

# Kozmické počasie: slnečný vietor a magnetosféra Zeme

I. Dorotovič, SÚH Hurbanovo, dorotovic@suh.sk

## Abstrakt

Hlavným zdrojom zmien v kozmickom počasí (KP) je Slnko. V slnečno-zemskom systéme však zohráva dôležitú úlohu okrem javov na Slnku aj mnoho procesov v medziplanetárnom i okolozemskom priestore, ktoré sú zvyčajne zložitým spôsobom prepojené. V prehľadovom referáte sú diskutované niektoré vybrané aspekty vzťahu medzi turbulentnými procesmi v slnečnom vetre a javmi v magnetosfére Zeme. Magnetická turbulencia v slnečnom vetre a výskyt intermitentnej magnetickej turbulencie v plazmovej vrstve magnetosféry Zeme majú negaussovské vlastnosti, ktoré môžu byť skúmané na základe tvaru pravdepodobnostnej rozdeľovacej funkcie (Probability Distribution Function – PDF) získanej z dvojbodových rozdielov intenzity magnetickeho poľa. Prepojenie medzi týmito dvomi plazmovými prostrediami sa prejavuje na rôznych časových a priestorových škálach, ale ukazuje sa, že silnejšie prepojenie je na menších časových škálach. Mnohí autori sa zaoberajú 3-D MHD modelovaním prieniku CME (Coronal Mass Ejection – výron koronálnej hmoty) od Slnka do vzdialenosti 1 AU. Novú kvalitu do tejto oblasti výskumu prináša napr. projekt STEREO. Diskutovaná je aj problematika Forbushových poklesov (Forbush Decrease – FD) úrovne kozmického žiarenia a možnosť skúmania s nimi súvisiacich javov z hľadiska použitia kombinácie údajov z pozemských observatórií a družicových prístrojov.

## 1. ÚVOD

Hlavným zdrojom zmien v kozmickom počasí (KP) je Slnko. V slnečno-zemskom systéme má dôležitú úlohu okrem javov na Slnku aj mnoho procesov v medziplanetárnom i okolozemskom priestore, ktoré sú zvyčajne zložitým spôsobom prepojené.

V predchádzajúcej prehľadovej práci (Dorotovič, 2005) bol zostavený prehľad o základných javoch a následných efektoch KP, ako aj o existujúcich a pripravovaných monitorovacích službách. V tomto nadväzujúcom príspevku sú diskutované najmä tieto témy týkajúce sa problematiky výskumu KP:

- vzťah medzi turbulentnými procesmi v slnečnom vetre a javmi v magnetosfére Zeme;
- 3-D MHD (magnetohydrodynamické) modelovanie prieniku CME (Coronal Mass Ejection – výron koronálnej hmoty) od Slnka do vzdialenosti 1 AU;
- Forbushove poklesy (Forbush Decrease – FD) úrovne kozmického žiarenia (KŽ).

## 2. TURBULENCIA V SLNEČNOM VETRE A MAGNETOSFÉRE ZEME

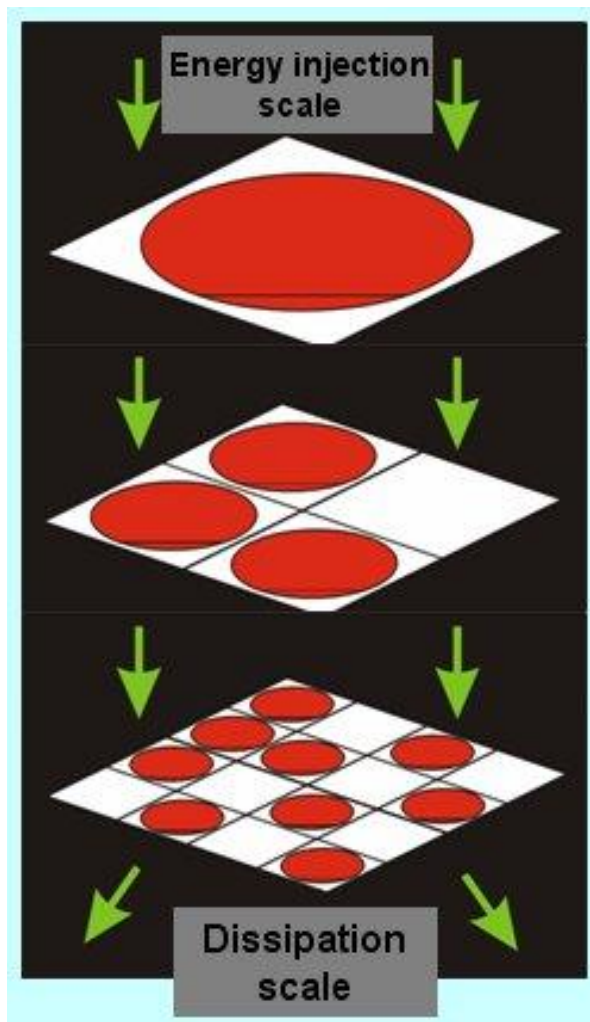
O turbulencii sa niekedy hovorí ako o poslednom nevyriešenom probléme klasickej fyziky. Fyzikálne mechanizmy turbulencie v tekutinách skúmal už Leonardo da Vinci okolo r. 1500. Zvyčajný fyzikálny model turbulencie je taký, že predpokladáme nestlačiteľ-

nosť tekutiny, pričom v takom prípade platia Navier–Stokesove rovnice. Prítomnosť turbulencie charakterizuje vysoká hodnota Reynoldsovoho čísla:

$R = V L / \nu \gg 1$ ,  $V$  – rýchlosť,  $L$  – lineárna škála,  $\nu$  – kinematická viskozita. Turbulencia je vlastne vírivý stav pohybu tekutiny, plynu, alebo plazmy, kde sily, ktoré udržiavajú vírivý pohyb sú väčšie ako sily, ktoré sa snažia tento pohyb utlmiť.

Hydrodynamickú (HD) turbulenciu skúmal už Kolmogorov (1941). Pri vzniku turbulencie vstupuje energia do ľubovoľného systému na veľkej škále (vstupná škála – injection scale) a prenáša sa na stále menšie škály (prechodná škála – inertial scale) až po útlm na najmenších škálach (disipačná škála – dissipation scale). Turbulencia je však výrazná, keď vstupné škály sú mnohonásobne (o niekoľko rádov) väčšie ako disipačné škály ( $L \gg l_d$ ). Platia pritom nasledovné zákonitosti: 1. miera disipácie energie nezávisí od viskozity tekutiny; 2. energia sa neprenáša priamo z najväčšej škály na disipačnú, ale postupnými interakciami medzi stále menšími vlnovými číslami.

Hoci existujú mnohé analógie medzi HD a MHD prípadom, turbulencia sa zvyčajne vyvíja značne odlišne v magnetickej prostredí. V MHD plazme ovplyvňuje šírenie vln okrem zmien tlaku, hustoty a teploty aj magnetickej tlak. V takej plazme sa šíria pozdĺž magnetickej siločiar zvukové, Alfvénove a magnetoakustické vlny. MHD turbulencia má hlavnú úlohu v dynamike astrofyzikálnych plazmových prostredí na širokej lineár-



Obr. 1. Schéma multiškálovej turbulentnej energetickej kaskády.

nej škále od zlomkov kilometra až po kiloparseky. Prehľad pokroku v oblasti MHD turbulencie a ohrevu astrofyzikálnej plazmy (s dôrazom na úlohu Alfvénových vln a MHD turbulencie pri ohreve koróny a urýchlení slnečného vetra) publikoval napr. Velli (2003).

Interakciu slnečného vetra (SV) a magnetosféry Zeme (MZ) sa ako jeden z prvých zaoberal E. Parker, ktorý sformuloval teóriu slnečného vetra (Parker, 1958a). Dynamické vlastnosti slnečného vetra pohybujúceho sa okolo geomagnetického poľa skúmal pomocou efektívnej viskozity, od ktorej závisí hrúbka prechodovej vrstvy do magnetosféry Zeme (magnetopauza).

### Slnčný vietor

- je takmer bezrýchlová plazma pochádzajúca zo Slnka
- typické rýchlosti:  $330 - 530 \text{ km s}^{-1}$
- magnetické pole je unášané plazmou zo Slnka, medziplanetárne magnetické pole (Interplanetary Magnetic Field – IMF)

- zmeny v parametroch slnečného vetra – na časových škálach 1 deň ako aj počas 11-ročného slnečného cyklu.
- veľkoškálové štruktúry: 1. korotujúce interakčné oblasti / vysokorýchlostné prúdy slnečného vetra; 2. výrony koronálnej hmoty (Coronal Mass Ejections – CME).
- je turbulentný, vo vzdialenosti 1 AU od Slnka: fluktuácie rýchlosti niekoľko %, fluktuácie magnetického poľa 50 %.

Turbulencia slnečného vetra je intenzívne skúmaná teoreticky i pozorovateľsky: prehľadové práce publikovali napr. Tu and Marsch (1993), Veltri (1994), Goldstein et al. (1995), Bavassano (1996a,b), Bruno (1997), Goldstein and Roberts (1999), Goldstein (2001), Oughton (2003), Bruno and Carbone (2005). Goldstein and Roberts (2005) sa zaoberali MHD modelovaním takejto turbulencie, Bruno et al. (2006), Verdini and Velli (2007) skúmali alfvénovská turbulencia v slnečnom vetre, porovnávali výsledky pozorovania a modelovanie nelineárneho vývoja Alfvénových vln šíriacich sa fotosférou, korónou a slnečným vetrom až do 1 AU. Pozorovanie turbulencie a anomálneho škálovania v slnečnom vetre analyzovali Bruno et al. (2007).

### Magnetosféra Zeme

Už v roku 1600 W. Gilbert (Londýn) predpokladal, že Zem je obrovský magnet. V roku 1892 skonštruoval G. E. Hale spektroheliograf a usudzoval, že existuje prepojenie medzi slnečnými erupciami a geomagnetickými búrkami. V rokoch 1900 – 1903 vykonal K. Birkerland experimenty vo vákuovej komore so zväzkom elektrónov namiereným na zmagnetizovanú guľu („terrella“). Elektróny dopadali na guľu v mieste magnetických pólov, z toho vyvodil záver, že polárna žiara je vlastne vyvolaná zväzkom elektrónov zo Slnka. Neskôr, v roku 1958, Van Allen objavil vďaka meraniam z družice Explorer 1 radiačné pásy Zeme; jeho výskum sa uskutočnil v rámci Medzinárodného geofyzikálneho roka (International Geophysical Year – IGY). O rok nato (1959) T. Gold navrhol názov magnetosféra.

Plazmová vrstva (plasmashet) je vrstva plazmy v magnetosfére Zeme, ktorá ju rozdeľuje na dve časti. Magnetické prostredie Zeme (geomagnetické pole – GMP) je zriedka kludné, nastávajú dost' často magnetické búrky (porušenosť magnetického poľa pozorovaná na celej Zemi), resp. magnetické subbúrky (lokálna porušenosť). V obdobiach zvýšenej slnečnej aktivity (SA) prenikne do magnetosféry Zeme mnoho energetických častíc, nárast prstencového prúdu spôsobí pokles geomagnetického poľa a nasleduje magnetická búrka, pričom jej intenzita je úmerná energii prstencového prúdu. Praktickým ukazovateľom je v tomto prípade napr. tzv. Dst index (*Disturbance Storm Time index*), ktorý udáva hodinový priemer poklesu intenzity magnetického poľa na povrchu Zeme (Sugiura, 1964). Na jeho výpočet sa využívajú merania z magnetometrov blízko magnetického rovníka. Niektorými charakteristikami porušnosti

magnetosféry z hľadiska extrémneho kozmického počasia sa zaoberala Prigancová (2006).

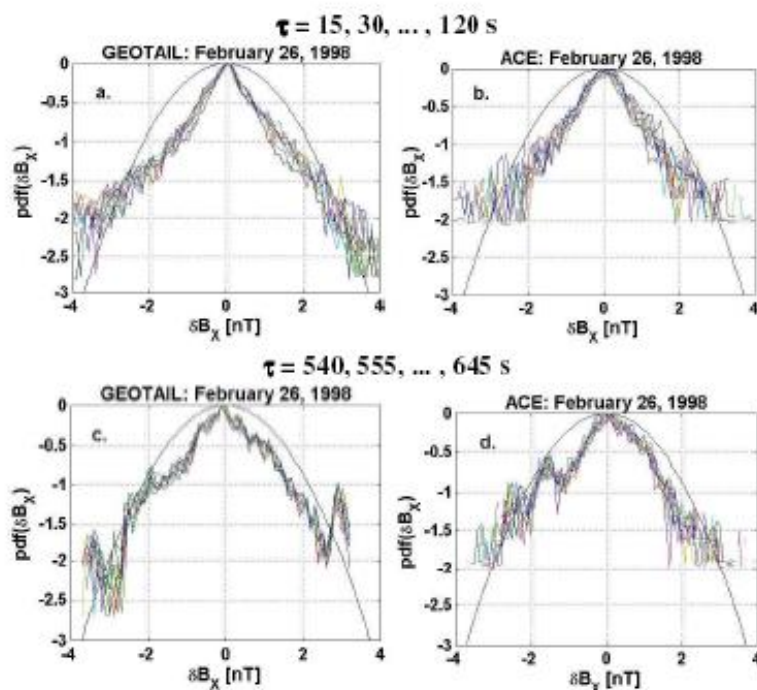
Pre modelovanie sú však dôležité údaje s väčším časovým rozlíšením (1 minútové údaje). Na to je vhodný napr. index SYM-H, pri určení ktorého je od meraného GMP odčítaná konštantná zložka a denná variácia. Ako výsledok potom zostáva poruchová, dĺžkovo symetrická, zložka (priemer zo 6 staníc). Jankovičová, Vörös a Šimkanin (2008) skúmali vplyv turbulencie slnečného vetra na geomagnetickú aktivitu. Zistili, že intermitencia turbulencie slnečného vetra vplyva na magnetickú rekonekciu v magnetopauze a to má zásadný vplyv na účinnosť prepojenia slnečný vietor – magnetosféra Zeme. Celkove identifikovali v skúmanom období 54 intervalov, ktoré rozdelili podľa geomagnetickej aktivity na kľudné ( $|B_z| < 10$  nT,  $|SYM-H| < 20$  nT) a aktívne ( $B_z$  s hodnotou  $B_z < 0$  nT počas viac ako 2 h,  $SYM-H < -20$  nT). Ukázali tiež, že *skewness* (nesúmernosť) pravdepodobnostnej rozdeľovacej funkcie (PRF) nie je významným geoefektívnym parametrom. Naopak *kurtosis* (špicatosť) z magnetických fluktuácií slnečného vetra vykazuje nárast smerom k malým časovým škálam pre  $B_z$  zložku IMF aj pre index SYM-H, to znamená, že je významným geoefektívnym parametrom.

Vlastnosti intermitencie (nehomogénnej turbulencie) v slnečnom vetre skúmali napr. Leubner a Vörös (2004) a Sorriso-Valvo et al. (1999). Intermitenciu v plazmovej vrstve analyzovali napr. Borovsky et al. (1997) a Consonini (2004). PRF sú v oboch plazmových prostrediach negaussovské, ale menia sa so škálou. Turbulencia v slnečnom vetre a magnetosfére Zeme je všeobecne intermitentná, z toho vyplýva, že na skúmanie jej vlast-

ností potrebujeme využiť štatistiku vyššieho rádu (*skewness* a *kurtosis*).

Lui (2001) vypracoval prehľad výskumov o škálovacích vlastnostiach magnetosféry Zeme a aurorálnych javoch, pričom použil mnohé moderné metódy analýzy: fraktály, multifraktály, vlnková transformácia, vlnková koherencia a pod. Borovsky and Funsten (2003) sa zaoberali úlohou turbulencie v SV pri prepojení SV a MZ. Burlaga a F.-Viñas (2004) skúmali na základe údajov z roku 2003 (t.j. počas zostupnej fázy cyklu SA) multiškálovú štruktúru fluktuácií rýchlosti SV a intenzity magnetického poľa vo vzdialenosti 1 AU od Slnka. Vörös et al. (2003) zistili, že intermitentné fluktuácie magnetického poľa vykazujú prechodné, lokalizované a multiškálové vlastnosti. Turbulencia môže pritom ovplyvniť prenos energie, hmoty a momentu. Magnetosféra je systém, ktorý sa nachádza v stave samoorganizovanej kritickosti (Angelopoulos et al., 1999). Tento popis zodpovedá vlastnostiam plazmových tokov v magnetickom chvoste a ich variabilite.

Magnetická turbulencia v SV a výskyt intermitentnej magnetickej turbulencie v plazmovej vrstve magnetosféry Zeme vykazuje negaussovské vlastnosti. Tieto dve prostredia môžu byť prepojené na základe skúmania tvaru pravdepodobnostnej rozdeľovacej funkcie (Probability Distribution Function – PDF) získanej z dvojbodových rozdielov intenzity magnetického poľa (Dorotovič a Vörös, 2004). Dorotovič a Vörös (2005, 2006) vykonali štatistický výskum turbulentných procesov v SV a MZ Zeme v rokoch 1996 – 2002. Prepojenie medzi týmito dvomi plazmovými prostrediami je evidentné na rôznych časových a priestorových škálach, silnejšie prepojenie je však na menších škálach (obr. 2).

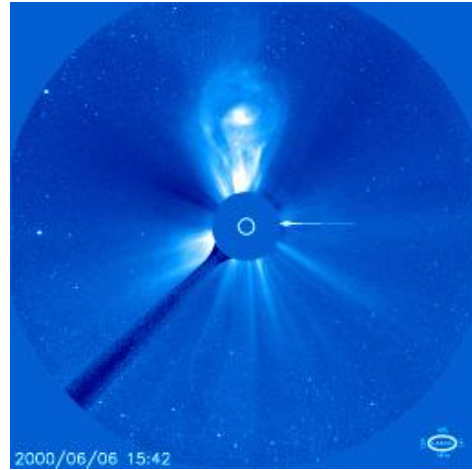


Obr. 2. Krivky PRF určené na dvoch časových škálach pre rozdiely X-ovej zložky magnetického poľa v plazmovej vrstve Zeme (a,c: GEOTAIL) a Z-ovej zložky magnetického poľa v slnečnom vetre (b,d: ACE) – 26.2.1998; gaussovské PRF sú zobrazené tenkou spojitou čiarou.

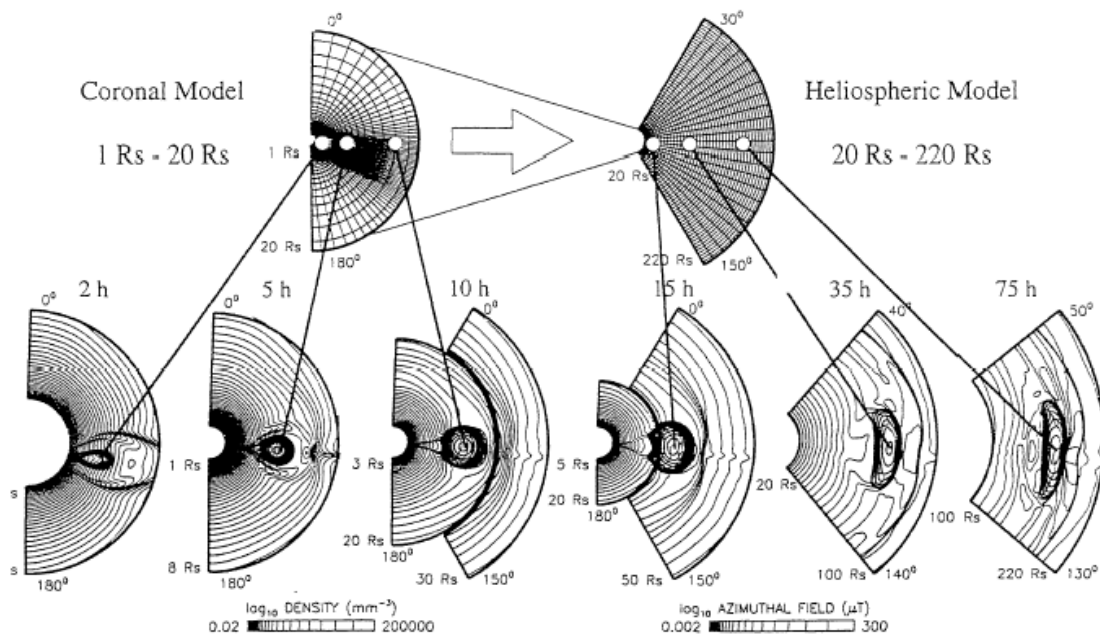
### 3. MHD MODELOVANIE PRIENIKU CME OD SLNKA DO VZDIALENOSTI 1 AU

Donedávna sa za hlavný zdroj zmien v KP pokladali erupcie na Slnku (uvoľnenie UV a röntgenového žiarenia, ako aj elementárnych častíc – protóny, elektróny). Gosling (1993) predpokladal, že hlavnú úlohu pri javoch KP zohrávajú CME. Prejavom CME v medziplanetárnom priestore sú medziplanetárne výrony korónnej plazmy (ICMEs – Interplanetary Coronal Mass Ejections). Malandraki a kol. (2001, 2003) skúmali, či ICME sú magnetické štruktúry už oddelené od slnečnej koróny, alebo (aspoň čiastočne) ešte v nej ukotvené.

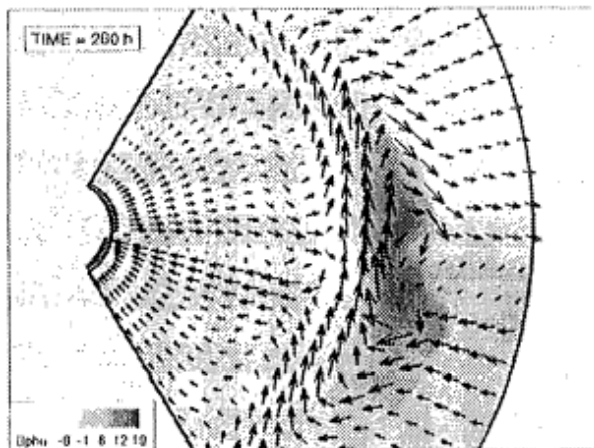
V posledných rokoch bol dosiahnutý tiež výrazný pokrok v modelovaní CMEs i ICMEs (napr. De Sterck a Poedts, 1999; González-Esparza a kol., 2003; Odstrčil a Pizzo, 2002; Odstrčil a kol., 2003; Vandas, 2003; Vandas a Odstrčil, 2004, Manchester et al., 2004).



Obr. 3. CME pozorované koronografom LASCO na vesmírnom observatóriu SOHO.



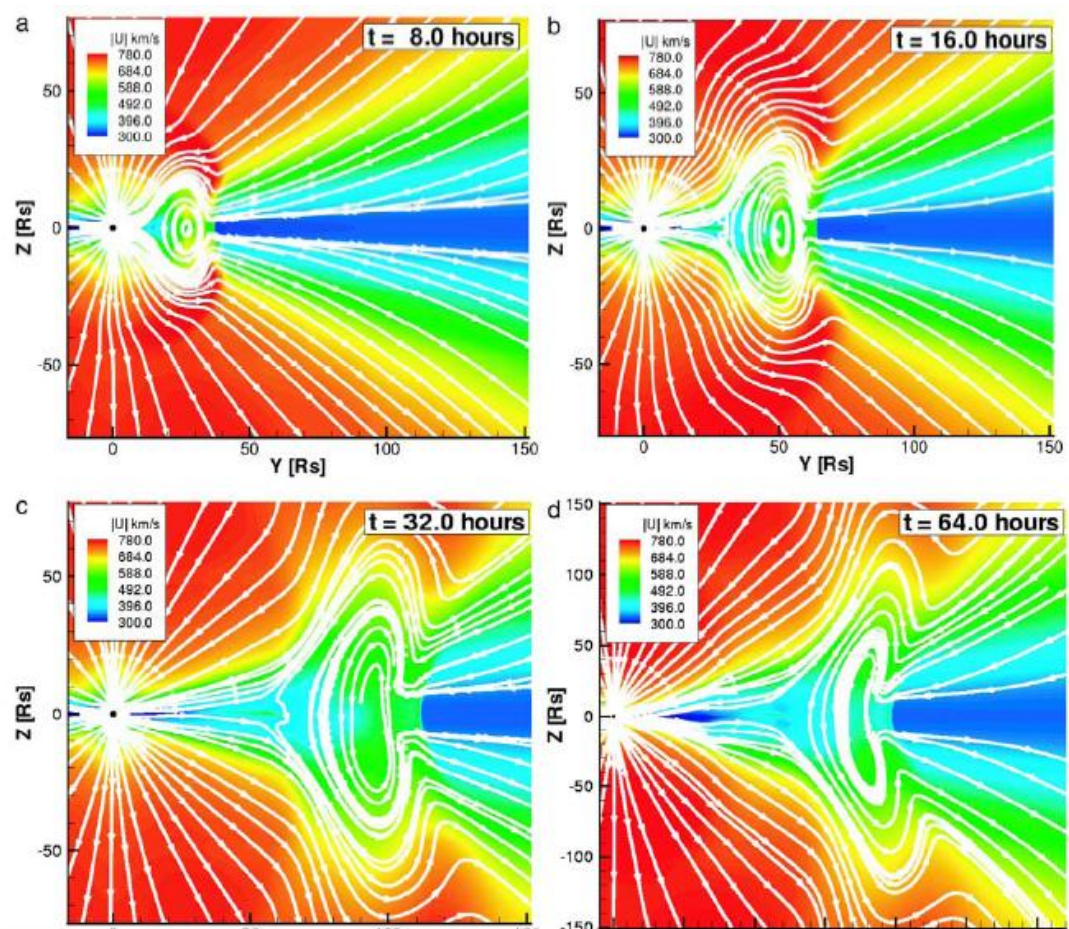
Obr. 4. Ukážka modelovania prieniku CME od miesta vzniku v slnečnej koróne až do oblasti Zeme (Odstrčil a Pizzo, 2002).



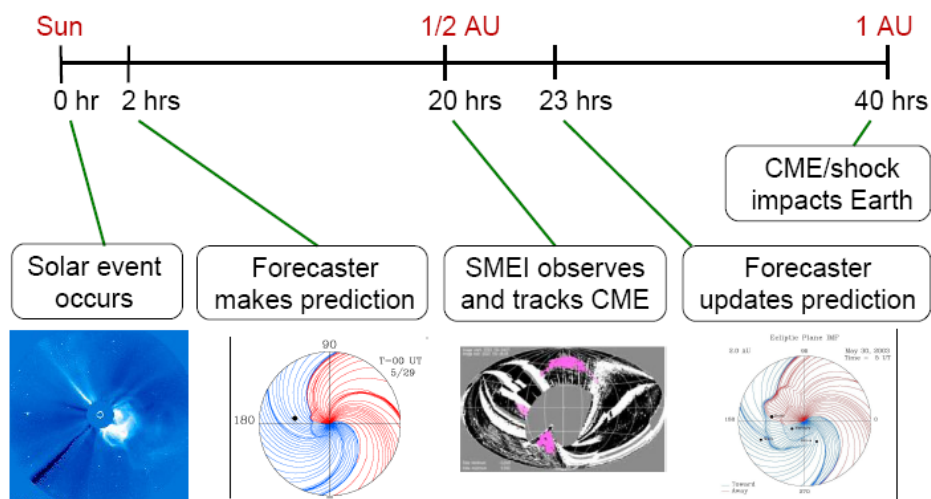
Obr. 5. Celkový pohľad na medziplanetárnu poruchu vytvorenú slnečnou magnetickou erupciou (Odstrčil a kol., 2003).

V súčasnosti sa nachádzajú na obežnej dráhe Zeme okolo Slnka dve družice STEREO, ktoré prinášajú novú kvalita pozorovaní CME a ICME (možno ich pozorovať v podstate od Slnka až po Zem). Podrobnosti sú na internetovej stránke <http://stereo.gsfc.nasa.gov/>.

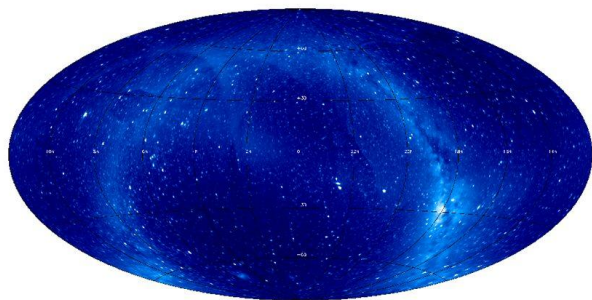
Fry a kol. (2006) vytvorili kombináciu simulácií pomocou 3-D kinematického modelu slnečného vetra Hakamada-Akasofu-Fry (HAFv.2 model) a obrázkov z prístroja Solar Mass Ejection Imager (SMEI) na družici Coriolis. SMEI zaznamenáva prechodné poruchy v slnečnom vetre zobrazením svetla rozptýleného (Thomsonovým rozptylom) na voľných elektrónoch plazmy slnečného vetra – 3 CCD kamery, počas obletu za 102 minút je nasnímaná takmer celá obloha.



Obr. 6. Modelovanie časového vývoja CME (Manchester et al., 2004).



Obr. 7. Kombinácia simulácií pomocou 3-D kinematického modelu slnečného vetra HAFv.2 a obrázkov z prístroja SMEI (Fry a kol., 2006).



Obr. 8. Ukážka pozorovania pomocou prístroja SMEI.

#### 4. FORBUSHOVE POKLESY KOZMICKÉHO ŽIARENIA

Prvú indikáciu súvislosti medzi poklesom KŽ pozorovaným na dvoch meracích stanicích a horizontálnou zložkou geomagnetického poľa (GMP) publikoval Forbush (1937). *Forbushov pokles* (Forbush Decrease – FD) prebieha najprv ako prechodný pokles s relatívne rýchlym znížením úrovne KŽ, následne nastáva pomalšia obnova pôvodnej úrovne na škále niekoľkých dní (zvyčajne po erupcii na Slnku, resp. CME šíriacou sa medziplanetárnym priestorom).



Obr. 9. Ukážka urania úrovne kozmického žiarenia pomocou neutrónového monitora na Lomnickom štíte (ÚEF SAV, Košice).

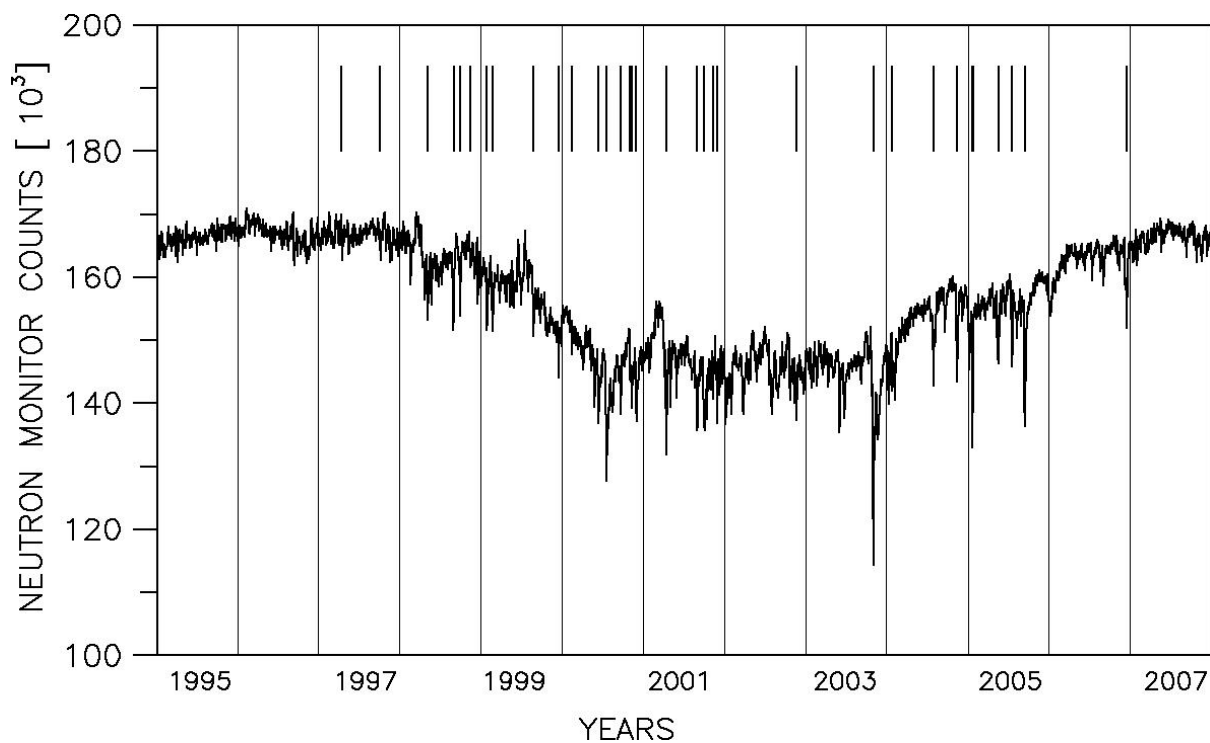
FD sa zvyčajne interpretuje ako difúzna konvekcia KŽ v porušenom medziplanetárnom magnetickom poli (MMP) spôsobená slnečnou erupciou (Nagoshima et al., 1990). Teórie FD možno nájsť napr. v prácach Gold (1960), Parker (1963), Nishida (1983), Chih and Lee (1986). Ukazuje sa však, že príčiny variácií KŽ môžu byť rôznorodé: medziplanetárne rázové vlny, vysokorýchlostné prúdy slnečného vetra, prítomnosť magnetických oblakov a iné javy. Tieto procesy sú opísané napr. v prácach Parker (1958b), Lockwood (1971), Dorman a Shogenov (1986), Zhang a Burlaga (1988), Iucci et al. (1986, 1989), Badruddin et al. (1991), Lockwood et al. (1991), Leroux and Potgieter (1991), Cane and Richardson (1995), Ifedili (1998), Wibberenz et al. (1998). Kudela and Brenkus (2004) zistili, že neexistuje stopercentné prepojenie medzi FD a geomagnetickými búrkami. Badruddin (2006) skúmal vzťah medzi geomagnetickými búrkami a FD, najmä takými, ktoré boli spôsobené medziplanetárnymi rázovými vlnami. Yadav a Kumar (2007) analyzovali súvislosti veľkých poklesov KŽ s geomagnetickými búrkami za dlhé obdobie. Koushik a Raychaudhuri (2007) sa zaoberali vlnkovou analýzou údajov FD za obdobie 1967 – 2003, pričom zistili periodicitu 5 – 6, 11, 13, 15 a 24 rokov. Periodicita 5 – 6 rokov bola zistená aj pre údaje o slnečných erupciách, najväčších protónových javoch a slnečnom neutrínovom toku. To znamená, že môže existovať isté prepojenie. Spoločný pôvod by mohol byť v pulzáciách jadra Slnka.

Dorotovič a kol. (2008a) sa zaoberali skúmaním podmienok v okolitom kozmickom priestore (kozmicke počasie) počas dvoch FD kozmického žiarenia 17.-18. januára a 21.-22. januára 2005. Rekonštrukcia vývoja javov KP v januári 2005 naznačila predpoklad, že mož-

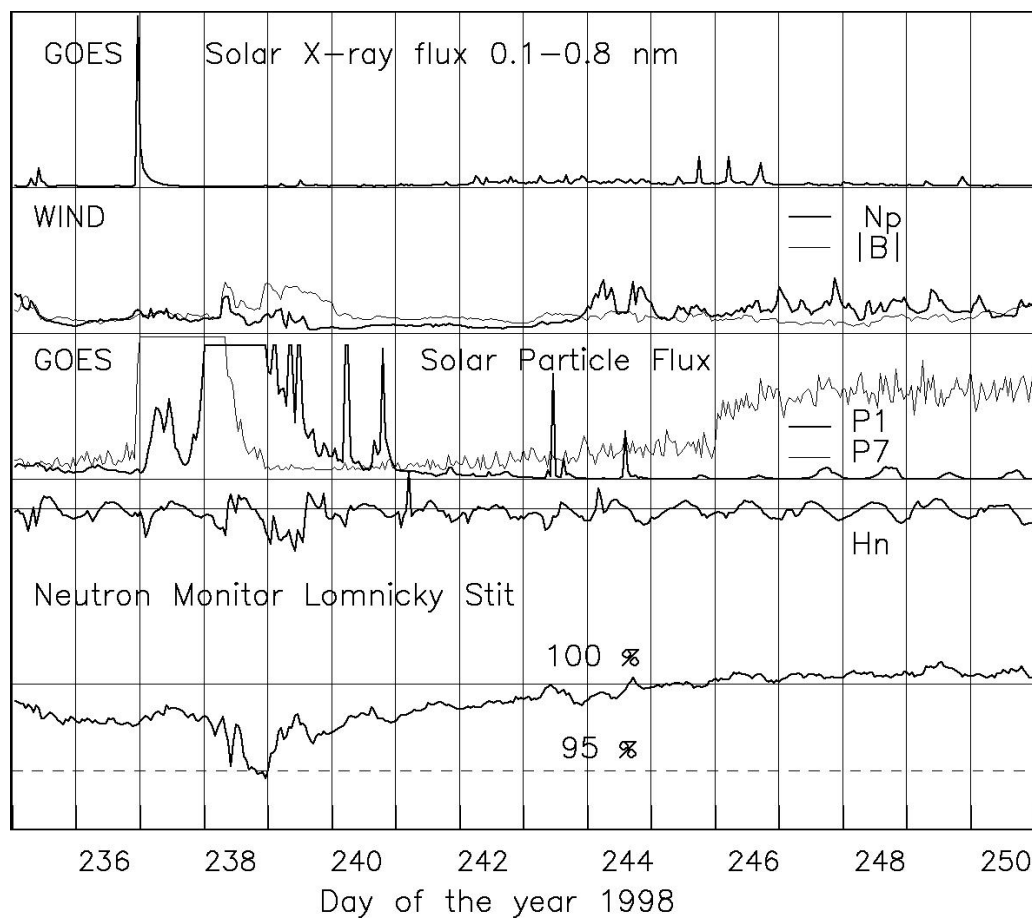
nou príčinou FD je absorpcia primárneho kozmického žiarenia v hmote CME prechádzajúcej okolozemským kozmickým priestorom, prípadne v hmote, zachytenej v radiačných pásoch. Môžeme potom uvažovať, že doba rozptylu hmoty z radiačných pásov je tým dlhšia, čím je väčšie zastúpenie protónov s vyššou energiou. Tým by sa dal vysvetliť rozdiel v dĺžke návratu FD1 (8 dní) a FD2 (24 hodín), lebo pri FD2 sa neregistrovali protóny s vyššou energiou. V ďalšej práci (Dorotovič a kol., 2008b) bolo analyzovaných 34 javov v období 1995 – 2007 (obr. 10) na overenie, či ich priebeh môže podporiť predošlé tvrdenia. Analýza priebehu FD však nepotvrdila hypotézu, publikovanú v práci Dorotoviča a kol. (2008a) o rôznom návratovom čase po FD v závislosti od energetického rozdelenia častíc, prenikajúcich do radiačných pásov. Jednak preto, že doba návratu sa vo väčšine prípadov nedá určiť pre ďalšie variácie, ktoré sa vyskytujú počas návratu a jednak preto, že protónový kanál P7 (GOES) je buď zahľtený z predchádzajúceho záblesku, alebo je na prahovej hodnote prístroja. Analýza priebehu FD vo vybraných obdobiach však ukázala, že obyčajne je FD sprevádzaný prudkým vzrastom početnosti protónov v kanáli P1 (GOES) a súčasným poklesom, často až na prahovú hodnotu v kanáli P7 (obr. 11).

#### 5. ZÁVER

V práci sme ukázali výsledky výskumu kozmického počasia z hľadiska skúmania turbulentných procesov v slnečnom vetre a javov v magnetosfére Zeme, 3-D MHD modelovania prieniku CME od Slnka do vzdiale-



Obr. 10. Priebek úrovne kozmického žiarenia z NM Lomnický štít za obdobie 1995 – 2007 s označením skúmaných FD.



Obr. 11. FD v 101. dni roku 2001: priebek meraní NM s rozlíšením 1 h (dolná časť y-ovej osi), zhora: slnečné X žiarenie (GOES), hustota protónov  $n_p$  a intenzita medziplanetárneho magnetického poľa  $|B|$  (WIND), toky protónov P1, P7 zložka magnetického poľa  $H_n$  (GOES).

nosti 1 AU, ako aj z hľadiska výskumu vlastností Forbushových poklesov úrovne kozmického žiarenia. Tieto javy a procesy zohrávajú významnú úlohu v slnečno-zemskom systéme.

## Pod'akovanie

## LITERATÚRA

- Angelopoulos, V., Mukai, T., Kokubun, S.: 1999, *Phys. Plasmas*, **6**, 4161.
- Badruddin: 2006, *J. Astrophys. Astron.*, **27**, 209.
- Badruddin, Venkatesan, D., Ananth, A.G.: 1991, *Sol. Phys.*, **134**, 395.
- Bavassano, B.: 1996a, *Space Sci. Rev.*, **78**, 29.
- Bavassano, B., in *Solar WindEight*, D. Winterhalter, J. T. Gosling, S. R. Habbal, W. S. Kurth, and M. Neugebauer (eds.), American Institute of Physics, Woodbury, New York, 245.
- Borovsky, J.E., Funsten, H.O.: 2003, *J. Geophys. Res.*, **108**, 1246.
- Borovsky, J. E., Elphic, R. C., Funsten, H. O., Thomsen, M. F.: 1997, *J. Plasma Phys.*, **57**, 1.
- Bruno, R.: 1997, *Nuovo Cim. C*, **20**, 881.
- Bruno, R., Carbone, V.: 2005, *Living Reviews in Solar Physics*, vol. 2, no. 4.
- Bruno, R., Bavassano, B., D'Amicis, R., Carbone, V., Sorriso-Valvo, L., Pietropaolo, E.: 2006, *Space Sci. Rev.*, **122**, 321.
- Bruno, R., Bavassano, B., D'Amicis, R., Salem, C., Carbone, V., Marino, R., Sorriso-Valvo, L., Noullez, A.: 2007, 6th Annual International Astrophysics Conference. *AIP Conference Proc.*, 932, 16.
- Burlaga, L.F., and F. Viñas, A.: 2004, *J. Geophys. Res.*, **109**, A12107.
- Cane, H. V., and Richardson, I. G.: 1995, *J. Geophys. Res.*, 100, 1755.
- De Sterck, H., Poedts, S.: 1999, *Proc. 9th European Meeting on Solar Physics, 'Magnetic Fields and Solar Processes'*, ESA SP-448, ed. A. Wilson, 935.
- Dorman, L.I., Shogenov, V.K.: 1986, *Geomagn. Aeron.*, **26**, 496.
- Dorotovič I.: 2005, *Zborník referátov zo 17. celoštátneho slnečného seminára*, Stará Lesná 2004, ed. I. Dorotovič, SÚH Hurbanovo, 163.
- Dorotovič, I., and Vörös, Z.: 2004, in *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity, Proceedings IAU Symposium No. 223*, eds. A.V. Stepanov, E.E. Benevolenskaya and A.G.Kosovichev, 537.
- Dorotovič, I., and Vörös, Z.: 2005, in *Proc. 15th Portuguese National Meeting: 2005 Past Meets Present in Astronomy and Astrophysics*, eds. J. Afonso, N. Santos, A. Moitinho, R. Agostinho, World Scientific, 13.
- Dorotovič, I., and Vörös, Z.: 2006, *Zborník referátov z 18. celoštátneho slnečného seminára*, Modra 2006, ed. I. Dorotovič, SÚH Hurbanovo, publikované na CD – 25.pdf.
- Dorotovič, I., Kudela, K., Lorenc, M., and Rybanský, M.: 2008, *Solar Phys.*, **250**, 339.
- Dorotovič I., Kudela K., Lorenc M., Pintér T. a Rybanský M.: 2008, Reconstruction of evolution of several space weather events connected with Forbush decreases, Proceedings of the IAU Symposium No. 257 'Universal Heliophysical processes', Cambridge Univ. Press, submitted.
- Forbush, S.E.: 1937, *Phys. Rev.*, **51**, 1108.
- Fry, S. E., Fry, C. D., Howard, T. A.: 2006, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2006*, abstract #SH33A-0395.
- Gold, T.: 1960, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **4**, 406.
- Goldstein, M. L.: 2001, *Astrophys. Space Sci.*, **277**, 349.
- Goldstein, M. L., Roberts, D. A. and Matthaeus, W. H.: 1995, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **33**, 283.
- Goldstein, M. L., and Roberts, D. A.: 1999, *Phys. Plasmas*, **6**, 4154.
- Goldstein, M. L., and Roberts, D. A.: 2005, in *Proc. Solar Wind 11 / SOHO 16, "Connecting Sun and Heliosphere"*, ESA SP-592, B. Fleck, T.H. Zurbuchen, H. Lacoste (eds.), Published on CDROM., p.120.1.
- González-Esparza, J. A., Cantó, J., González, R. F., Lara, A., Raga, A. C.: 2003, *Adv. Space Res.*, **32**, 513.
- Gosling, J. T.: 1993, *J. Geophys. Res.*, **98**, 18937.
- Chih, P.P. and Lee, M.A.: 1986, *J. Geophys. Res.*, **91**, 2903.
- Ifedili, S.O.: 1998, *Planet. Space Sci.*, **46**, 435.
- Iucci, N., Parisi, M., Signorini, M., Storini, M., Villorosi, G.: 1989, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **81**, 367.
- Iucci, N., Pintér, Š., Parisi, M., Storini, M., Villorosi, G.: 1986, *Il Nuovo Cimento*, **9**, 39.
- Jankovičová, D., Vörös, Z., Šimkanin, J.: 2008, *Nonlin. Processes Geophys.*, **15**, 53.
- Kolmogorov A.: 1941, *Sov. Phys. - Dokl.*, **30**, 301.
- Kudela, K. and Brenkus, R.: 2004, *J. Atmos. Solar Terr. Physics*, **66**, 1121.
- Leroux, J.A., Potgieter, M.S.: 1991, *Astron. Astrophys.*, **243**, 531.
- Leubner, M. P., Vörös, Z.: 2005, *Nonlin. Processes Geophys.*, **12**, 171.
- Lockwood, J.A.: 1971, *Space Sci. Rev.*, **12**, 658.
- Lockwood, J.A., Webber, W.R., and Debrunner, H.: 1991, *J. Geophys. Res.*, **96**, 11587.
- Lui, A. T. Y.: 2001, *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **64**, 125.
- Malandraki, O.E., Sarris, E. T., Lanzerotti, L. J., MacLennan, C. G., Pick, M., Tsiropoula, G.: 2001, *Space Science Reviews*, **97**, 263.
- Malandraki, O.E., Sarris, E. T., M., Tsiropoula, G.: 2003, *Annales Geophysicae*, **21**, 1249.
- Manchester, W.B., Gombosi, T. I. Roussev, I., Ridley, A., De Zeeuw, D. L., Sokolov, I. V., Powell, K.G., Tóth, G.: 2004, *J. Geophys. Res.*, **109**, A02107.
- Nagashima, K., Sakakibara, S., Fujimoto, K., Tatsuoka, R. a Morishita, I.: 1990, *Il Nuovo Cimento*, **13**, 551.
- Nishida, A.: 1983, *J. Geophys. Res.*, **88**, 785.
- Odstrčil, D., Pizzo, V. J.: 2002, *Bulletin of the American Astronomical Society*, **34**, 752.
- Odstrčil, D., Riley, P., Linker, J. A., Lionello, R., Mikič, Z., Pizzo, V. J.: 2003, *Proceeding 'Solar variability as an input to the Earth's environment', International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium*, ESA SP-535, ed. A. Wilson, 541.
- Oughton, S.: 2003, in *Solar Wind Ten*, M. Velli, R. Bruno, F. Malara (eds.), American Institute of Physics, New York, 421.
- Parker, E.N.: 1958a, *Phys. Fluids*, **1**, 171.
- Parker, E.N.: 1958b, *Phys. Rev.*, **110**, 1445.
- Parker, E.N.: 1963, *Interplanetary Dynamical Processes*, Interscience, John Wiley and Sons, New York.
- Prigancová, A.: 2006, *Zborník referátov z 18. celoštátneho slnečného seminára*, Modra 2006, ed. I. Dorotovič, SÚH Hurbanovo, publikované na CD – 22.pdf.
- Sorriso-Valvo, L., Carbone, V., Veltri, P., Consolini, G., Bruno, R.: 1999, *Geophys. Research Lett.*, **26**, 1801.
- Sugiura, M.: 1964, in *Annals of the International Geophysical Year*, vol. 35, Pergamon Press, Oxford, 945.
- Tu, C.-Y., and Marsch, E. :1993, *J. Geophys. Res.*, **98**, 1257.
- Vandas M.: 2003, in *Proc. 'Solar variability as an input to the Earth's environment', International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium*, ESA SP-535, ed. A. Wilson, 527.
- Vandas, M. a Odstrčil, D.: 2004, *Astronomy and Astrophysics*, **415**, 755.
- Velli, M.: 2003, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **45**, A205.
- Veltri, P.: 1994, *Space Sci. Rev.*, **68**, 63.
- Verdini, A., Velli, M.: 2007, *Astrophys. J.*, **662**, 669.
- Vörös, Z., Baumjohann, W., Nakamura, R., Runov, A., Zhang, T. L., Volwerk, M., Eichelberger, H. U., Balogh, A., Horbury, T. S., Glaßmeier, K.-H., Klecker, B., Rème, H.: 2003, *Annales Geophysicae*, **21**, 1955.
- Wibberenz, G., Le Roux, J.A, Potgieter, M.S., Bieber J.W.: 1998, *Space Sci. Rev.*, **83**, 309.
- Yadav, M.P., and Kumar, S.: 2007, *Indian J. Phys.*, **81**, 425.
- Zhang, G., and Burlaga, L. F.: 1988, *J. Geophys. Res.*, **93**, 2511.