. V levem stolpcu so prikazane naslednje količine: jakost medplanetarnega magnetnega polja (nT), gostota plazme v sončevem vetru (cm^{-3}), temperatura sončevega vetra (MK), termični tlak plazme v sončevem vetru (nPa) ter hitrost sončevega vetra (kms^{-1}). V desnem stolpcu so prikazani: komponenta magnetnega polja vzdolž zveznice Sonce-Zemlja (nT), komponenta hitrosti sončevega vetra vzdolž taiste zveznice (kms^{-1}), tok supertermičnih delcev z energijo večjo od 32 keV izmerjen z inštrumentom RAPID, energijski spekter delcev v sončevem vetru ter energijski spekter supertermičnih delcev z energijo med 5 keV in 32 keV (izmerjen z inštrumentom CIS). Osenčeni časovni interval označuje čas, ko je bil opažen kaviton. Vrednosti MMP in gostote SV hkrati padejo pod povprečje na prikazanem 15 minutnem intervalu in to kljub temu, da je kaviton obdan s kompresijskimi fluktuacijami z veliko amplitudo. Dolžina te “depresije” je daljša od povprečne valovne dolžine teh fluktuacij. Vrednosti teh dveh količin so povečane v ramenih, ki ločujejo depresijo od okolice. V notranosti kavitona je povprečna hitrost SV ~10 % manjša od hitrosti v okolici. Različne barve predstavljajo podatke satelitov I (črno), II (modro), III (zeleno) in IV (rdečo).

Tok supertermičnih RAPID delcev ima ozek vrh, ki sovпада z desnim ramenom kavitona, povprečna vrednost toka znotraj kavitona pa je enaka vrednostim v njegovi okolici. Energijski spekter delcev CIS kaže, da se znotraj kavitona nahajajo supertermični delci (z energijami < 32 keV), da pa se ti delci nahajajo tudi v okolici kavitona.

Prav dejstvo, da so supertermični delci in kompresivne fluktuacije magnetnega polja in plazme prisotni v okolici kavitona pomeni, da je bil kaviton opažen globoko v OZUV.

Če bi bili kavitoni dejansko votline globoko znotraj OZUV, bi nastali zaradi presežka termičnega tlaka v njihovi notranjosti. Treba je torej primerjati termični tlak znotraj kavitonov s tistim v njihovi okolici. Slika 6 (vzeta iz Kajdič et al., 2011) prikazuje delne tlake supertermičnih delcev CIS (P_{hiE}), ionov v sončevem vetru (P_{ion}) in magnetnega polja (P_{B}) ter seštevek vseh delnih tlakov (P_{tot}). Vse tri komponente skupnega tlaka so si med večino prikazanega časovnega intervala enakovredne, v notranjosti kavitona pa prevladuje tlak supertermičnih delcev. Če seštejemo vse tri prispevke vidimo, da je skupen tlak v notranjosti kavitona enak tlaku v njegovi okolici. To pomeni, da ni dokazov za obstoj presežka skupnega tlaka, ki bi povzročil izkop kavitona.

Seveda bi lahko še vedno veljal scenarij, po katerem bi kavitoni bili le votline, ki so sicer nastale v območjih z manj supertemičnimi delci, pa jih je SV odnesel v notranjost OZUV. Toda če pogledamo rezultate globalnih hibridnih simulacij OZUV, kjer se pojavljajo kavitoni ali kavitonom podobne strukture (za katere je bil pred letom 2009 še uporabljen izraz votline, glej Lin, 2003, Lin et al., 2005, Omidī, 2007 in Blanco-Cano et al., 2009), vidimo, da le-ti nastanejo globoko znotraj OZUV. Treba je omeniti, da so bile vse omenjene simulacije narejene za nespremenljive pogoje v medplanetarnem prostoru (V_{SV} , θ_{BX} , ter θ_{BV}). Pod takimi pogoji votlin, vsaj če sledimo razlagi Schwartz et al. (2006), ne more biti in jih v simulacijah tudi ni.

Omidī (2007) so predlagali formacijski mehanizem za kavitone, po katerem ti nastanejo zaradi nelinearne interakcije dveh tipov UNF valov: v prvi tip spadajo krožno polarizirani, nekompresivni valovi, ki se propagirajo skoraj vzporedno z MMP, medtem ko v drugi tip spadajo linearno polarizirani, kompresivni valovi, ki se propagirajo v smeri, skoraj pravokotni na MMP. Ta pravokotnost med obema smerema propagiranja UNF valov je pomembna za nastanek kavitonov. Če bi bili smeri propagiranja vzporedni, bi interakcije med obema tipoma valov povročile le variacije amplitud jakosti magnetnega polja in gostote plazme v eni sami smeri, nikoli pa ne bi pripeljale do lokalizacije teh variacij. Dejstvo, da se kavitoni v referenčnem sistemu plazme gibljejo v smeri proti Soncu je povezano z njihovim formacijskim mehanizmom, saj se šibko kompresivni UNF valovi v sistemu plazme tudi propagirajo v tej smeri (Blanco-Cano et al., 2011).

3. Zaključek

V tem članku smo opisali območje pred Zemljinim udarnim valom (OZUV) in nekatere pojave, ki se v njem nahajajo. Natančneje smo opisali dva prehodna pojava – votline in kavitone. Votline so znane in proučevane že skoraj deset let (glej Sibeck et al., 2001, 2002, 2008, Billingham et al., 2008, Schwartz et al., 2006). Po drugi strani so bili kavitoni najprej odkriti v numeričnih hibridnih simulacijah leta 2007 še pod imenom votline (Omidī, 2007), pvič pa so bili odkriti v opazovalnih podatkih misije Cluster leta 2009 (Blanco-Cano et al., 2009). Oba pojava sta si v opazovalnih podatkih zelo podobna, vendar nastaneta kot posledica različnih formacijskih mehanizmov. Kavitoni najverjetneje nastanejo zaradi nelinearnih interakcij dveh tipov valov z ultra nizko frekvenco – v prvi tip spadajo krožno polarizirani, nekompresivni valovi, ki se propagirajo skoraj vzporedno z MMPjem, medtem ko v drugi tip spadajo linearno polarizirani, kompresivni valovi, ki se propagirajo v smeri, skoraj pravokotni na MMP.

Pri votlinah in kavitonih gre za dva različna pojava, kar pomeni, da so kavitoni nov tip prehodnega pojava v območju pred udarnim valom. Izmerjene velikosti kavitonov (Kajdič et al., 2011) so reda premera Zemlje. Kavitoni se v referenčnem sistemu plazme SV propagirajo v smeri proti Soncu s hitrostmi, ki so manjše od hitrosti sončevega vetra (Kajdič et al., 2011). Sončev veter torej odnaša kavitone v smeri proti Zemlji. Kavitoni ščasoma pripotujejo do Zemljinega udarnega vala in lokalno spreminjajo njegove lastnosti.

Zahvala

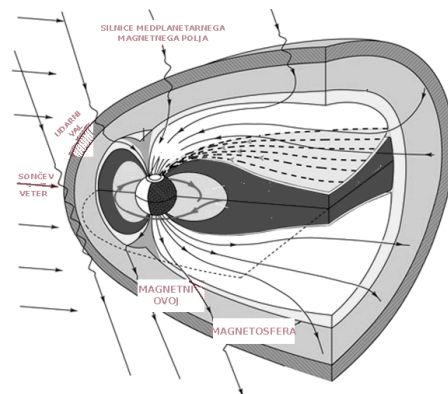
Zahvaljujemo se Dr. Elizabeth A. Lucek, vodji skupine “Cluster FGM team”; Dr. Iannis S. Dandourasu, vodji skupine “Cluster CIS instrument team”; Dr. Patrick W. Dalyu, vodji skupine “Cluster RAPID team”; in ESA CAA Cluster Facility za podatke magnetnega polja in plazme pridobljenih na njihovi spletni strani. Delo XBC je bilo omogočeno z denarno podporo CONACYT SEP 81159. Delo PK je bilo podprto s posdoktorskima štipendijama CONACYT in DGAPA. Delo na Solana Scientific je bilo omogočeno z denarnima podporama NSF ATM-0502992 in NASA NNX08AF38G. Delo na UCLA je bilo denarno podprto s strani National Science Foundation ATM04-02213.

Literatura

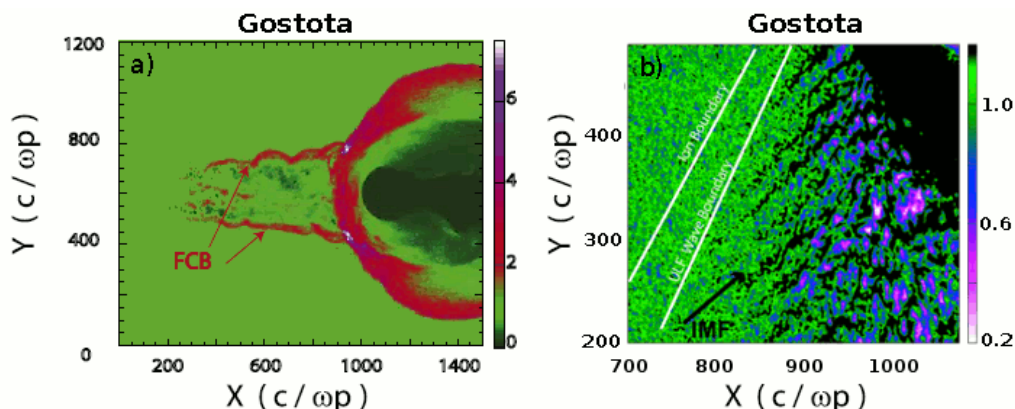
1. Billingham, L., Schwartz, S. J., Sibeck, D. G., 2008. The statistics of foreshock cavities: results of a Cluster survey. *Ann. Geophys.*, 26, 3653-3667

2. Blanco-Cano, X., Omidi, N., Russell, C. T., 2009. Global Hybrid Simulations: Foreshock Waves and Cavitons Under Radial IMF Geometry. *J. Geophys. Res.*, 114, A01216
3. Blanco-Cano, X., Kajdič, P., Omidi, N., Russell, C. T., 2011. Foreshock Cavitons for different IMF geometries: simulations and observations. V pripravi.
4. Eastwood, J. P., Lucek, E. A., Mazelle, C., Meziane, K., Narita, Y., Pickett, J., Treumann, R. A., 2005. The Foreshock. *Space Sci. Rev.*, 118, 41
5. Greenstadt, E. W., Le, G., Strangeway, R. J., 1995. ULF waves in the foreshock. *J. Adv. Space Res.*, 15, (8/9)71-84
6. Hoppe, M., Russell, C. T., 1981. On the nature of ULF waves upstream of planetary bow shocks. *J. Adv. Space Res.*, 1, 327-332
7. Hoppe, M., Russell, C. T., 1983. Plasma Rest Frame Frequencies and Polarizations of the Low-Frequency Upstream Waves: ISEE 1 and 2 Observations. *J. Geophys. Res.*, 88(A3), 2021-2027
8. Kajdič, P., Blanco-Cano, X., Omidi, N., Russell, C. T., 2010. Analysis of waves surrounding the foreshock cavitons, *AIP Conf. Proc.* 1216, pp. 479-482
9. Kajdič, P., Blanco-Cano, X., Omidi, N., Russell, C. T., 2010. Multi-spacecraft study of foreshock cavitons. Poslano na *Planetary and Space Science*.
10. Le, G., Russell, C. T., 1992a. A study of ULF wave foreshock morphology - I. ULF foreshock boundary. *Planet. Space Sci.*, 40, 1203-1213
11. Le, G., Russell, C. T., 1992b. A study of ULF wave foreshock morphology - II. Spatial variation of ULF wavexs. *Planet. space. Sci.*, 40, 1215-1225
12. Lin, Y., 2003. Global-scale simulations of foreshock structures at the quasiparallel bow shock. *J. Geophys. Res.*, 108, A11, 1390
13. Lin, Y., Wang, X. Y., 2005. Three-dimensional hybrid simulations of dayside dynamics associated with the quasi-parallel bow shock. *J. Geophys. Res.*, 110, A12216
14. Omidi, N., 2007. Formation of cavities in the foreshock. *AIP Conf. Proc.*, 932, 181
15. Omidi, N., Sibeck, D. G., Blanco-Cano, X., 2009. Foreshock compressional boundary. *J. Geophys. Res.*, 114, A08205
16. Parks, G. K. et al., 2006. Larmor size density holes discovered in the solar wind upstream of Earth's bow shock. *Phys. Plasmas*, 13, 050701
17. Parks, G. K., Lee, E., Lin, N., Mozer, F., Wilber, M., Lucek, E., Dandouras, I., Rème, H., Cao, J. B., Canu, P., Cornilleau-Wehrlin, N., Décréau, P., Goldstein, M. L., Escoubet, P., 2008. Density holes in the upstream solar wind, *6th Annual International Astrophysics Conference, AIP Conference Proceedings*, 932, pp. 9-15
18. Rème, H., et al., 2001. First multispacecraft ion measurements and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster ion spectrometry (CIS) experiment. *Ann. Geophys.*, 19, 1303-1354
19. Schwartz, S. J., 1995. Hot flow anomalies near Earth's foreshock. *Adv. Space Res.*, 107, 15, No. 8/9
20. Schwartz, S. J. et al., 2000. Conditions for the formation of hot flow anomalies at Earth's bow shock. *J. Geophys. Res.*, 105, A6, 12639-12650
21. Schwartz, S. J., Sibeck, D., Wilber, M., Meziane, K., Horbury, T. S., 2006. Kinetic aspects of foreshock cavities. *J. Geophys. Res.*, 33, L12103
22. Sibeck, D. G., Decker, R. B., Mitchell, D. G., Lazarus, A. J., Lepping, R. P., Szabo, A., 2001. Solar wind preconditioning in the flank foreshock: IMP 8 observations. *J. Geophys. Res.*, 106, No. A10, pp. 21,675-21,688
23. Sibeck, D. G., Phan, T. D., Lin, R., Lepping, R. P., Szabo, A., 2002. Wind observations of foreshock cavities: A case study. *J. Geophys. Res.*, 107, No. A10, 1271
24. Sibeck, D. G., Omidi, N., Dandouras, I., Lucek, E., 2008. On the edge of the foreshock; model-data comparisons. *Ann. Geophys.*, 26, 1539-1544
25. Wilber, M., Parks, G. K., Meziane, K., Lin, N., Lee, E., Mazelle, C., Harris, A., 2008. Foreshock Density Holes in the Context of Known Upstream Plasma Structures. *Ann. Geophys.*, 26, 3741-3755
26. Wilken et al., 1997. RAPID: The Imaging Energetic Particle Spectrometer on Cluster. *Space Sci. Rev.*, 79, No. 1-2, 399-473

Komentarji k slikam:

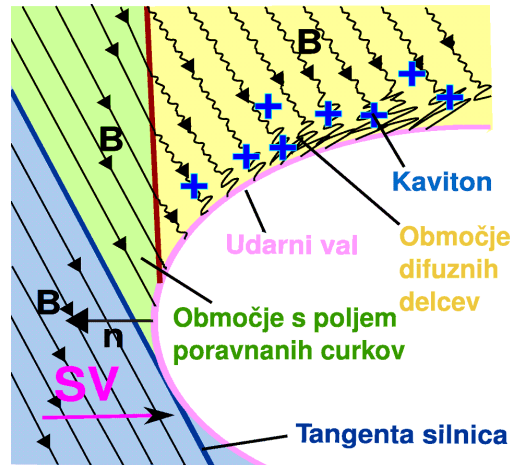


Slika 1. Slika je vzeta s spletne strani misije Imager for Magnetopause-to-Aurora Global exploration (IMAGE, <http://pluto.space.swri.edu/TIMAGE/glossary/magnetosphere.html>) in prikazuje shemo območja interakcije med Zemljinim magnetnim poljem in sončevim vetrom ter medplanetarnim magnetnim poljem. Kinetična energija sončevega vetra, ki na sliki prihaja z leve, se v udarnem valu deloma spremeni v notranjo energijo plazme, ki se zato močno segreje. Območje za udarnim valom, v katerem se nahaja snov iz sončevega vetra s spremenjenimi fizikalnimi lastnostmi (hitrost, gostota, temperatura), pravimo magnetni ovoj. V tem ovoju snov obteka Zemljino magnetosfero in tako v njo ne prodre. Medplanetarno magnetno polje v magnetnem ovoju prav tako ne prodre v magnetosfero, temveč jo obide. Magnetosfera je torej velika votlina, ki obdaja Zemljo, v kateri ni plazme iz sončnega vetra, magnetno polje je izključno zemeljskega izvora, magnetni tlak na njeni meji pa je v grobem enak dinamičnemu tlaku sočevega vetra.

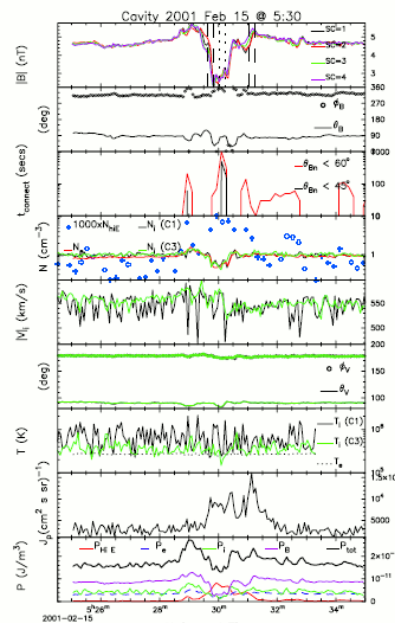


Slika 2. Rezultati hibridnih numeričnih simulacij iz Omidi et al. (2009) (a) in Kajdič et al. (2011) (b). Obe sliki prikazujeta simulirana udarna vala brez trkov in njuni območju pred udarnim valom. Na sliki na levi je začetna konfiguracija taka, da sta medplanetarno magnetno polje in smer potovanja sončevega vetra vzporedna, na sliki na desni pa ta dva vektorja oklepata kot 40° . V obeh primerih sončev veter potuje vzdolž osi x od leve proti desni. Območje označeno kot FCB je kompresivna meja območja pred udarnim valom.

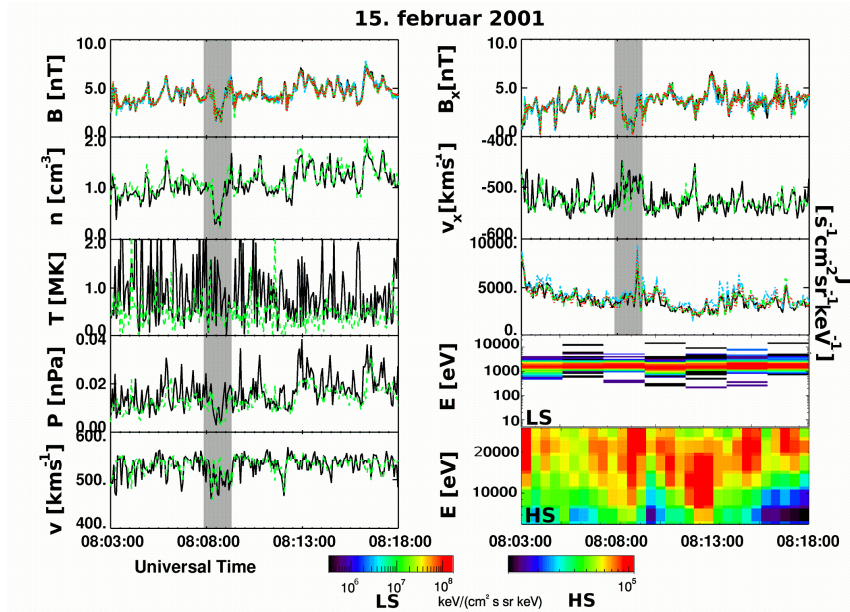
Beli črti na sliki na desni predstavljata meji, do katerih sežejo povratni delci ter valovi z ultra nizko frekvenco.



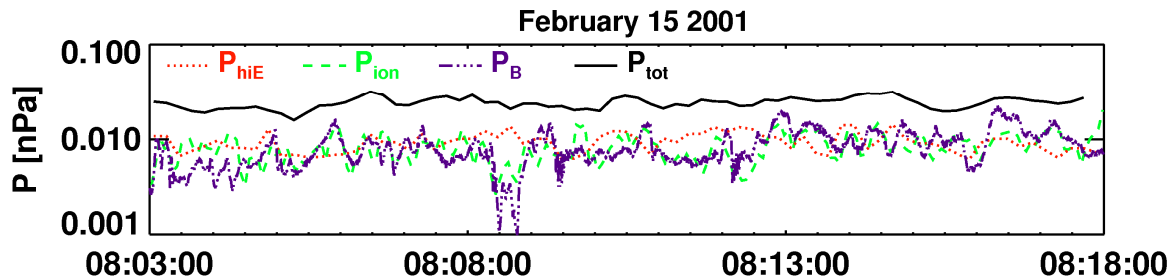
Slika 3. Na siki so shematično predstavljena območja okoli Zemlje: SV označuje neperturbirani sončev veter, ki se razširja vzdolž vodoravne osi od leve proti desni. Roza krivulja predstavlja Zemljin udarni val. Območje pred udarnim valom se začne ob prehodu čez tangentno magnetno silnico (temno modra črta). Le-to se deli na območje s poljem poravnanih delcev (zeleno) in območje difuznih delcev (rumeno). V tem zadnjem območju je magnetno polje zelo turbulentno, poseljujejo pa ga tudi kavitoni (modri križi).



Slika 4. Votlina v območju pred udarnim valom, opazovana s satelitom Cluster 1 dne 15. februarja 2001 (Schwarz et al., 2006). Prikazane so sledeče količine (od zgoraj navzdol): jakost medplanetarnega magnetnega polja v nanoteslih (nT), orientacija MMP, dolžina časovnega intervala med katerim je bila trenutna magnetna silnica povezana z Zemljinim udarnim valom pod kotom $\theta_{Bn} < 45^\circ$ (rdeča črta) oziroma $\theta_{Bn} < 60^\circ$ (črna črta), številčna gostota termičnih delcev (delcev v SV) (cm^{-3} zelena črta) ter gostota suprathermičnih delcev z energijami < 32 keV pomnožena s 1000 (izmerjena z inštrumentom CIS, glej Rème et al., 2001), hitrost sončevega vetra (km^{-1}), smer SV, temperatura SV (K), tok suprathermičnih delcev z energijami > 35 keV (izmerjen z inštrumentom RAPID, glej Wilken et al., 1997), ter totalni tlak (črna črta) ter njegove komponente: tlak magnetnega polja (vijolično), tlak delcev v Svju (zeleno), tlak elektronov (modro) in tlak supertermičnih delcev energijami < 32 keV.



Slika 5. (Vzeta iz Kajdič et al., 2011) Kaviton v območju pred udarnim valom opazovan z vsemi štirimi sateliti misije Cluster. Različne barve predstavljajo podatke satelitov I (črno), II (modro), III (zeleno) in IV (rdečo). Na levi so prikazane naslednje količine: jakost medplanetarnega magnetnega polja (nT), gostota plazme v sončevem vetru (cm^{-3}), temperatura sončevega vetra (MK), termični tlak plazme v sončevem vetru (nPa) ter hitrost sončevega vetra (kms^{-1}). Na desni so prikazani: komponenta magnetnega polja vzdolž zveznice Sonce-Zemlja (nT), komponenta hitrosti sončevega vetra vzdolž taiste zveznice (kms^{-1}), tok supertermičnih delcev z energijo večjo od 32 keV izmerjen z inštrumentom RAPID, energijski spekter delcev v sončevem vetru ter energijski spekter supertermičnih delcev z energijo med 5 keV in 32 keV (izmerjen z inštrumentom CIS). Osenčeni časovni interval označuje čas, ko je bil opažen kaviton.



Slika 6. Slika iz Kajdič et al. (2011) prikazuje delne tlake supertermičnih delcev CIS (P_{hiE}), ionov v sončevem vetru (P_{ion}) in magnetnega polja (P_{B}) ter seštevek vseh delnih tlakov (P_{tot}).