

EKSTREMNI MEDPLANETARNI IZBRUH KORONALNE SNOVI

PRIMOŽ KAJDIČ

Universidad Nacional Autónoma de México, Geofizikalni inštitut, Oddelek za
vesoljsko fiziko, Ciudad de México, Mehika.
E-pošta: kajdic@gmail.com

Sprejeto

29. 06. 2021

Izdano

31. 3. 2022

DOPISNI AVTOR

kajdic@gmail.com

Povzetek Medplanetarni izbruhi koronalne snovi so posledica močnih izbruhov na Soncu, ki v medplanetarni prostor poženejo ogromne količine magnetnega polja in vročega plina iz sončeve korone. Ti izbruhi po medplanetarnem prostoru potujejo s hitrostmi nekaj sto kilometrov na sekundo. Če dosežejo Zemljo, lahko povzročijo najmočnejše geomagnetne nevihte, ki lahko negativno vplivajo na življenja astronautov in na naše tehnološke sisteme. Čeprav vemo, da so za najbolj intenzivne geomagnetne nevihte potrebni hitri izbruhi koronalni snovi ter dolgi časovni intervali z negativno B_z komponento magnetnega polja, pa vseeno še ne vemo dovolj po kakšnimi okoliščinami se to zgodi. V tem članku bom predstavil medplanetarni koronalni izbruh snovi, ki ga je zaznala sonda STEREO A 23. julija 2012 in ki je na razdalji skoraj 1 astronomske enote potoval s hitrostjo ~ 2250 km/s. Poleg tega je magnetometer na STEREO A zaznal magnetno polje z gostoto 109 nT. Ta medplanetarni izbruh koronalne snovi je tako najhitrejši in najintenzivnejši dogodek, ki smo ga zaznali od začetka vesoljske dobe. V članku opišem, da je do tega dogodka prišlo zaradi spleta okoliščin, zaradi česar ga nekateri imenujejo kar „popolna nevihta“.

Ključne besede:

medplanetarni
izbruhi,
koronalna
snov,
geomagnetne
nevihte,
vesoljsko
vreme,
magnetno
polje



1 Uvod

Izbruhi koronalne snovi (IKS), so prehodni pojavi, ki iz sončeve atmosfere v medplanetarni prostor ponesejo ogromne količine plina in magnetnega polja (Gosling in drugi, 1973; Gosling 1990; Hyndhausen 1988; Kahler 1988). Odkriti so bili v 70-tih letih prejšnjega stoletja s koronografom na sondi OSO-7 (Orbiting Solar Observatory, Tousey, 1972). Medplanetarni izbruhi koronalne snovi (MIKS) pa so manifestacije IKSo v medplanetarnem prostoru (Gosling 1990; Neugebauer and Goldstein, 1997; Rust, 1999). Povezavo med IKSi in MIKSi so odkrili Sheeley in drugi (1983). Če je hitrost MIKSo večja od sončevega vetra, ki ga dohitijo, pred njimi nastane medplanetarni udarni val. Posebna kategorija MIKSo so t.i. magnetni oblaki (Burlaga in drugi 1981), katerih tipični „podpisi“ v podatkih inštrumentov vesoljskih sond so i) povečana jakost magnetnega polja, ii) postopna rotacija magnetnega polja, iii) nizke vrednosti parametra β (razmerje med termičnim ter magnetnim tlakom), iv) relativno nizka temperatura ionov, ter v) dve supertermični populaciji elektronov t.i. strahl-a, ki potujeta v nasprotnih si smeri vzdolž magnetnega polja. Pogosto MIKSe spremljajo tudi delci visokih energij.

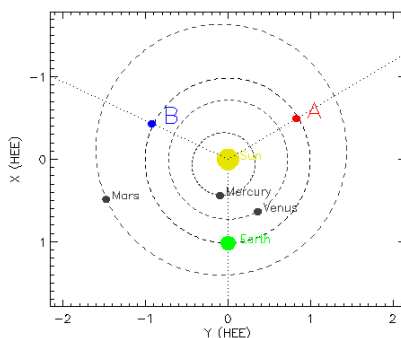
Že nekaj desetletij je znano da če MIKSi dosežejo Zemljo, povročijo t.i. geomagnetne nevihte, to je močne perturbacije zemeljskega magnetnega polja (Webb in drugi, 2000; Huttunen et al., 2005; Cid in drugi 2014). Najmočnejša geomagnetna nevihta moderne dobe je t.i. Carringtonov dogodek, ki se je zgodil leta 1859 (Carrington, 1859). Jakost geomagnetne nevihte merimo z indeksom Dst, ki se izračuna s podatki mreže geomagnetnih observatorijev, ki se nahajajo v bližini ekvatorja (NOAA Space Weather, 2022). Tekom geomagnetnih neviht ima Dst negativne vrednosti. Siscoe in drugi (2006) so izračunali, da je tekom Carringtonovega dogodka Dst dosegel vrednosti -850 nanotesel (nT). Najmočnejša geomagnetna nevihta v 20. stoletju se je zgodila 13. marca leta 1989, ko je Dst dosegel vrednost -548 nT, kar je povzročilo kolaps električnega omrežja v Kanadski provinci Quebec (Cliver in drugi 2004). Takrat je šest milijonov ljudi ostalo brez elektrike celih 9 ur.

Statistične študije IKSov so pokazale, da so največje hitrosti, ki jih te strukture dosežejo v neposredni bližini Sonca približno 3000 km/s (Yashiro in drugi 2004; Gopalswamy in drugi 2005). Na razdalji ene astronomske enote (a.e.) ima večina MIKSov hitrosti okrog 450 km/s, njihova magnetna polja pa dosežejo jakost do nekaj 10 nT, kar je le nekoliko več od tipičnih vrednosti v sončevem vetru (Richardson in Cane, 2010, Liu in drugi 2005). To pomeni, da hitrost MIKSov na poti od Sonca hitro pojema in da je za ekstremno vesoljsko vreme na Zemlji ključnega pomena kaj se s MIKS-i dogaja v medplanetarnem prostoru.

V tem članku analiziram najhitrejši in najintenzivnejši medplanetarni izbruh koronalne snovi, ki je 23. julija 2012 dosegel sonde STEREO A. V sekciji 2 predstavim podatke treh različnih sond, v sekciji 3 jih analiziram, v sekciji 4 pa predstavim zaključke.

2 Opazovanja

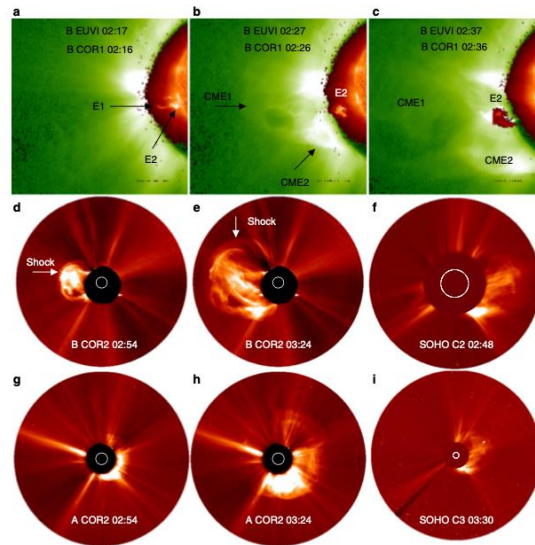
Nov vpogled kako okoliščine v medplanetarnem prostoru privedejo do ekstremnih pojavov nam je podal dogodek (Liu, Kajdič in drugi, 2014a; Liu in drugi, 2014b, Hess in Zhang, 2014), ki ga je 23. julija 2012 zabeležila sonda STEREO A (Kaiser in drugi, 2008). Na sliki 1 lahko vidimo lokacije sond STEREO A in B ter Zemlje. MIKS je potoval v smeri proti sondi STEREO A. Za sondi STEREO B in SOHO (ki se nahaja v orbiti okoli Zemlje, glej Domingo in drugi, 1995) je IKS potoval v ravnini neba v smereh levo (STEREO B) in desno (SOHO) stran od Sonca.



Slika 1: Prikazane so lokacije sond STEREO A in B, Zemlje ter drugih planetov.

Vir: Liu, Kajdič in drugi, 2014a

Na sliki 2a)-c) lahko vidimo posnetke koronografa COR1 sonde STEREO B, ki so bili narejeni v ekstremno ultravioletnem (EUV) delu spektra z valovno dolžino 30.4 nm. Na posnetkih sta vidna 2 eksplozivna filameta E1 in E2, ki sta eksplodirala v razponu 10-15 minut in sta potovala v približno isti smeri. E2 je bil hitrejši in bolj svetel od E1. Na posnetkih koronografa COR2 na slikah 2d) in e) je razvidno, da je E2 dosegel E1 in da sta se nato obe strukturi zlili v eno samo. Na posnetkih sonde SOHO (2f in i) to zlitje sicer ni zlahka razvidno. Sonda STEREO A (2g, h) je zaznala IKS tipa halo.

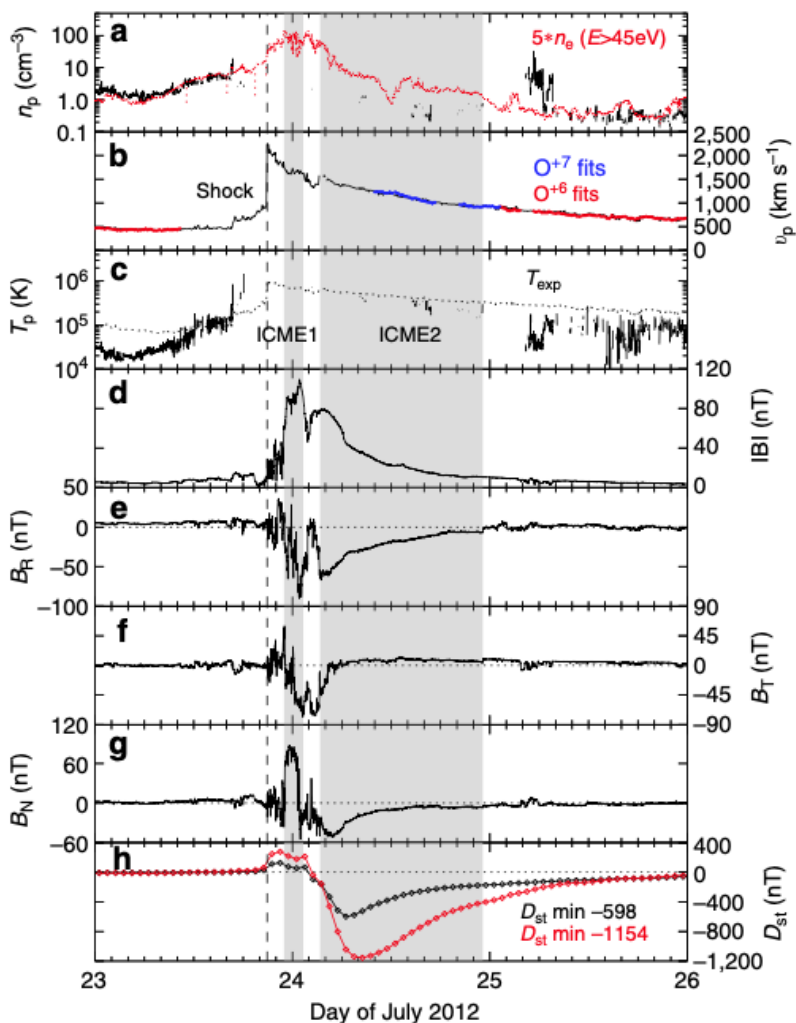


Slika 2: a)-c) Posnetki koronografa COR 1 sonde STEREO B. d), e) Posnetki koronografa COR 2 sonde STEREO B. f), i) Posnetki koronografa C2 sonde SOHO ter g), h) posnetki koronografa COR 2 sonde STEREO A.

Vir: Liu, Kajdič in drugi, 2014a

Slika 3 prikazuje in-situ meritve sonde STEREO A. Navpična črtkana črta označuje prihod udarnega vala, osenčeni intervali pa MIKS. Vidimo lahko, da je tekom MIKSa delčna gostota (panel a) dosegla približno 100 delcev na cm^3 , hitrost (b) ~ 2300 km/s in gostota magnetnega polja ~ 109 nT. Na panelu g) je razvidno, da je komponenta magnetnega polja B_N (v smeri sever-jug glede na ravnino Zemljinega ekvatorja) imela negativne vrednosti (smer jug) tekom časovnega intervala z dolžino ~ 22 ur. Velika hitrost ter negativne vrednosti B_N bi na Zemlji povzročile močno geomagnetno nevihto. Vrednosti izračunanega indeksa Dst so pridobljene z modelom Burton in

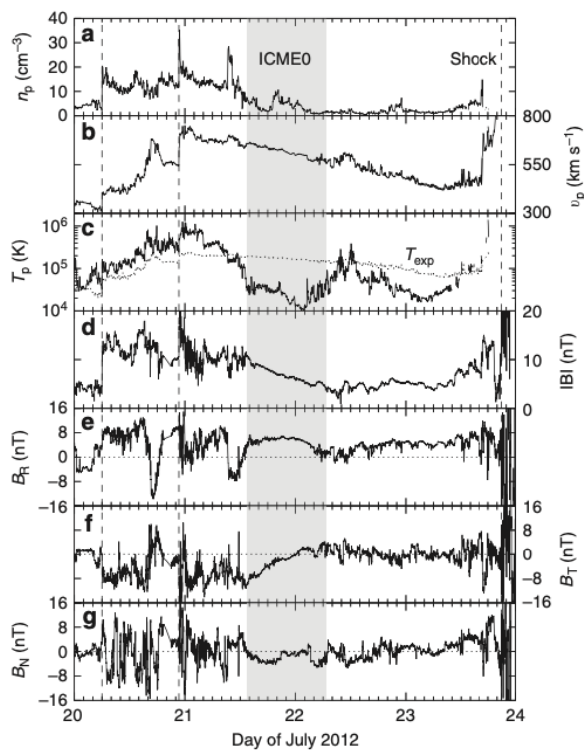
drugi (1975) (rdeča krivulja) in O'Brian in McPherron (2000). Vidimo lahko, da se najbolj ekstremne vrednosti indeksa Dst gibljejo med -598 nT in -1154 nT. Slednja vrednost je dosti bolj negativna kot je ocena za Carringtonov dogodek.



Slika 3: Meritve sonde STEREO A: a) delčna gostota, b) hitrost, c) temperatura, d) magnituda magnetnega polja, e)-f) komponente magnetnega polja v koordinatah RTN ter g) indeks Dst izračunan z modeli.

Vir: Liu, Kajdič in drugi, 2014a

Glede na to, da je MIKS imel rekordno hitrost pri lokaciji sonde STEREO A, medtem ko pa njegova hitrost pri Soncu ni bila rekordna, si je vredno pogledati dogajanje v medplanetarnem prostoru v dneh preden se je dogodek zgodil. Slika 4 prikazuje meritve sonde STEREO A med 21. 6. - 24. 6. 2012. Format slike je enak Sliki 3, z izjemo panela, ki na sliki 3 prikazuje izračunan Dst. Navpične črtkane črte označujejo prihode treh udarnih valov. Osenčen interval, ki je označen tudi z ICME0 označuje obdobje, ko je STEREO A prešel MIKS. V obdobju po ICME0 lahko opazimo dve dejstvi: i) ICME0 je za sabo pustil sončev veter z izjemno nizko gostoto (okrog 1 delec/cm³) ter zelo radialno poravnano magnetno polje (vrednosti B_T in B_N so približno 0 nT, medtem ko se vrednosti radialne komponente B_R gibljejo okoli 7 nT).



Slika 4: Podatki sonde STEREO A v obdobju med 21. 7. - 24. 7. 2012. Od zgoraj dol: a) delčna gostota, b) hitrost protonov, c) temperatura protonov, d) gostota magnetnega polja, e)-f) komponente magnetnega polja v koordinatah RTN.

Vir: Liu in drugi, 2014a

3 Razprava

V prejšnji sekciji sem pokazal, da je dotični MIKS bil posledica zlitja dveh IKSov kmalu po njunem izbruhu. Zlitje hitrejšega IKSa s počasnejšim je moralo imeti kot posledico močno kompresijo obseh IKSov, s čimer lahko razložimo visoke vredosti delčne gostote ter gostote magnetnega polja, ki ju je izmerila sonda STEREO A. Profil gostote magnetnega polja na sliki 3d) prav tako nakazuje da sta bili v MIKSu prisotni dve strukturi. Zelo visoko hitrost MIKSa lahko pojasnimo s podatki STEREO A predstavljenimi na sliki 4: predhodni MIKS, imenovan ICME0, je za sabo pustil sončev veter z zelo nizko gostoto, ter radialno magnetno polje. Oba faktorja sta prispevala k temu, da je dotični MIKS lahko potoval po medplanetarnem prostoru ne da bi občutil večji upor, kar pomeni, da je svojo začetno hitrost skoraj v celosti ohranil. Ekstremni dogodek na razdalji 1 a.e. od Sonca torej ni bil ekstremni dogodek na Soncu. K temu je prispeval splet okoliščin, predvsem MIKS, ki ga je sonda STEREO A zaznala v dneh od 21. 6. - 22.6. 2012.

4 Zaključek

Za pojav ekstremnih MIKSov ni potreben ekstremen IKS. Splet okoliščin, kot je predhodni MIKS, ki je za sabo pustil sončev veter z nizko gostoto ter radialno poravnano magnetno polje, je bil ključen za to, da je dotični MIKS ohranil večino svoje hitrosti na razdalji 1 a.e. od Sonca. Trk ter zlitje dveh IKSov na Soncu pa je prispeval k ekstremnim vrednostim gostote delcev ter magnetnega polja.

Literatura

- Burlaga, L., Sittler, E., Mariani, F. in Schwenn, R. (1981). Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios and IMP 8 observations, *J. Geophys. Res.*, 86, 6673–6684.
- Burton, R. K., McPherron, R. L. in Russell, C. T. (1975). An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst. *J. Geophys. Res.* 80, 4204–4214.
- Carrington, R. C. (1859). Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 20, 13–15.
- Cid C, Palacios J, Saiz E, Guerrero A in Cerrato Y. (2014). *On extreme geomagnetic storms*. *J. Space Weather Space Clim*, A28.
- Cliver, E. W. in Svalgaard, L. (2004). The 1859 solar-terrestrial disturbance and the current limits of extreme space weather activity. *Solar Phys.* 224, 407–422.
- Domingo, V., Fleck, B. in Poland, A. I. (1995). The SOHO mission: An overview. *Solar Phys.* 162, 1–37.

- Gopalswamy, N. in drugi. (2005). Coronal mass ejections and other extreme characteristics of the 2003 October–November solar eruptions. *J. Geophys. Res.* 110, A09S15.
- Gosling, J. T., Pizzo, V. in Bame, S. J. (1973). Anomalous low proton temperatures in the solar wind following interplanetary shock waves—evidence for magnetic bottles?, *J. Geophys. Res.*, 78(13), 2001–2009. Pridobljeno s <https://10.1029/JA078i013p02001>.
- Gosling, J.T. (1990). Coronal Mass Ejections and Magnetic Flux Ropes in Interplanetary Space. In *Physics of Magnetic Flux Ropes* (eds C.T. Russell, E.R. Priest and L.C. Lee). Pridobljeno s <https://doi.org/10.1029/GM058p0343>
- Hess in Zhang (2014). Stereoscopic Study of the Kinematic Evolution of a Coronal Mass Ejection and Its Driven Shock from the Sun to the Earth and the Prediction of Their Arrival Times, *ApJ*, 792, 49.
- Hundhausen, A.J. (1988) v V.J. Pizzo, T.E. Holzer, and D.G. Sime (eds.), *Proceedings of the Sixth International Solar Wind Conference, Tech. Note NCAR/TN-306+Proc*, 181, Natl. Cent. Atmos. Res., Boulder, CO.
- Huttunen, K. E. J., Schwenn, R., Bothmer, V. in Koskinen, H.E. J. (2005). Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds in their rising, maximum and early declining phases of solar cycle 23, *Ann. Geophys.*, 23, 625–641. Pridobljeno s <https://doi:10.5194/angeo-23-625-2005>
- Kahler, S. (1988) v V.J. Pizzo, T.E. Holzer, and D.G. Sime (eds.), *Proceedings of the Sixth International Solar Wind Conference, Tech. Note NCAR/TN-306+Proc*, 181, Natl. Cent. Atmos. Res., Boulder, CO, p. 215.
- Kaiser, M. L. in drugi (2008). The STEREO mission: an introduction. *Space Sci. Rev.* 136, 5–16.
- Liu, Y. in drugi (2014b). *Sun-to-Earth Characteristics of Two Coronal Mass Ejections Interacting Near 1 AU: Formation of a Complex Ejecta and Generation of a Two-step Geomagnetic Storm*, *ApJL* 793 L41.
- Liu, Y., Kajdič, P., Luhmann, J. in drugi. (2014a). Observations of an extreme storm in interplanetary space caused by successive coronal mass ejections. *Nat Commun* 5, 3481. Pridobljeno s <https://doi.org/10.1038/ncomms4481>
- Liu, Y., Richardson, J. D. in Belcher, J. W. (2005). A statistical study of the properties of interplanetary coronal mass ejections from 0.3 to 5.4AU. *Plan. Space Sci.* 53, 3–17.
- Neugebauer, M. in Goldstein, R. (1997) v N. Crooker, J.A. Joselyn, and J. Feynman (eds.), *Coronal Mass Ejections, Geophys. Monogr. Ser.*, AGU, Washington, DC, 99, p. 245.
- NOAA Space Weather. (2022). Pridobljeno s <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/dst.html>
- O'Brien, T. P. in McPherron, R. L. (2000). An empirical phase space analysis of ring current dynamics: solar wind control of injection and decay. *J. Geophys. Res.* 105, 7707–7720.
- Richardson, I. G. in Cane, H. V. (2010). Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): Catalog and summary of properties. *Solar Phys.* 264, 189–237.
- Rust, D.M. (1999) *Geophys. Monogr.* 109, 213.
- Sheeley Jr., N. R., Howard, R. A., Koomen, M. J., Michels, D. J., Schween, R., Muhlauser, K. H. in Rosenbauer, H. (1983). Coronal mass ejections and interplanetary disturbances, *B. Am. Astron. Soc.*, 15, 699.
- Siscoe, G., Crooker, N. U. in Clauer, C. R. (2006). Dst of the Carrington storm of 1859. *Adv. Space Res.* 38, 173–179.
- Stereo Science Center. (2022). Pridobljeno s https://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/cgi-bin/make_where_gif

- Tousey, R. (1972). The solar corona, in: Space Research XIII, Proceedings of open meetings of working groups on physical sciences of the 15th plenary meeting of COSPAR, Madrid, Spain, 10–24 May, edited by: Rycroft, M. J. and Runcorn, S. K., 713–730, Akademie-Verlag, Berlin.
- Webb, D. F., Cliver, E. W., Crooker, N. U., St. Cyr, O. C. in Thomson, B. J. (2000). Relationship of halo coronal mass ejections, magnetic clouds, and magnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 105, 7491–7508.
- Yashiro, S. in drugi. (2004). A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft. *J. Geophys. Res.* 109, A07105.