

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

MATEJA DUMBOVIĆ

Diplomski rad

**UTJECAJ MEĐUPLANETARNIH
KORONINIH IZBAČAJA NA TOK
KOZMIČKOG ZRAČENJA**

Zagreb, 2010.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: Dipl. ing. fizike

Mateja Dumbović

Diplomski rad

UTJECAJ MEĐUPLANETARNIH KORONINIH
IZBAČAJA NA TOK KOZMIČKOG ZRAČENJA

Voditelj diplomskog rada: dr. sc. Bojan Vršnak

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2010.

Zahvale

- dr. sc. Bojanu Vršnaku, voditelju diplomskog rada, na pruženoj prilici za istraživanje ovog zanimljivog i modernog problema te na pomoći i strpljenju koje je iskazao prilikom izrade. Bez njegovog stručnog vodstva ovaj rad ne bi bio moguć.
- Jaši Čalogoviću, dipl. ing., znanstvenom novaku Opservatorija Hvar, na pomoći pri prikupljanju i obradi podataka, nalaženju i savladavanju literature te mnogobrojnim korisnim sugestijama.
- dr. sc Dragana Roši, sa Zagrebačke zvjezdarnice na obilasku, prilikom kojeg sam imala priliku iz prve ruke upoznati se s radom SEVAN CRO detektora. Dobiveni materijali i informacije su mi puno pomogle u pisanju ovog rada.
- svim kolegama, koji su podijelili sa mnom svoja iskustva i dali mi savjete, posebno oko formalnog djela pisanja diplomskog rada.
- obitelji na strpljenju i potpori tokom cijelog studija.

Sažetak

Ovaj rad bavi se problemom povezanosti međuplanetarnih koroninih izbačaja (ICME) sa Forbushevim smanjenjem toka kozmičkog zračenja (eng. „Forbush decrease“, FD). U tu svrhu, a za razliku od drugih radova, koji su promatrali iste ili slične veze, izabrani su događaji prema jasnom porastu jakosti i fluktuacija magnetskog polja u Sunčevom vjetru. Za njih je zatim tražen odgovarajući FD. Podaci su grupirani prema tipovima (koji za ista polja pokazuju manje ili veće FD-e), strukturi (koja se očituje kao jednostavnija ili složenija krivulja promjene mag. polja) te vrsti poremećaja (ICME ili korotirajuća područja interakcije, CIR). Za većinu karakteristika poremećaja i FD-a dobivena je jasna korelacija, a posebno dobre korelacije dobivene su za amplitude magnetskog polja kao i umnoške amplituda FD i mag. polja s odgovarajućim vremenima trajanja. Zamijećeno je da se za neke ovisnosti FD-a o parametrima poremećaja javljaju dvije grane, koje odgovaraju dvama različitim populacijama događaja. Korelacije za zasebne grane pokazale su se znatno boljima nego kada se gledaju ukupni podaci.

Sadržaj

1. UVOD	5
2. KOZMIČKO ZRAČENJE.....	6
2.1 <i>Općenito o kozmičkom zračenju.....</i>	6
2.2. <i>Geomagnetsko polje i granični geomagnetski rigiditet.....</i>	8
2.3. <i>Atmosferski čestični pljuskovi</i>	10
2.4. <i>Detekcija kozmičkih zraka.....</i>	11
3. MODULACIJA KOZMIČKOG ZRAČENJA	15
3.1. <i>Općenito o modulaciji kozmičkog zračenja</i>	15
3.2. <i>Sunčev vjetar i heliosfera</i>	17
3.3. <i>Poremećaji Sunčevog vjetra.....</i>	20
3.4. <i>Forbushevo smanjenje.....</i>	22
3.5. <i>Detekcija Sunčevog vjetra i njegovih poremećaja</i>	24
4. PODACI I METODE MJERENJA	26

5. REZULTATI MJERENJA I DISKUSIJA	33
6. ZAKLJUČAK.....	44
DODATAK 1: NABIJENA ČESTICA U MAGNETSKOM POLJU	45
<i>Nabijena čestica u homogenom magnetskom polju</i>	<i>45</i>
<i>Magnetsko zrcalo i magnetska boca</i>	<i>46</i>
DODATAK 2: DETEKTORI IONIZACIJSKOG ZRAČENJA	48
<i>Proporcionalni brojač.....</i>	<i>48</i>
<i>Scintilacijski detektor.....</i>	<i>49</i>
<i>Poluvodički detektor.....</i>	<i>50</i>
DODATAK 3: ACE SWEPAM-I - ELEKTROSTATSKI ANALIZATOR	52
DODATAK 4: ACE MAG - TRIAKSIJALNI FLUXGATE MAGNETOMETAR	53
POPIS SLIKA.....	54
POPIS GRAFOVA.....	55
POPIS TABLICA.....	57
POPIS KRATICA	58
LITERATURA	60

1. UVOD

Međuplanetarni koronini izbačaji su međuplanetarni nastavci koroninih izbačaja – erupcija magnetoplazme u Sunčevoj koroni. Prolazeći kroz međuplanetarni prostor djeluju kao štit od kozmičkog zračenja, uzrokujući specifična smanjenja njegova toka u trajanju od otprilike tjedan dana. Takva smanjenja mogu biti uočena ne samo u međuplanetarnom prostoru, već i na Zemlji, a nazivamo ih Forbusheva smanjenja.

Dva su osnovna tipa Forbushevog smanjenja, simetrični, koji se uočava s periodom od 27 dana (kolika je Sunčeva rotacija) te asimetrični, koji se javlja nasumično. Prvi tip se veže uz korotirajuće područje interakcije spore i brze komponente Sunčevog vjetra, a drugi uz međuplanetarne koronine izbačaje. U užem smislu, samo drugi tip se smatra Forbushevim smanjenjem, međutim pridruživanje imena pojavi ovisi od znanstvenika do znanstvenika. U oba slučaja se radi o poremećaju Sunčevog vjetra, koji se širi međuplanetarnim prostorom kao područje promijenjenih svojstava magnetoplazme (brzina, magnetsko polje, gustoća, temperatura). Takvo područje djeluje kao štit od kozmičkog zračenja, međutim mehanizam kojim poremećaj Sunčevog vjetra sprječava prođor kozmičkog zračenja nije još u potpunosti razjašnjen. Zbog toga se još uvijek istražuje što i u koliko mjeri određuje amplitudu i trajanje Forbushevog smanjenja, iako su neka istraživanja u tom smjeru već napravljena.

Veća Forbusheva smanjenja povezana su sa međuplanetarnim koroninim izbačajima, posebno onima koji na vodećem dijelu stvore udarni val. Za njih je specifičan pad u dva koraka, gdje do prvog pada dolazi nakon prolaska udarnog vala, a drugi pad se veže uz prolazak izbačene magnetoplazme (Cane, 2000). Raznolikosti Forbushevog smanjenja na Zemlji može doprinositi i smjer erupcije (Barnden, 1973; Cane, 1996). U više radova je spomenuta moguća veza jakosti magnetskog polja i brzine poremećaja i amplitude Forbushevog smanjenja (npr. Badruddin et al., 1986), međutim tek noviji radovi istražuju koreliranost istih (Belov et al., 2001; Bostanjyan & Chilingarian, 2008). Veza jakosti magnetskog polja i brzine poremećaja s amplitudom pada nađena je i za korotirajuća područja interakcije (Richardson et al., 1996; Čalogović et al., 2008). Proučavanjem vremena „oporavka“ toka kozmičkog zračenja nađeno je da ono ovisi o trajanju prolaska poremećaja (Badruddin et al., 1986). U novijim istraživanjima nađeni su i drugi utjecaji na vrijeme oporavka, posebno utjecaj graničnog rigiditeta (Jamsen et al., 2007) i polariteta Sunčevog magnetskog polja (Singh & Badruddin, 2006), iako u ranijem radu Lockwooda et al. (1986) takve veze nisu pronađene.

Međutim, većina spomenutih radova promatra utjecaj izoliranog svojstva poremećaja Sunčevog vjetra na izolirano svojstvo Forbushevog smanjenja. Također, izbor događaja zasniva se na uočenom smanjenju toka kozmičkog zračenja, a za koji se zatim traži odgovarajući uzrok. Motivacija ovog rada je krenuti suprotno, odnosno za poremećaj Sunčevog vjetra tražiti odgovarajuće Forbushevo smanjenje. Također, iako će naglasak biti na magnetskom polju, kao najvjerojatnijem uzroku smanjenja (zbog interakcije s nabijenim česticama), promatrati će se moguće koreliranosti i drugih parametara.

2. KOZMIČKO ZRAČENJE

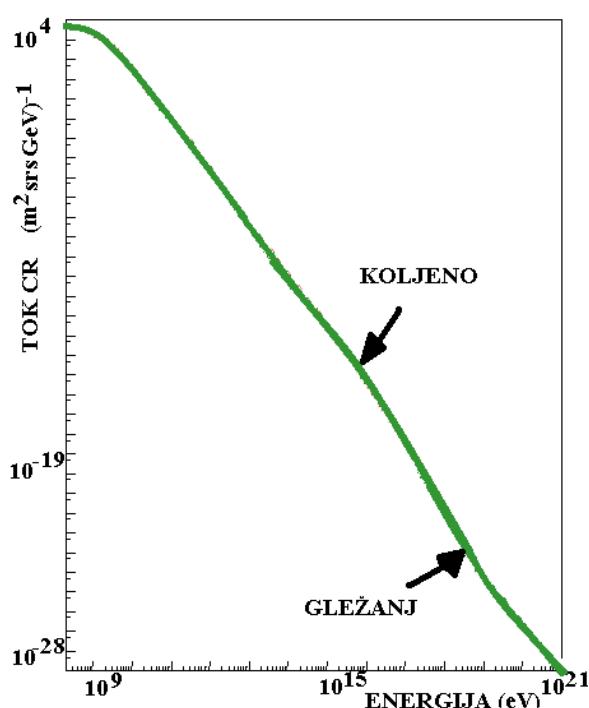
2.1 Općenito o kozmičkom zračenju

Kozmičke zrake (eng. „Cosmic Rays“, CR) su temelj proučavanja različitih grana fizike te su kao takve jedna od najistraživanijih pojava u fizici. Osim što su, kao „glasnici iz svemira“ jedan od glavnih izvora informacija u astrofizici, korisne su u smislu prirodnih akceleratora. Kako ultrarelativističke CR još uvijek imaju daleko veće energije od onih koje je moguće proizvesti u najmodernijim akceleratorima, zanimljive su u nuklearnoj i fizici elementarnih čestica. Najveći sudarivač na svijetu, CERN-ov LHC (eng. „Large Hadron Collider“) ima energiju dostupnu za stvaranje čestica 14 TeV, što je 8 redova veličine manje od najenergetskijske izmjerene CR. One su također dobar izvor slabo interagirajućih neutrina, čija svojstva još nisu sasvim dobro poznata.

Otkriće kozmičkog zračenja povezano je s Becquerelovim otkrićem radioaktivnosti krajem 19. st., kada je Wilson uočio da postoji kontinuirana atmosferska ionizacija, bez prisutstva radioaktivnog izvora. Isprva se smatralo da je to posljedica Zemljine prirodne radioaktivnosti, no Hessova su istraživanja pokazala da, iako ionizacija isprva opada s visinom, nakon 700 m ona ponovo raste i to neovisno da li je noć ili dan. Time je dokazano da uzrok atmosferske ionizacije dolazi iz svemira. Kako je vladalo uvjerenje da su za spomenutu ionizaciju zaslužne γ -zrake, osmišljen je termin „kozmičke zrake“. Uskoro je međutim pokazano da su CR ustvari nabijene čestice. U kasnim dvadesetima 20-tog st. Clay je otkrio da je atmosferska ionizacija veća prema polovima, a zatim su Bothe i Kolhorster uočili da su tragovi, koje CR ostavljaju u maglenoj komori, zakriviljeni. Desetak godina kasnije T.H. Johnson je otkrio da postoji ovisnost ionizacije o kutu gledanja, odnosno da je ionizacija veća gledano sa istoka na zapad. Kako silnice geomagnetskog polja gledaju sa juga na sjever, to je značilo da su većina CR pozitivno nabijene čestice. Istovremenim mjeranjima s više detektora, koju je prvi pokušao Auger 1938. godine, otkriveno je da se te nabijene čestice u atmosferi sudaraju sa atomima kisika i dušika i u nizu reakcija proizvode mnoštvo drugih, sekundarnih čestica, što je kasnije popularno nazvano „atmosferski pljuskovi čestica“. Istraživanje kozmičkih zraka usko je povezano sa razvojem tehnologije, pa se njihovo istraživanje u drugoj polovici 20-tog st. proširilo i na područje izvan Zemljinog magnetskog polja, pomoću detektora na svemirskim letjelicama.

Kozmičkim zrakama se naziva sveukupno zračenje koje dolazi iz svemira i sudara se sa Zemljinom atmosferom, a u užem smislu, taj se naziv odnosi samo na nabijene čestice. Razlikujemo primarne i sekundarne kozmičke zrake. Pod primarnima podrazumijevamo originalne čestice, emitirane od strane izvora, a sekundarnima smatramo čestice koje su nastale kao produkt interakcije primarnih čestica sa materijom (u Zemljinoj atmosferi, ili na putu do nje). Primarne kozmičke zrake su uglavnom ionizirane jezgre i to u najvećem broju protoni (oko 90%), zatim α -čestice (7-10%) i teže jezgre (oko 1%), također su prisutni elektroni, pozitroni i γ -zrake. Sekundarne kozmičke zrake sačinjavaju hadroni, leptoni i γ -zrake (proizvodi interakcija). CR se prema porijeklu tj. izvorima dijele na galaktičke (GCR), solarne (SCR) i anomalne (ACR).

Izvori GCR, koje su ujedno najenergetski od navedenih CR (do 10^{21} GeV), nalaze se izvan Sunčevog sustava i nisu u potpunosti poznati (druge zvijezde, supernove, neutronske zvijezde, jezgre aktivnih galaktika itd.). Smatra se da je većina njih ostatak supernova, gdje su čestice ubrzane na principu magnetskog zrcala na udarnom valu supernova. Na taj način su objašnjive GCR energije do 10^{20} GeV. Smatra se da čestice sa većim energijama dolaze iz drugih galaksija. Kako tok GCR opada sa energijom, na području tako visokih energija on je izrazito mali, pa je to područje slabo istraženo. Spektar energija GCR iznad 10^9 eV prikazan je na slici 1. Čestice sa energijama nižim od 10^9 eV modulirane su Sunčevim vjetrom i međuplanetarnim magnetskim poljem (eng. „Inreplanetary Magnetic Field“, IMF).



Slika 1 Spektar energija GCR
(Mursula & Usoskin, 2003)

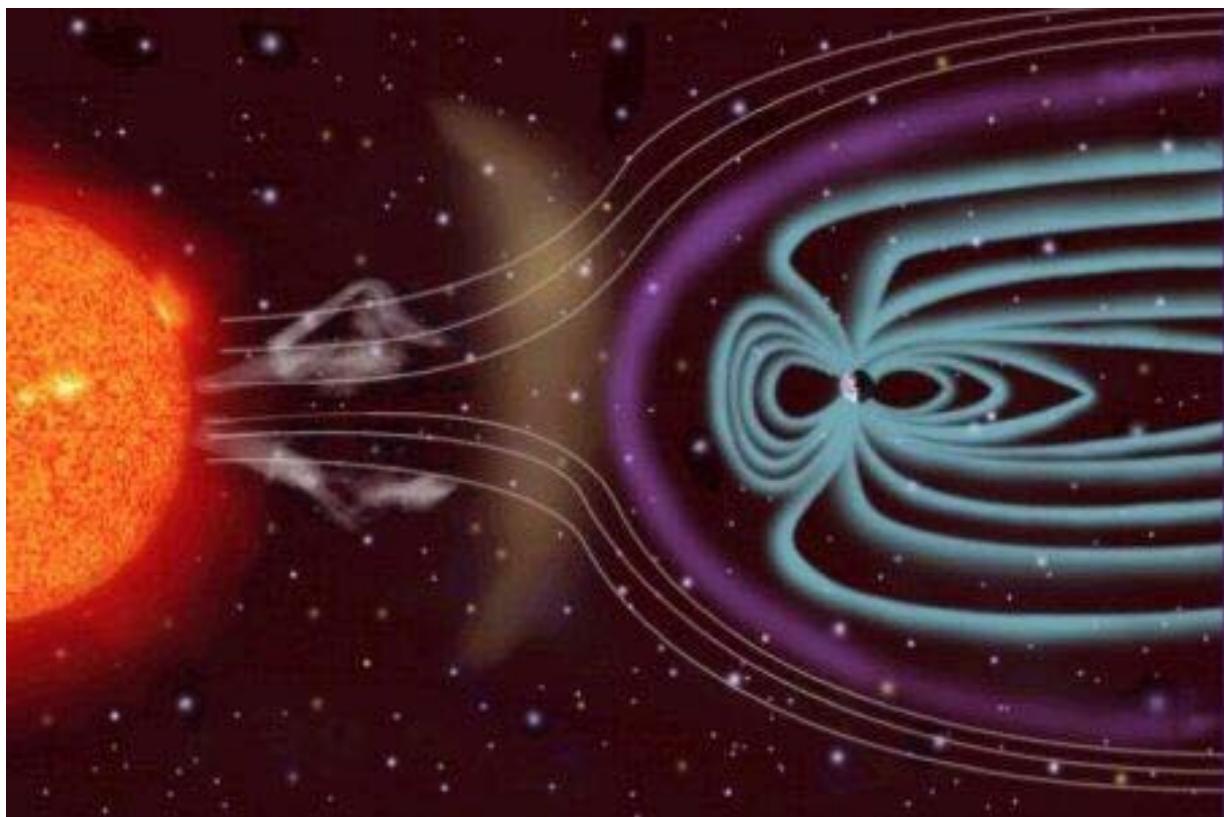
SCR dolaze sa Sunca i povezuju se sa Sunčevim bljeskovima i koroninim izbačajima (eng. „coronal mass ejection“, CME). One su nižih energija (do 20 GeV) i za razliku od GCR, njihove karakteristike nisu mnogo izmijenjene na putu do Zemlje, odnosno govorimo o primarnim CR. Njihov sastav se u odnosu na GCR razlikuje po nedostatku jezgri tipa Li, Be i B kojih u izvorima (zvijezde, kao npr. Sunce) u principu nema, ali se javljaju u GCR kao rezultat interakcije s usputnom materijom. Tok SCR također pada s energijom čestica, međutim za razliku od GCR, čiji je tok približno konstantan u vremenu, SCR se javljaju sporadično i najčešće ga se ne može opisati jednostavnom relacijom poput one za spektar GCR.

ACR imaju najmanje energije (reda veličine 10 MeV), a smatra se da dolaze od lokalnog međuzvjezdanih medija, kroz koji se giba naš Sunčev sustav.

Sa slike je vidljivo da tok CR opada sa energijom i ta se ovisnost može opisati ovisnošću $I(E) \sim E^{-\gamma} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{-1}$ gdje je γ parametar koji karakterizira krivulju, a naziva se spektralni index. U različitim dijelovima spektra on poprima različite vrijednosti, pa tako u području energija 10^{10} eV do 10^{15} eV on iznosi $\gamma \approx 2.7$, u području energija 10^{15} eV do 10^{20} eV $\gamma \approx 3.1$, a zatim se njegova vrijednost opet smanji. Zbog malo podataka, u visokoenergetskom području ($E > 10^{20}$ eV) nije moguće naći dobру analitičku procjenu spektra. Prijelazi između spomenuta tri režima krivulje ovisnosti toka GCR o energiji nazivaju se koljeno (eng. „knee“), odnosno gležanj (eng. „ankle“).

2.2. Geomagnetsko polje i granični geomagnetski rigiditet

Dolaskom do Zemlje, kozmičke zrake, kao nabijene čestice (uglavnom protoni) prvo interagiraju sa geomagnetskim poljem, a zatim u slučaju da imaju dovoljnu energiju ulaze u atmosferu. Geomagnetsko polje je približno dipolno, a stvaraju ga struje u Zemljinoj jezgri. Oblikovano je konstantnom interakcijom sa Sunčevim vjetrom, koja stvara strukturu poznatu pod nazivom magnetski rep (eng. „magnetotail“), koji je okrenut od Sunca. Južni pol Zemljina magnetskog polja se ugrubo podudara sa geografskim sjevernim polom (os dipola zakrenuta je u odnosu na os Zemljine rotacije za približno 11.2°). Područje pod utjecajem geomagnetskog polja naziva se Zemljina magnetosfera. Geomagnetsko polje i Zemljina magnetosfera prikazani su na slici 2.

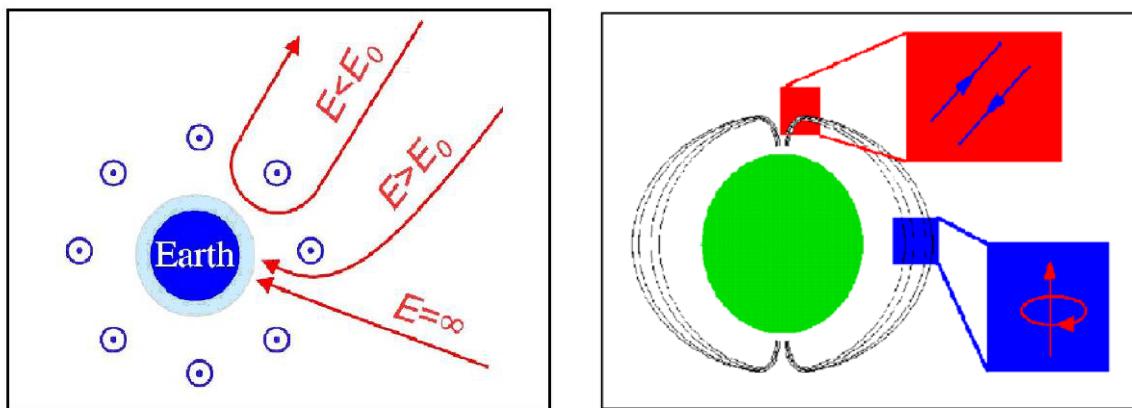


Slika 2 Geomagnetsko polje i Zemljina magnetosfera
(www.esa.int)

Magnetsko polje, kao što je detaljno opisano u Dodatku 1, djeluje na nabijene čestice Lorentzovom silom, koja im zakreće putanju. Koliko će jako putanja biti zakrenuta ovisi o jakosti magnetskoga polja, ali također o energiji čestice te količini naboja kojeg nosi¹. CR srednjih energija bit će zakrenute u Zemljinoj magnetosferi i ući u

¹ veličina kojom se opisuje osjetljivost čestice na magnetsko polje naziva se magnetski rigiditet (detaljnije u Dodatku 1)

atmosferu po zakrivljenoj putanji (pošto se uglavnom radi o protonima, bit će zakrivljene prema istoku). Čestice za koje je rigiditet ispod neke granične vrijednosti, koju nazivamo granični geomagnetski rigiditet (eng. „Geomagnetic cut-off rigidity“), zakrenut će se oko silnice i izaći iz magnetosfere (dakle bit će reflektirane). CR sa vrlo malim energijama će biti uhvaćene u magnetosferi, u helikoidalnoj putanji oko silnica geomagnetskog polja. Pošto su silnice zgušnute na polovima tamo je i jače magnetsko polje, pa će takve čestice neko vrijeme provesti zatvorene u magnetsku bocu². CR sa vrlo visokim energijama neće biti skrenute geomagnetskim poljem, već će neometano ući u atmosferu. Utjecaj geomagnetskog polja na putanju CR ovisi i o mjestu upada. Oko magnetskih polova nalazi se područje gdje su silnice gotovo radikalne, dakle gotovo usporedne smjeru dolaska CR. Na tim mjestima će magnetsko polje slabo zakretati čestice tj. one će lako ulaziti u atmosferu. Suprotno tome oko magnetskog ekvatora silnice su gotovo okomite na radikalni smjer, dakle smjer dolaska CR, pa će ovdje i utjecaj magnetskog polja biti najizraženiji. Interakcija CR s geomagnetskim poljem, ovisno o njihovoj energiji i području ulaska, prikazana je na slici 3.



Slika 3 Interakcija CR i geomagnetskog polja

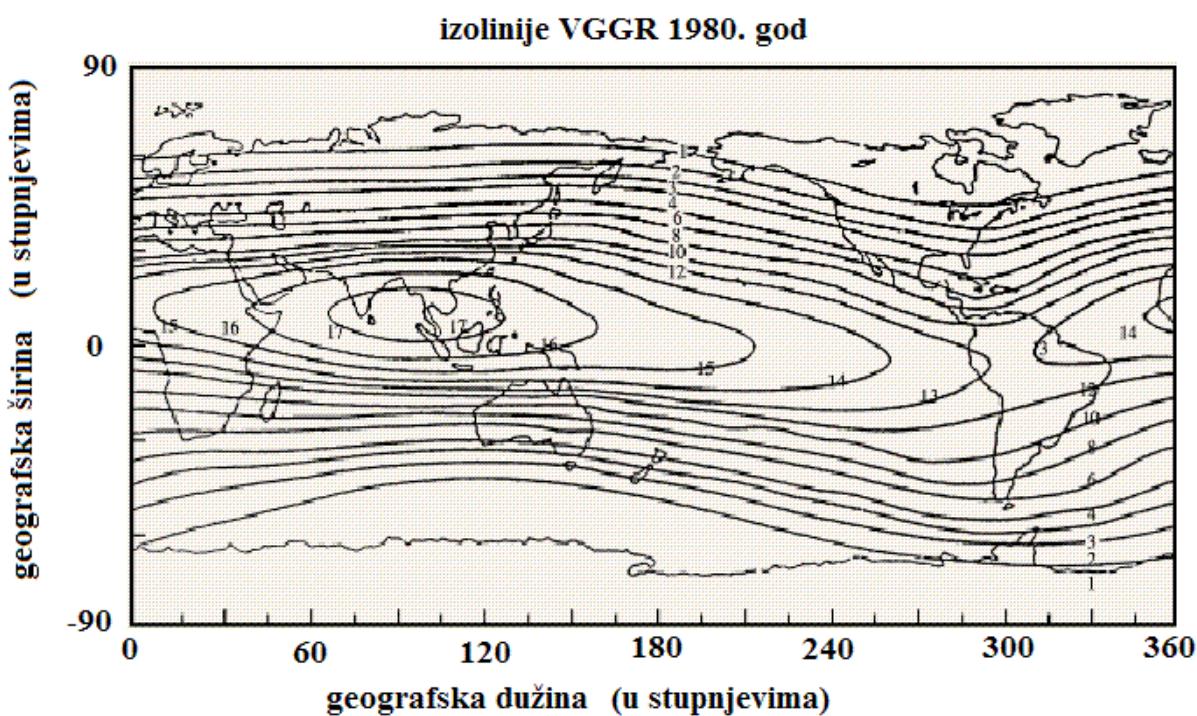
Lijevo – ovisno o energiji koju CR ima prema graničnoj energiji E_0 ona može biti reflektirana, ući pod kutom ili okomito (www.nmdb.eu)

Desno – ovisno o mjestu upada CR, magnetsko polje će ih jače ili slabije zakrenuti

Broj čestica koje mogu ući vertikalno u atmosferu, osim o energiji (odnosno rigiditetu) ovisi o geomagnetskoj širini. Za detektore na Zemljinoj površini najbitnije su upravo takve čestice, jer one najkraćim putem stižu do detektora (odnosno njihovi produkti iz interakcija sa atmosferom). Stoga se u praksi kao parametar propusnosti Zemljina magnetskog polja koristi vertikalni granični geomagnetski rigiditet (VGGR), koji podrazumijeva da je kut upada čestica u odnosu na magnetski istok 90° , pa ovisi samo o geomagnetskoj širini.

Globalna raspodjela VGGR prikazana je na slici 4.

² Magnetska boca pojava je zatočenja magnetskim poljem (detaljnije u Dodatku 1)

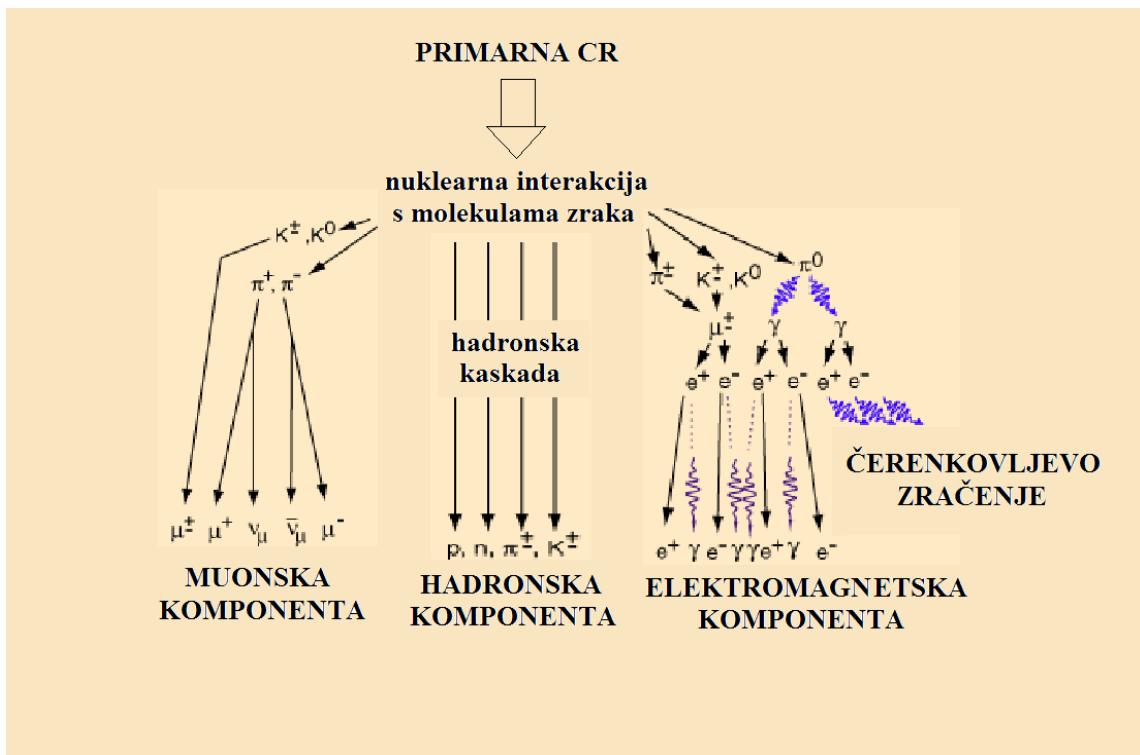


Slika 4 Ovisnost vertikalnog graničnog geomagnetskog rigiditeta o geografskom položaju
 (www.cosmicrays.org)

VGGR dakle raste od magnetskih polova prema ekvatoru (gdje okomito prolaze samo čestice najviših energija). Sukladno VGGR, isto ponašanje ima i tok CR, jer on opada s energijom čestica, kao što je spomenuto u poglavlju 2.1. Na polovima, gdje je VGGR mali i mogu proći i CR niskih energija, tok CR je znatno veći nego na ekvatoru. Stoga je pri mjerenu toku CR bitno voditi računa na kojoj geomagnetskoj širini su mjerena izvedena.

2.3. Atmosferski čestični pljuskovi

Kao što je prethodno spomenuto, visokoenergetska CR interagira sa molekulama i atomima Zemljine atmosfere. Proizvodi takvih interakcija često imaju dovoljnu energiju da i sami interagiraju sa atmosferom, pa je rezultat kaskada sudara u kojima nastaje niz novih čestica. Niz interakcija, koje započinju ulaskom CR u atmosferu, a čiji konačni proizvodi su čestice koje opažamo detektorima na Zemljinoj površini, nazivamo atmosferskom kaskadom ili pljuskom. Tri su komponente atmosferskih kaskada: hadronska, muonska i elektromagnetska. Osim po sastavu, one se međusobno razlikuju i po nastanku te relativnoj širini. Atmosferski pljusak, uzrokovani upadom jezgre (dakle CR koja interagira nuklearnim reakcijama sa jezgrama atoma i molekula atmosfere) prikazan je na slici 5.



Slika 5 Prikaz atmosferskog pljuska

Elektromagnetsku komponentu kaskade čine elektroni, pozitroni i gama zrake. Nastaju uglavnom kao posljedica upada visokoenergetske gama zrake, elektrona ili pozitrona, ili raspadom muona, koji su se raspali prije dolaska do površine³.

Muonsku komponentu javlja se kad je upadna CR proton ili ion (kao i hadronska), uglavnom kao produkt raspada piona u pljusku, a čine ju muoni i antimuoni sa odgovarajućim neutrinima.

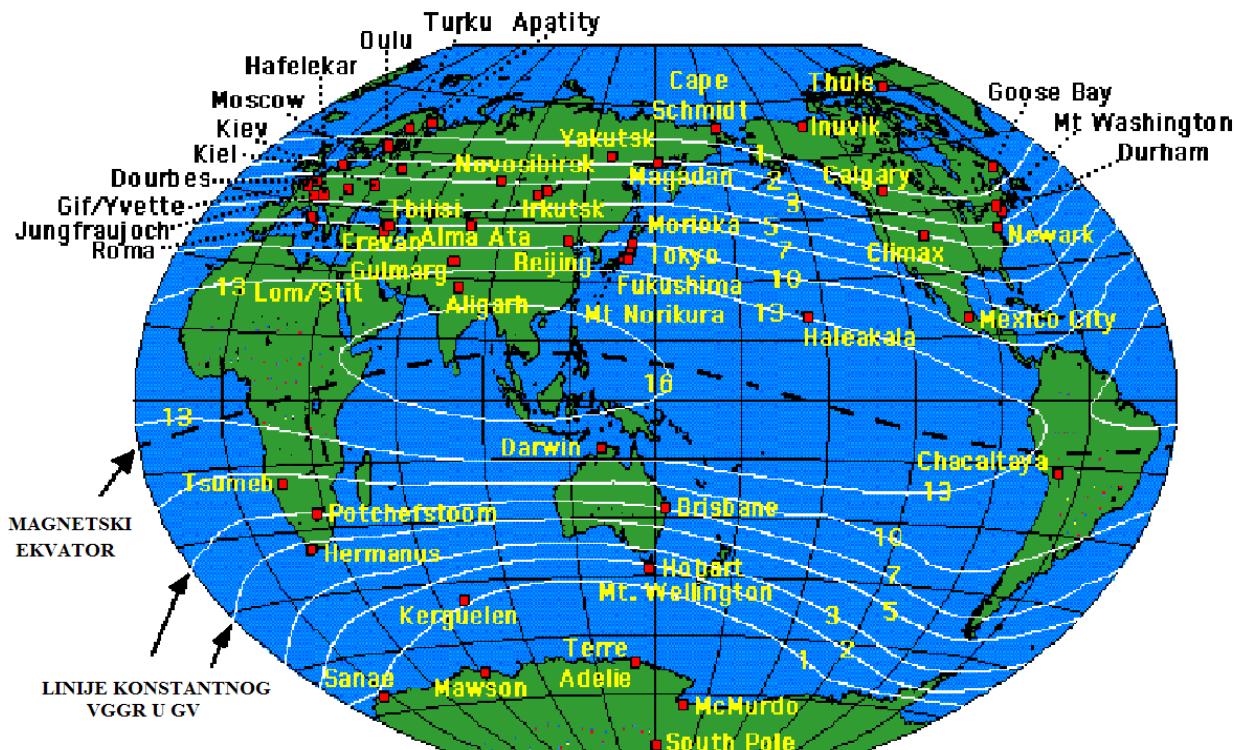
Hadronsku komponentu čine hadroni, od kojih se u najznačajnijem broju javljaju neutroni i protoni.

2.4. Detekcija kozmičkih zraka

Za opažanje CR koriste se razni detektori, ovisno o vrsti čestica koje se detektiraju i lokaciji (nadmorska visina, ispod ili iznad magnetosfere). Detektori koji su smješteni na satelitima i letjelicama nalaze se izvan utjecaja Zemljine magnetosfere, što im omogućuje da razotkriju smjer dolaska te nisu energetski ograničeni sa VGGR (iako su, naravno, CR koje detektiraju pod utjecajem solarne modulacije). Detektori na balonima nalaze se na visinama 40-70 km, gdje je atmosfera dovoljno rijetka da detektiraju primarne kozmičke zrake, međutim oni mijere unutar magnetosfere te ne mogu detektirati smjer dolaska primarne CR i mora se uzeti u obzir VGGR. Detektori na površini Zemlje mijere sekundarne CR i tu spadaju čerenkovljevi detektori za

³ Ovdje govorimo o CR u širem smislu, dakle ne samo o nabijenim česticama

gama zrake, muonski za muone i neutronski za neutrone. Neutronski monitori (NM) su se pokazali najefikasnijima za detekciju CR čitavog spektra, zbog velikog toka. Budući da na mjerjenja NM utječe VGGR te CR pokazuju dnevne i sezonske varijacije u intenzitetu, u drugoj polovici 20-tog stoljeća javila se potreba za stvaranjem globalne mreže neutronskih monitora (NMN) koja se sastoji od pedesetak neutron monitora na raznim geografskim dužinama i širinama. Na slici 6 je prikaz NMN iz 1997. Godine.

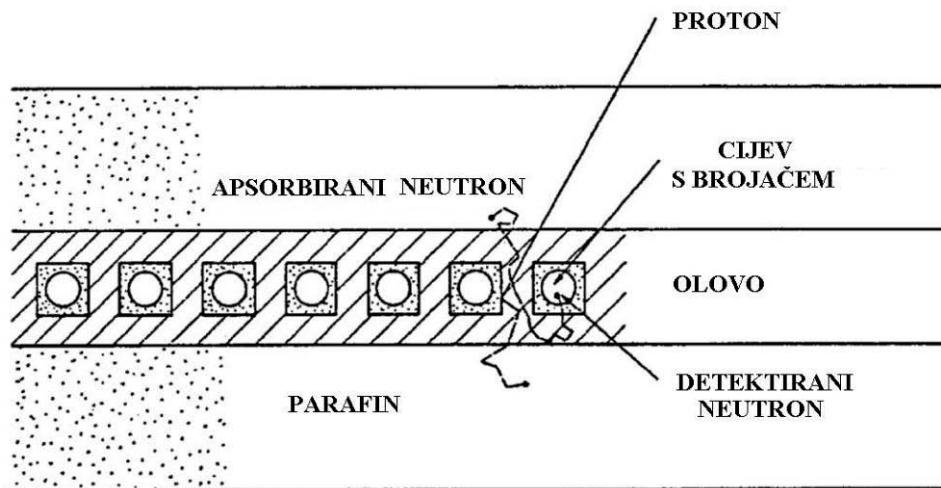


Slika 6 Globalna mreža neutron monitora 1997. Godine
(Mursula & Usoskin, 2003)

Princip rada neutron monitora zasniva se na nuklearnim reakcijama $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ ili $^3\text{He}(\text{n},\text{p})^3\text{H}$, u kojima nastaju nabijene čestice (α tj. p), koje se zatim detektiraju proporcionalnim brojačem⁴. Do spomenutih nuklearnih reakcija dolazi u cijevima napunjениm plinom $^{10}\text{BF}_3$ ili ^3He . Međutim kako je udarni presjek za te reakcije najveći za termalne neutrone, cijevi moraju biti okružene moderatorom, koji će u elastičnim sudarima usporiti nadolazeće neutrone te na taj način omogućiti efikasniju detekciju. Prije moderatora neutroni moraju proći i sloj olova, koji usporava neutrone u neelastičnim sudarima, spuštajući većinu neutrona na energiju oko 2MeV. Oovo ujedno ima mali udarni presjek za apsorpciju termalnih neutrona, koji tako neometano mogu doći do moderatora, tj. proporcionalnih cijevi. Ispred olova je sloj tzv. reflektora, koji je od istog materijala kao i moderator, a uloga mu je da odbija niskoenergetske neutrone iz olova, tj. ne dopusti im da pobjegnu iz sustava.

⁴ Proporcionalni brojač opisan je u Dodatku 2: Detektori ionizacijskog zračenja

Materijali koji se koriste kao moderatori su oni koji sadrže velike koncentracije vodika (zbog velikog energetskog gubitka neutrona po sudaru), poput polietilena niske gustoće, koji se koristi u detektorima NM-64, ili parafina, koji se koristi u IGY detektorima. NM-64 i IGY su dvije vrste neutronskih monitora, koji se osim po vrsti moderatora, razlikuju i po broju detekcijskih cijevi te omjeru moderatora/reflektora prema olovu. NM-64 je „mlađi“ od dvije vrste detektora i pokazuje nešto veću efikasnost od IGY monitora, no razlike nisu značajne, pa su oba tipa u uporabi. Na slici 7 se nalazi shematski prikaz IGY neutronskog monitora.



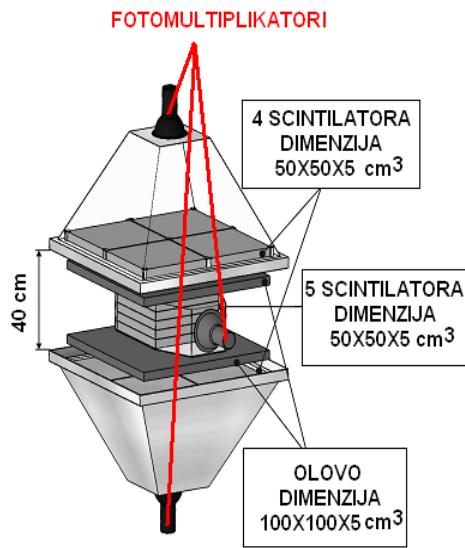
Slika 7 Shematski prikaz IGY neutronskog monitora
www.nmdb.eu

NM mogu detektirati i ostale čestice (nabijene hadrone, muone), međutim konstruirani su na način da primarno detektiraju neutrone, stoga su u tome i najefikasniji.

Posljednjih godina stvara se nova mreža detektora CR, SEVAN (Space Environmental Viewing and Analysis Network), sa hibridnim detektorima, smještenima na srednjim i niskim geografskim širinama. Dizajnirani su tako da mogu istovremeno detektirati tokove neutrona, gama zraka, niskoenergetskih nabijenih čestica i visokoenergetskih muona, sa rasponom rigiditeta od 3GV do 20-30 GV. Usmjereni su na istraživanje SCR, a u svrhu uspostavljanja svemirske vremenske prognoze (eng. „Spaceweather“).

U hibridnim SEVAN detektorima detekcija čestica se vrši pomoću scintilacijskog detektora⁵, koji je prikazan na slici 8. Sastoji se od tri seta $50 \times 50 \times 5 \text{ cm}^3$ ploča plastičnih scintilatora, dva od 4 ploče i jedan od 5 ploča (u sredini). Scintilacijske ploče služe ujedno za proizvodnju vidljivih fotona i za nuklearne reakcije niskoenergetskih neutrona u kojima se proizvode nabijene čestice. Setovi scintilacijskih ploča međusobno su odvojeni slojem olova i svaki ima zaseban fotomultiplikator za bilježenje bljeskova. Na taj način se mogu identificirati različite čestice.

⁵ Scintilacijski detektor opisan je u Dodatku 2: Detektori ionizacijskog zračenja



Pojava signala na gornjem i donjem detektoru, odnosno na sva tri značit će prolazak energetskog muona, jer ima dovoljnu energiju da prođe kroz oba sloja olova. Detekcija signala u srednjem sloju upućivat će na neutron, jer je udarni presjek za nuklearne reakcije povećan za niskoenergetske neutrone, dakle one koji su usporeni u sloju olova. Detekcija signala u prvom ili u prva dva detektora značit će prolazak niskoenergetske ili nabijene čestice srednjih energija, koja nema dovoljnu energiju da prođe i drugi sloj olova. Postoji još mogućnost detekcije signala samo posljednjim detektorm što znači da je prošla nabijena čestica pod kutom.

Slika 8 Prikaz hibridnog SEVAN detektora
(Zagrebačka zvjezdarnica, dr.sc. Dragan Roša)

Jedan od hibridnih detektora projekta SEVAN postavljen je 2009. godine na Zagrebačkoj zvjezdarnici. SEVAN CRO nalazi se na geografskoj širini 45.82° N, geografskoj dužini 15.97° E; nadmorskoj visini 220 m, a odgovarajući VGGR je ≈ 4.9 GV. Slika 9 prikazuje SEVAN CRO detektor.



Slika 9 SEVAN CRO detektor
(Zagrebačka zvjezdarnica, dr.sc. Dragan Roša)

3. MODULACIJA KOZMIČKOG ZRAČENJA

3.1. Općenito o modulaciji kozmičkog zračenja

Tok CR je promjenjiv u vremenu. Te promjene mogu biti sporadične ili periodičke, a njihovi uzroci mogu biti zemaljskog ili vanzemaljskog porijekla. Promjene toka CR sortirane su i kratko opisane u tablici 1.

PROMJENE TOKA CR			
Zemaljskog porijekla		Vanzemaljskog porijekla	
periodičke	sporadične	periodičke	sporadične
Sezonske <1% (zbog atmosferskih promjena uslijed promjene godišnjih doba)	Porast <10% (Zbog smanjenja VGGR za vrijeme geomagnetskih oluja)	11-godišnja <30% (zbog ciklusa Sunčeve aktivnosti)	GLE <300% (povećanje zbog SCR)
Diurnalne <1% (zbog atmosferskih promjena uslijed promjene noć-dan i mijenjanja VGGR uslijed Zemljine rotacije)		27-dnevna <2% (zbog Sunčeve rotacije)	Forbushevo smanjenje <30% (zbog poremećaja u Sunčevom vjetru)
		Diurnalna <1% (zbog Sunčevog vjetra i IMF)	Porast neposredno prije FD < 2% (zbog akceleracije CR na udarnom valu u Sunčevom vjetru)

Tablica 1: Vrste i uzroci promjena toka CR
(Mursula & Usoskin, 2003)

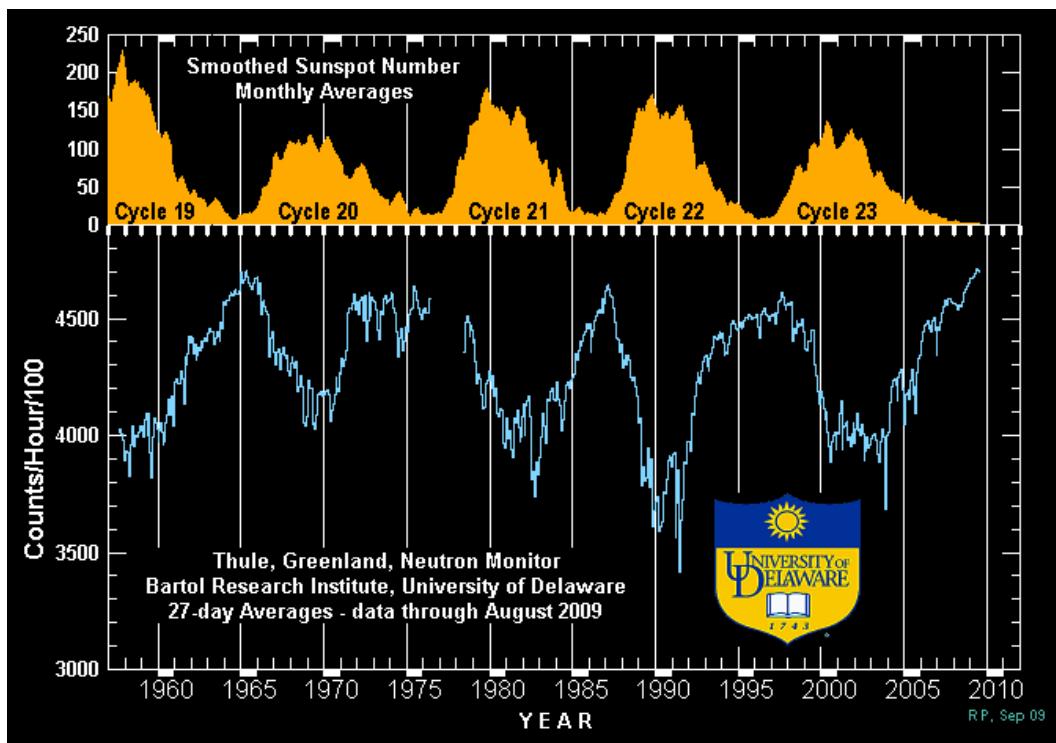
Periodičke promjene toka CR, koje su posljedica zemaljskih efekata, manje su od 1%, a dolaze od atmosferskih promjena noću u odnosu na dan (diurnalne varijacije) tj. zimi u odnosu na ljeto (sezonske varijacije). U diurnalne varijacije uvrštavaju se i promjene vezane uz dnevno mijenjanje VGGR uslijed Zemljine rotacije (zbog asimetričnog oblika Zemljine magnetosfere), no oni su vrlo mali. Značajniji utjecaj na tok kozmičkih zraka ima sporadično smanjenje VGGR za vrijeme geomagnetskih oluja, kada je magnetosfera oslabljena te time propusnija za čestice. Relativni porast toka CR u takvima situacijama može biti i do 10%.

Značajnije promjene toka CR uzrokuju vanzemaljski efekti, koji posredno ili direktno dolaze sa Sunca. Sunce, osim što u vidu SCR doprinosi ukupnom toku CR na Zemlju, modulira taj tok svojom magnetskom aktivnošću.

Slično kao što CR interagiraju sa geomagnetskim poljem, GCR interagiraju sa Sunčevim vjetrom i međuplanetarnim magnetskim poljem (eng. „Interplanetary Magnetic Field“, IMF). Zbog toga je tok CR periodički moduliran Sunčevom magnetskom aktivnošću s periodom koji odgovara ciklusu Sunčevih pjega. Postoji i modulacija toka povezana sa Sunčevom rotacijom, s periodom od 27 dana, a koja se veže uz interakciju brze i spore struje Sunčevog vjetra. Manje promjene toka CR uočavaju se na Zemlji, s dnevnim periodom, a uzrokuje ih neizotropnost nastala

konvekcijom CR Sunčevim vjetrom i difuzijom duž silnica međuplanetarnog magnetskog polja.

Periodična promjena povezana sa Sunčevom magnetskom aktivnošću naziva se solarna (tj. heliosferska) modulacija GCR. Ovisi o energiji čestice (značajnija je za čestice manjih energija) te može iznositi do 30%. Sinusoidalnog je oblika inverznog ciklusu Sunčevih pjega⁶, a specifičan je vremenski odmak, kojeg posjeduje u odnosu na njega. Do pomaka dolazi zbog velikih dimenzija heliosfere i konačne brzine Sunčevog vjetra. Solarna modulacija GCR prikazana je na slici 10.



Slika 10 Ciklus Sunčeve aktivnosti i solarna modulacija
(Intenzitet GCR snimljen sa NM u Thule-u, Sveučilište u Delaware-u: www.udel.edu)

Značajnije padove u toku CR uzrokuju sporadični događaji na Suncu. Najveće promjene u toku CR su tzv. GLE događaji (eng. „Ground Level Enhancement“), porasti koji mogu biti i do 300%, a posljedica su dolaska SCR. S druge strane sa događajima na Suncu povezuje se i pad toka CR, tzv. Forbushevo smanjenje (eng. „Forbush decrease“), koje je specifičnog oblika i može iznositi od par postotaka do 30%. Uzroci i svojstva Forbushevog smanjenja detaljnije su opisani u poglavljiju 3.4. Neposredno prije Forbushevog smanjenja, često se zamjećuje mali porast toka CR do 2%, kojeg također svrstavamo u sporadične, vanzemaljske efekte. Ovaj porast uzrokovani je refleksijom i/ili ubrzanjem čestica na udarnom valu ispred ICME-a.

⁶ Ciklus Sunčevih pjega grafički se prikazuje Wolfovim brojem u ovisnosti o vremenu. Taj broj se računa na način da se zbroje broj individualnih Sunčevih pjega, sa brojem grupa, pomnoženog sa 10. Takav broj pokazuje cikličko ponašanje u vremenu, sa jasnim minimumima i maksimumima, srednjeg perioda od 11 godina. Kako su Sunčeve pjage mesta pojačanog magnetskog polja te je njihovo pojavljivanje i broj odraz Sunčeve magnetske aktivnosti, ciklus broja Sunčevih pjega zapravo predstavlja ciklus Sunčeve aktivnosti.

Za ovaj rad najbitnije su sporadične vanzemaljske promjene intenziteta CR, u koje spadaju efekti povezani s koronim izbačajima. One se očituju u velikom porastu uslijed dolaska SCR (ranije spomenuti GLE događaji) te kao Forbushevo smanjenje. Kako je vremenska skala ovih događaja reda veličine dana, očito je da efekti solarne modulacije mogu biti zanemareni.

3.2. Sunčev vjetar i heliosfera

U 19. st. pojavila se ideja da Sunce izbacuje masu, što je bio početak istraživanja Sunčevog vjetra. Iako su postojale mnoge indikacije (orientacija repova kometa, aktivnosti aurora), njegovo postojanje je potvrdila tek sovjetska sonda Luna-2, lansirana 1959. godine.

Sunčev vjetar je permanentno radijalno strujanje Sunčeve plazme iz korone, a nastaje bježanjem čestica iz korone u međuplanetarni prostor. Sastoje se uglavnom od protona i elektrona, s manjim udjelom alfa čestica i vrlo malim udjelom težih iona. Sunčev vjetar nalazi se u plazmenom stanju, dakle makroskopski gledano on je elektroneutralan.

Brzina Sunčevog vjetra varira između 200 km/s i 800 km/s (prosječna brzina Sunčevog vjetra je 400 km/s). Sporiji je kod Sunca i kako se udaljava od njega ubrzava te poprima konstantnu brzinu na oko $20 R_s^7$. Sada već prihvaćeni model ubrzanja predložio je E. Parker 1958., a bazira se na principu DeLavalove mlaznice. To je takva konstrukcija u kojoj se poprečni presjek cijevi kroz koju struji fluid smanjuje, pri čemu fluid bude ubrzan do brzine zvuka⁸. Ako se u tom kritičnom trenutku cijev počinje širiti, fluid može biti ubrzan i do nadzvučnih brzina. Parkerov model bazira se na smanjenju gustoće Sunčevog vjetra kako se on širi radijalno od Sunca, što efektivno reproducira uvjete u DeLaval-ovoj mlaznici. Tako je brzina Sunčevog vjetra podzvučna do udaljenosti 2-6 sunčevih radijusa gdje dostiže brzinu zvuka⁹, a zatim poprima nadzvučne vrijednosti. U blizini Zemlje Sunčev vjetar je nadzvučan i poprima vrijednosti 300-400 km/s.

Prosječna brzina Sunčevog vjetra različita je u ravnini ekliptike i u polarnim predjelima. Stoga kažemo da Sunčev vjetar ima dvije komponente, sporu i brzu. Spora komponenta je ujedno i gušća, a dolazi od zatvorenih magnetskih struktura korone blizu aktivnih područja na Suncu. Brza komponenta dolazi iz područja otvorenih silnica, koja se nazivaju koronine šupljine.

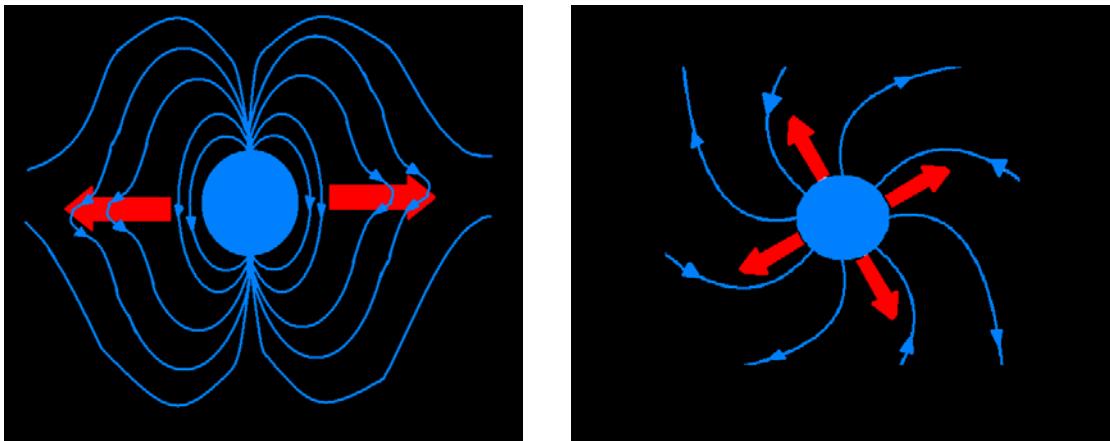
Sunčev vjetar nosi sa sobom magnetsko polje korone, čije silnice stoga prožimaju čitav međuplanetarni prostor Sunčevog sustava. To je svojstvo često za astrofizičke plazmene sustave i naziva se zamrznutost polja u plazmi. Ova pojava je posljedica visoke električne vodljivosti plazme, a nastaje zbog međudjelovanja gibanja nabijenih čestica i magnetskog polja, gdje polje tjeri čestice da prate njegove silnice, a istovremeno gibanje čestica razvlači i savija silnice. Međutim, bez obzira koliko se silnice deformirale, gibanje čestica će i dalje biti vezano uz njih. Međuplanetarno magnetsko polje (eng. „Interplanetary magnetic field“, IMF) je dakle „zamrznuto“ u Sunčevom vjetru.

⁷ R_s = radius Sunca, iznosi cca 695 000 km tj. približno 109 radijusa Zemlje

⁸ Princip DeLavalove mlaznice slijedi iz Bernoullijevog zakona, koji kaže da smanjenjem tlaka fluida raste njegova brzina (ako je manja od brzine zvuka)

⁹ Brzina zvuka u Sunčevom vjetru ovisi o temperaturi i iznosi 10-100 km/s

Sunčev magnetsko polje je približno dipolno, sa silnicama koje izlaze iz jedne, a ulaze u drugu hemisferu. Kako su silnice magnetskog polja zamrznute u plazmi, Sunčev vjetar ih nosi sa sobom kroz međuplanetarni prostor u radijalnom smjeru. Zbog Sunčeve rotacije polje se širi spiralno od Sunca, pa silnice osim radijalne imaju i azimutalnu komponentu. Na slici 11 nalaze se prikazi Sunca sa silnicama.

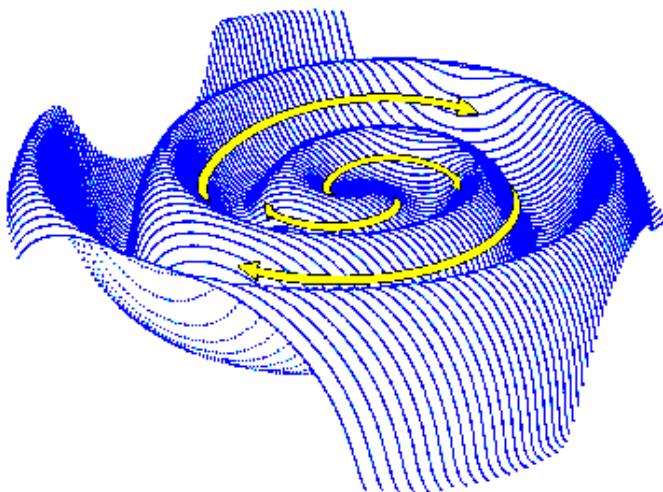


Slika 11 Silnice Sunčevog magnetskog polja

*lijevo – presjek po ravnini dipolne osi; desno – presjek po ekvatorskoj ravnini;
Silnice su označene plavim crtama, a crvenim strelicama gibanje Sunčevog vjetra*

Dakle, zbog zamrznutosti polja u plazmi dolazi do distorzije dipolnog magnetskog polja u radijalnom i azimutalnom smjeru. Što su silnice dalje od Sunca, taj efekt je jače izražen i IMF sve više liči toroidalnom polju. Kako su silnice savijene javlja se jedan sloj gdje su, sa njegovih različitih strana, silnice različito orijentirane, odnosno u kojem se mijenja polaritet polja. Ovo se može uočiti na presjeku po ravnini dipolne osi na slici 11 (lijeva slika). Taj sloj se proteže kroz međuplanetarni prostor i naziva se heliosferska strujna ploha (eng. „Heliospheric Current Sheet“, HCS). HCS nije ravna, kako bi se dalo zaključiti iz presjeka po ravnini dipolne osi, jer se na takvom

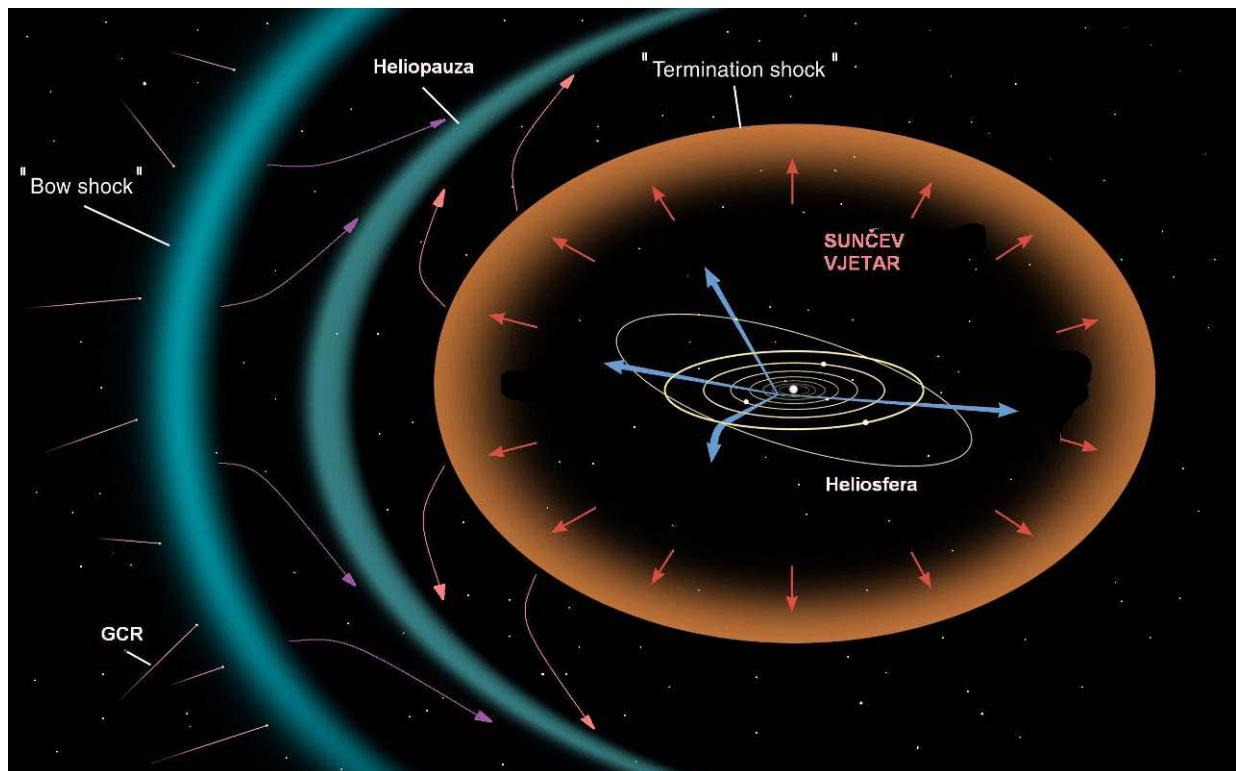
prikazu ne vidi azimutalna zakrivljenost silnica s obzirom na os rotacije, koja se ne podudara sa dipolnom osi. Ona je valovite prirode, zbog izmjena područja suprotno usmjerenih silnica, što se može uočiti na presjeku po ekvatorskoj ravnini (desna slika). Presjek po ekvatorskoj ravnini otkriva spiralnu strukturu, koja se naziva Parkerova spirala. Trodimenzionalni prikaz HCS i Parkerove spirale dan je na slici 12.



Slika 12 HCS i Parkerova spirala

[\(\[www.nasa.gov\]\(http://www.nasa.gov\)\)](http://www.nasa.gov)

Na udaljenosti od 1AU^{10} IMF varira od 1nT do 15nT , a može dostići i trenutne vrijednosti iznad 100nT (u frontama udarnih valova koje stvaraju CME-i). Proteže se do udaljenosti 100-150 AU, prožimajući prostor koji se naziva heliosfera. Kako Sunčev vjetar interagira sa međuzvjezdanim prostorom, on počinje usporavati te nastaje zaustavni udarni val (eng. „termination shock“), dok se u potpunosti ne zaustavi (heliopauza). S druge strane, međuzvjezdani vjetar interagira sa Sunčevim vjetrom te počinje usporavati, uslijed čega nastaje čeonog udarni val (eng. „bow shock“). Područje pod utjecajem međuzvjezdanog vjetra ograničeno je heliopauzom. Prikaz je dan na slici 13.



Slika 13 Heliosfera, heliopauza i međuzvjezdani prostor
www.nasa.gov

Područje između zaustavnog i čeonog udarnog vala naziva se helioploha (eng. „heliosheath“) i predstavlja prijelazno područje između heliosfere i međuzvjezdanog medija. Unutar helioplohe nalaze se područja usporavanja Sunčevog vjetra i međuzvjezdanog medija. Gibanje plazme u ta dva područja prikazano je na slici 13. Sunčev vjetar naznačen je crvenom bojom, a plazma međuplanetarnog vjetra ljubičastom. Ta dva područja međusobno su odvojena heliopauzom. Heliopauza stoga predstavlja sloj između međuzvjezdanog i Sunčevog vjetra.

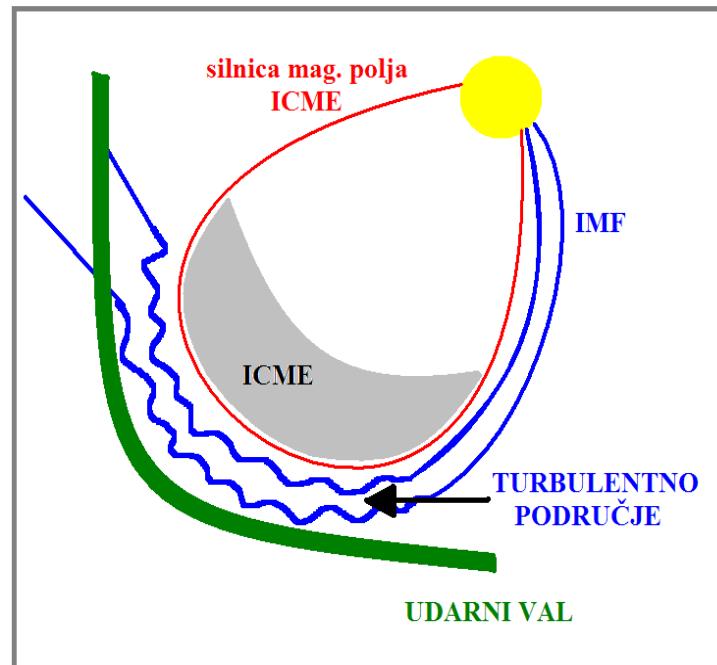
¹⁰ AU = „**Astronomical Unit**“, srednja udaljenost Zemlje od Sunca u jednoj godini, iznosi 149,6 milijuna km

3.3. Poremećaji Sunčevog vjetra

Poremećaji u Sunčevom vjetru uzrokovani su procesima na Suncu, a ovisno o kakvim procesima se radi, razlikujemo dva tipa – sporadične i povratne (eng. „sporadic“ i „recurrent“). Sporadični poremećaji Sunčevog vjetra su posljedica koroninih izbačaja, a povratni nastaju zbog interakcije brze i spore komponente Sunčevog vjetra (tzv. korotirajuća područja interakcije).

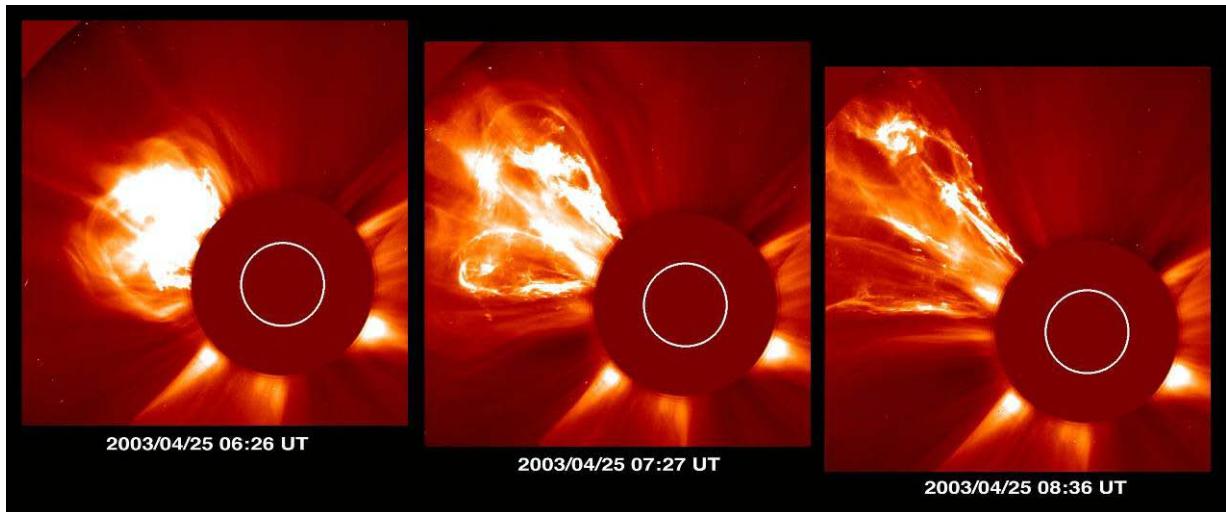
Koronini izbačaji (eng. „Coronal Mass Ejection“, CME) su erupcije magnetoplazme u Sunčevoj atmosferi, pri kojima područja zatvorenih silnica ekspandiraju u međuplanetarni prostor. Otkriveni su u 70-tim godinama prošlog stoljeća, a isprva se smatralo da ih pokreću Sunčevi bljeskovi. Kasnija mjerena su pokazala da su Sunčevi bljeskovi i CME-i različite pojave. CME-i su znatno većih dimenzija te, za razliku od Sunčevih bljeskova, koji nastaju u nižim dijelovima Sunčeve atmosfere, nastaju u Sunčevoj koroni. Nakon erupcije, magnetoplazma se širi kroz međuplanetarni prostor, međutim za razliku od običnog Sunčevog vjetra, ovdje magnetska energija dominira nad kinetičkom. Drugim riječima gibanje plazme ne povlači silnice za sobom, već ekspanzija silnica dovodi do gibanja plazme. CME koji se širi međuplanetarnim prostorom nazivamo međuplanetarnim koroninim izbačajem (eng. „Interplanetary Coronal Mass Ejection“, ICME).

Gibanje ICME-a kroz međuplanetarni prostor očituje se kao poremećaj u Sunčevom vjetru, jer plazma Sunčevog vjetra ne može prodrijeti unutar ICME, nego ju on gura ispred sebe, stvarajući zgasnuto područje vruće plazme. ICME također zgasne i poremeti silnice IMF-a u području ispred sebe, pa je područje vruće i guste plazme ujedno područje pojačanog i turbulentnog magnetskog polja. Ako se ICME kreće nadzvučnom brzinom, na njenom vodećem dijelu nastaje udarni val, kao što je prikazano na slici 14.



Slika 14 Prikaz ICME

CME-i se opažaju koronagrafom, uređajem koji oponaša prirodnu pojavu pomrčine Sunca (radi na principu da zasjeni svijetli disk Sunca). Na slici 15 je prikazan CME snimljen pomoću LASCO („Large Angle and Spectrometric Coronagraph“) koronografa na satelitu SOHO („Solar and Heliospheric Observatory“). Tri snimke prikazuju napredovanje CME-a u periodu od otprilike 2h.



**Slika 15 Koronin izbačaj snimljen u razmacima od 1h
(LASCO koronograf na SOHO satelitu, www.nasa.gov)**

Većina CME-a pokazuje trostruku strukturu: gustu jezgru, koja se na koronografu vidi kao svjetlo područje, zatim oko nje područje niske gustoće (tzv. šupljina) i svijetli rub. U prederuptivnom stadiju plazma se sporo podiže do određene visine, iza koje počne ubrzavati. Ovakvo ponašanje, uz činjenicu da su CME-i uglavnom vezani za aktivna područja, ukazuju na mogućnost da su CME-i ustvari erupcije usukanih magnetskih cijevi (eng. „flux-rope“) (Vršnak, 2008). Dodatan pokazatelj je i unutrašnje ustrojstvo ICME-a, koji pokazuju upravo takvu magnetsku strukturu (tzv. magnetski oblaci). Smatra se da energija, koja pokreće CME, dolazi iz koroninog magnetskog polja, čija energija se zbog gubitka ravnoteže transformira u kinetičku energiju, međutim mehanizam nastajanja se još istražuje.

Brzine većine CME-a se kreću od 20 do 2000 km/s, s prosječnom brzinom od otprilike 400 km/s. Brzi CME-i su obično popraćeni Sunčevim bljeskovima i usporavaju, dok oni sporiji ubrzavaju (Cane, 2000). Iz tog razloga često je teško povezati CME na Suncu, sa ICME-om koji je opažen blizu Zemlje. Takva kinematika da se opisati natjecanjem doprinosa Lorentzove sile i aerodinamičkog otpora. Na manjim udaljenostima od Sunca (nekoliko Sunčevih radijusa) dominantan je utjecaj Lorentzove sile, a na većim udaljenostima počinje dominirati utjecaj aerodinamičkog otpora. Spori CME ne doživljavaju Sunčev vjetar kao zapreku, već bivaju njime pogonjeni, za razliku od brzih CME, čija akceleracija se smanjuje i postaje negativna do trenutka kada se brzine CME i Sunčevog vjetra izjednače (Temmer et. al, 2008; Vršnak, 2005). Kinematika CME-a također je uvelike određena masom koju nosi, jer su masivniji CME-i manje podložni aerodinamičkom otporu i imaju veću pokretačku silu (Vršnak et. al, 2008). Utjecaj aerodinamičkog otpora na propagaciju ICME-a znači da će njegovo gibanje biti uvjetovano i brzinom Sunčevog vjetra, koja nije konstantna. Zbog toga vrijeme potrebno da ICME dođe sa Sunca do Zemlje ovisi o brzini Sunčevog vjetra (Vršnak & Žic, 2007).

Ako izbačena plazma, koja se širi međuplanetarnim prostorom (sa ili bez udarnog vala) sadrži strukturu magnetske cijevi, sa pojačanim usukanim magnetskim poljem,

te niskotemperaturnu protonsku komponentu plazme, govorimo o magnetskom oblaku.

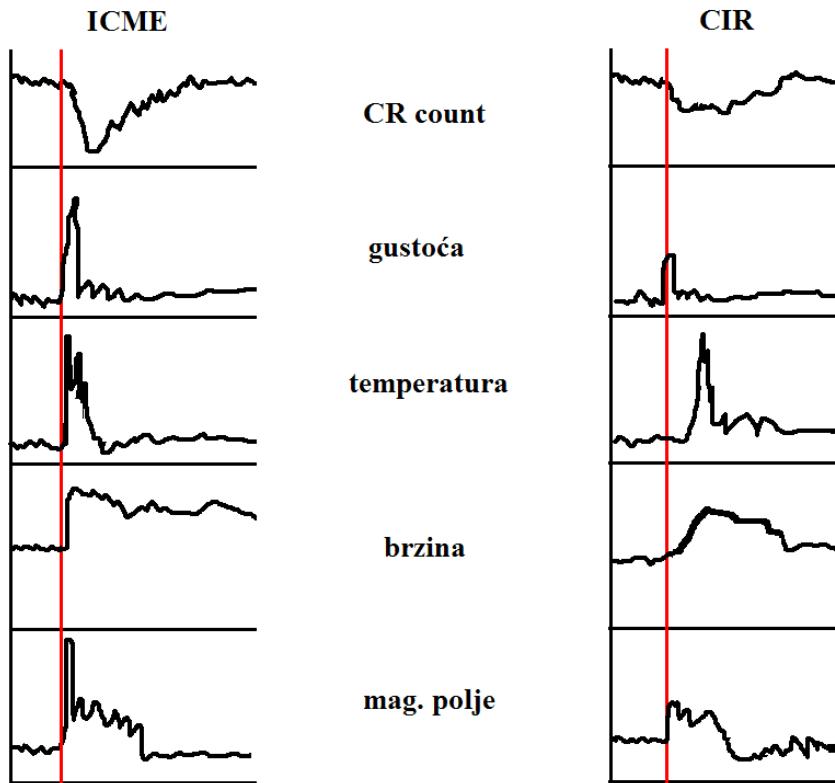
S druge strane, međudjelovanje brzog i sporog Sunčevog vjetra rezultira strukturom koja se naziva korotirajuće područje interakcije (eng. „Corotating Interaction Region“, CIR). To je područje sabijene, vruće plazme, koje brzi vjetar „gura“ ispred sebe. CIR je povratni (eng. „recurrent“) poremećaj u Sunčevom vjetru, koji se javlja s periodom Sunčeve rotacije, dakle 27 dana. Za CIR su karakteristične povećana gustoća i jakost magnetskog polja, nakon čega slijedi brza i vruća struja. Na taj način moguće je identificirati CIR u odnosu na ICME, gdje su porasti temperature i brzine istovremeni s magnetskim poljem i gustoćom. CIR na sličan način kao i ICME modulira tok CR, ali u puno manjoj mjeri.

3.4. Forbushevo smanjenje

Forbushevo smanjenje (FD) je pojam koji se odnosi na iznenadno smanjenje intenziteta CR. Pojava je prvi puta zabilježena 1937. godine, a njeno otkriće se pripisuje Scottu E. Forbushu, po kome je kasnije i nazvana. Isprva se smatralo da FD uzrokuju varijacije geomagnetskog polja, jer je postojala jasna veza između pada toka kozmičkih zraka i geomagnetskih oluja, međutim u pedesetim godinama prošloga stoljeća zaključeno je da su oboje (FD i geomagnetske oluje) posljedice istih pojava, povezanih sa Sunčevom aktivnošću.

U širem smislu FD je heliosferski fenomen promjene intenziteta pozadinskih CR, kojeg uzrokuju poremećaji u Sunčevom vjetru (Belov et al., 2001). Prema karakteristikama razlikuju se dva tipa, prvi koji imaju brži pad i sporiji porast (odnosno veću asimetriju) te drugi tip FD koji su manji i simetričnije prirode, odnosno imaju postepeniji i slabiji pad. Pokazalo se da se prvi vežu uz pojave međuplanetarnih koroninih izbačaja (ICME), te se u užem smislu naziv Forbushevo smanjenje koristi samo za smanjenja tog tipa (npr. Cane, 2000). Posebno, ako se radi o ICME sa udarnim valom, FD pokazuje specifičnu strukturu dvostrukog pada. Prvi pad uzrokuje područje turbulentnog magnetskog polja neposredno iza udarnog vala, a zatim se tok CR dodatno smanji prolaskom magnetoplazme (koja je generirala udarni val). FD može biti uzrokovani i prolaskom magnetskog oblaka, dakle kao što je objašnjeno u prethodnom poglavljiju, magnetoplazme specifične strukture magnetskog polja. Takvi FD-i su relativno mali i povezani sa jakim magnetskim poljima - za pad od 3% (glezano sa NM na Zemlji), potrebno je polje od 25 nT (Cane, 1993).

Drugi tip FD povezan je sa korotirajućim područjima interakcije (CIR). Ovi FD-i pojavljuju se periodično, vezano uz rotaciju Sunca, manjih su amplituda (0,5-2%) i zamjetniji su za slabije Sunčeve aktivnosti, kada je smanjen broj CME-a (Čalogović et al., 2008). Karakteristike ICME-a i CIR-eva (porasti gustoće, temperature i jakosti magnetskog polja) te specifični utjecaji koje imaju na tok CR (nepovratan ili povratan pad) prikazan je na slici 16.



Slika 16 Ilustracija karakteristika ICME i CIR te odgovarajući nepovratni i povratni FD

Spomenute dvije vrste poremećaja u Sunčevom vjetru su nerijetko povezane, odnosno često CIR prethodi ili slijedi ICME, onemogućavajući zasebnu identifikaciju (Belov et. al., 2001). Takva povezanost uočena je pri obradi podataka i u ovome radu, stoga se pri korištenju izraza Forbushevo smanjenje misli na definiciju FD-a u širem smislu.

Iako je već gotovo pola stoljeća poznato da postoji veza između poremećaja Sunčevog vjetra (CIR i ICME) i smanjenja toka kozmičkih zraka, ona je još uvijek predmet istraživanja. Postoje naznake da je jakost magnetskog polja CIR korelirana s padovima CR (Čalogović et al., 2008), a ista veza je istraživana i za ICME (Belov et al., 2001; Bostanjyan & Chilingarian, 2008), gdje također postoje slične veze, ne samo za magnetsko polje, već i brzinu te veličinu oblaka.

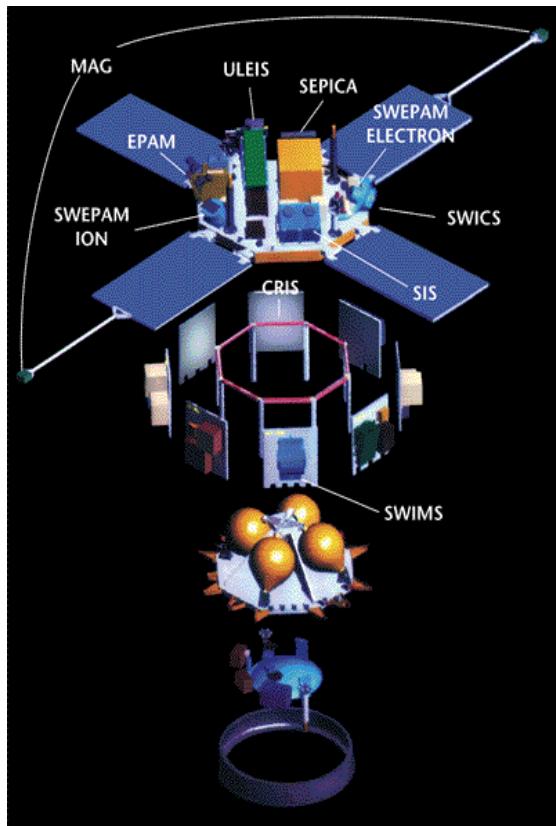
U ovome radu razmatrat će se općenito povezanost karakteristika Sunčevog poremećaja sa karakteristikama odgovarajućeg FD-a, međutim kako su uglavnom uzimani događaji iz perioda povećane Sunčeve aktivnosti, naglasak će biti na ICME-ima.

3.5. Detekcija Sunčevog vjetra i njegovih poremećaja

Mjerenja svojstava Sunčevog vjetra i njegovih poremećaja vrši se pomoću svemirskih letjelica kao što su SOHO („Solar and Heliospheric Observatory“), ACE („Advanced Composition Explorer“), WIND (punim imenom „Comprehensive Solar Wind Laboratory for Long-Term Solar Wind Measurements“), Pioneer, Voyager. U ovom radu kao izvor podataka o Sunčevom vjetru korišteni su podaci sa ACE-a.

ACE („Advanced Composition Explorer“) je satelit lansiran u sklopu NASA-inog istraživačkog projekta 25.08.1997. godine. Svrha njegove misije je detekcija Sunčevog vjetra te kozmičkih zraka, pri čemu kruži po kvaziperiodičkoj putanji oko L1

Lagrangeove točke¹¹. ACE nosi 9 mjernih instrumenata, koji identificiraju nadolazeće čestice i mjeri njihova svojstva. ACE i njegovi instrumenti prikazani su na slici 17.



CRIS, SIS i ULEIS su detektori koji zajedno pokrivaju interval energija 20 keV/nukleonu do 500 MeV/nukleonu, a zadaća im je identificirati sastav nadolazećih čestica. Pri tome koriste poluvodičke detektore za detekciju energija čestica. CRIS („The Cosmic Ray Isotope Spectrometer“) je instrument koji prati GCR koje dolaze uglavnom iz naše galaksije, energija 50-500 MeV/nukleonu te atomskih brojeva Z=2 do Z=30. SIS („The Solar Isotope Spectrometer“) prati SCR, ACR te niskoenergetske GCR energija 10-100 MeV/nukleonu i atomskih brojeva Z=2 do Z=28. ULEIS („Ultra Low Energy Isotope Spectrometer“) mjeri SCR energija 20KeV/nukleonu do 10 MeV/nukleonu i atomskih brojeva Z=2 do Z=28.

Slika 17 ACE sa mjernim instrumentima
(www.srl.caltech.edu/ACE/)

SEPICA („Solar Energetic Particle Ionic Charge Analyzer“) je uređaj koji identificira atomsku jezgru, odredi joj energiju i stupanj ionizacije te na taj način nudi uvid u zastupljenost iona u Sunčevom vjetru. Radi u intervalu energija većem od 0.2 MeV/nukleonu. U mirnim razdobljima može se koristiti za analizu ACR.

SWICS („Solar Wind Ion Composition Spectrometer“) i **SWIMS** („Solar Wind Ion Mass Spectrometer“) su uređaji koji identificiraju kemijski i izotopni sastav SCR i

¹¹ Lagrangeove točke su mjesto u kojima malo tijelo pod utjecajem gravitacije dva veća tijela ostaje u orbiti na približno istoj udaljenosti od njih. L1 je točka udaljena od Zemlje 1,5 milijuna km, a od Sunca 148,5 milijuna km. To je jedna od 3 kolinearne Lagrangeove točke, koje leže na spojnici Sunce-Zemlja i u kojima je stabilna orbita nije moguća, pa se ACE-ovo kretanje ispravlja pogonom.

ACR. To su ustvari TOF maseni spektrometri¹² sa elektrostatskim analizatorom. SWICS detektira čestice do 100 keV/nukleonu, identificira pojedine kemijske elemente i određuje im stupanj ionizacije te može razlučiti izotope samo laganih elemenata H i He, dok SWIMS detektira čestice do 10keV/nukleonu i identificira pojedine kemijske elemente i izotope od He (Z=2) do Ni (Z=28).

EPAM („Electron, Proton and Alpha Monitor“) je sastavljen od pet uređaja. Dva su LEFS uređaja („Low Energy Foil Spectrometer“), koji mjeru tok i smjer dolaska elektrona energija većih od 30 keV/nukleonu. Tok i smjer dolaska iona energija većih od 50 keV/nukleonu mjeru dva LEMS uređaja („Low Energy Magnetic Spectrometer“), a CA uređaj („Composition Aperture“) mjeri njihov elementarni sastav. Energije nadolazećih čestica detektiraju se poluvodičkim detektorima.

SWEPM („The Solar Wind Electron, Proton and Alpha Monitor“) je uređaj koji mjeri tokove čestica u Sunčevom vjetru (elektrona, protona i alfa čestica) u ovisnosti o energiji i smjeru. Sastoje se od dva uređaja SWEPM-I, koji detektira protone i alfa čestice (dakle pozitivne ione) te SWEPM-E, koji detektira elektrone. Oba uređaja su elektrostatski analizatori, koji daju informacije koliko je čestica određene energije u Sunčevom vjetru te koje su im putanje (u kojem smjeru se gibaju). SWEPM-I uređaj detektira čestice u području energija od 0,26 KeV do 36 KeV, a SWEPM-E od 1 eV do 1350 eV. Korišteni su podaci sa SWEPM-I detektora, čiji je elektrostatski analizator detaljnije opisan u Dodatku 3.

MAG („Magnetometer“) je instrument koji mjeri lokalno IMF, a koji se sastoji od 2 jednakih triaksijalnih „fluxgate“ magnetometra. Može mjeriti pojedine komponente magnetskog polja, orijentirane s obzirom na osi satelita. MAG može vršiti mjerena u osam različitih područja od ± 4 nT do $\pm 65 - 536$ nT, gdje se promjena područja mjerena najčešće aktivira automatski. Detaljniji opis MAG-ove detekcije pomoću triaksijalnog „fluxgate“ magnetometra prikazan je u Dodatku 4.

Osi satelita ACE čine tzv. RTN koordinatni sustav („Radial-Tangential-Normal“), sa satelitom u ishodištu, čiju jednu os definira spojnica sa Suncem, a drugu vektorski umnožak spojnica i osi Sunčeve rotacije. Mjerena ACE-ovih instrumenata također su predstavljena u GSE („Geocentric Solar Ecliptic“) i GSM („Geocentric Solar Magnetospheric“) koordinatama. GSE sustav je zadan spojnicom Zemlja-Sunce i sjevernim polom u odnosu na ekliptiku, a GSM spojnicom Zemlja-Sunce i projekcijom diplone osi geomagnetskog polja na yz ravninu GSE sustava.

¹² Time-Of-Flight maseni spektrometar određuje masu nabijene čestice na temelju ubrzanja u određenom potencijalu

4. PODACI I METODE MJERENJA

Za određivanje karakteristika FD-a korišteni su podaci neutron monitora sa srednjih širina sjeverne polutke ($39,37^{\circ}$ N – $62,01^{\circ}$ N), graničnog rigiditeta $1,65$ – $3,66$ GV, na nadmorskim visinama 50 m – 3400 m. Podaci su preuzeti sa stranica SPIDR (Space Physics Interacive Data Resource; <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>).

Korištene su satno usrednjene vrijednosti, ispravljene za atmosferski tlak, koji također utječe na intenzitet CR. Podaci su normirani na prva četiri dana, kako bi se dobile relativne vrijednosti. Uzimana je srednja vrijednost za 3 ili 4 stanice sličnog graničnog rigiditeta, na različitim geografskim duljinama (ovisno o dostupnosti podataka), kako bi se smanjile dnevne varijacije. Navedeni kriteriji odabira podataka korišteni su kako bi se naglasak stavio na veća relativna smanjenja toka CR, što je za očekivati pri prolasku ICME.

Birane su stanice što sličnijih graničnih rigiditeta, zbog ovisnosti toka CR o energiji čestica. Lista stanica sa karakterističnim podacima dana je u tablici 2.

Stanica	Geografska širina	Geografska duljina	Nadmorska visina	Granični rigiditet
Climax	$39,37^{\circ}$ N	$-106,18^{\circ}$ W	3400 m	2,99 GV
Newark	$39,70^{\circ}$ N	$-75,70^{\circ}$ W	50 m	2,09 GV
Moscow	$55,47^{\circ}$ N	$37,32^{\circ}$ E	200 m	2,43 GV
Novosibirsk	$54,48^{\circ}$ N	$83,00^{\circ}$ E	163 m	2,91 GV
Irkutsk3	$52,28^{\circ}$ N	$104,02^{\circ}$ E	3000 m	3,66 GV
Yakutsk	$62,01^{\circ}$ N	$129,43^{\circ}$ E	105 m	1,65 GV
Magadan	$60,04^{\circ}$ N	$151,05^{\circ}$ E	220 m	2,09 GV

**Tablica 2: Neutronski monitori čiji podaci su preuzeti
(poredane prema geografskoj duljini od najzapadnije do najistočnije)**

Vremenski periodi birani su prema popisu identificiranih parova CME-ICME (Schwenn et al., 2005) i većih Forbushevih smanjenja iz baze podataka SOTERIA-e („SOlar-TERrestrial Investigations and Archives”), a na način da obuhvaćaju podatke 5 dana prije događaja i 15 dana nakon, dakle sveukupno 21 dan.

Podaci o svojstvima poremećaja Sunčevog vjetra preuzeti su sa ACE-ovih stranica: www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA_MAG-SWEPAM.html, a dobiveni su mjerjenjem instrumenata MAG (magnetsko polje i fluktuacije magnetskog polja) i SWEPAM (gustoća, temperatura i brzina plazme). Vremenski period (21 dan) ovih mjerjenja odgovarao je vremenskom periodu odgovarajućih podataka sa NM, gdje su također korištena satna usrednjena, kako bi se mogla uočiti istovremenost pojedinih događaja detektiranih zasebno pomoću NM i ACE-ovih instrumenata.

Za ukupno 26 vremenskih perioda preuzeti su podaci: tok CR, zatim temperatura, gustoća i brzina plazme u Sunčevom vjetru te jakost i fluktuacije IMF. Za svaki vremenski period nacrtano je po 6 grafičkih prikaza razvoja pojedine od navedenih veličina u vremenu (na istoj vremenskoj skali) te su grafovi posloženi jedan ispod drugog, kako bi se uočili istovremeni događaji. Na nekim grafovima je izabrano i po

nekoliko događaja. Glavni kriterij za izbor događaja bio je zamjetan porast jakosti magnetskog polja (uglavnom popraćen i znatnim porastom fluktuacija magnetskog polja). Zatim se tražio odgovarajući pad u broju CR (obično malo zakašnjeli u odnosu na porast mag. polja). Pomoćni, no ne i nužni kriterij bio je porast brzine, temperature i gustoće, koji je istovremen, ili približno istovremen sa porastom magnetskog polja (za ICME su istovremeni, a za CIR ne, kao što je objašnjeno u poglavljima 3.3. i 3.4.). Neki događaji su eliminirani zbog nemogućnosti određivanja trajanja oporavka relativnog toka CR. Nepotpunost podataka o gustoći, temperaturi i brzini nisu utjecali na izbor događaja, jer je primarna motivacija bila naći vezu između magnetskog polja i amplitude FD-a.

Prema ovakvim kriterijima izabrano je 56 događaja. Za svaki izabrani događaj mjerene su amplituda i trajanje Forbushevog smanjenja, jakost i fluktuacija magnetskog polja, trajanje poremećaja te brzina. Vremenska skala dana je danima u godini (eng. „Day of the Year“; DOY). Slijedi detaljan opis mjerena, popraćen slikovnim primjerom na slici 18.

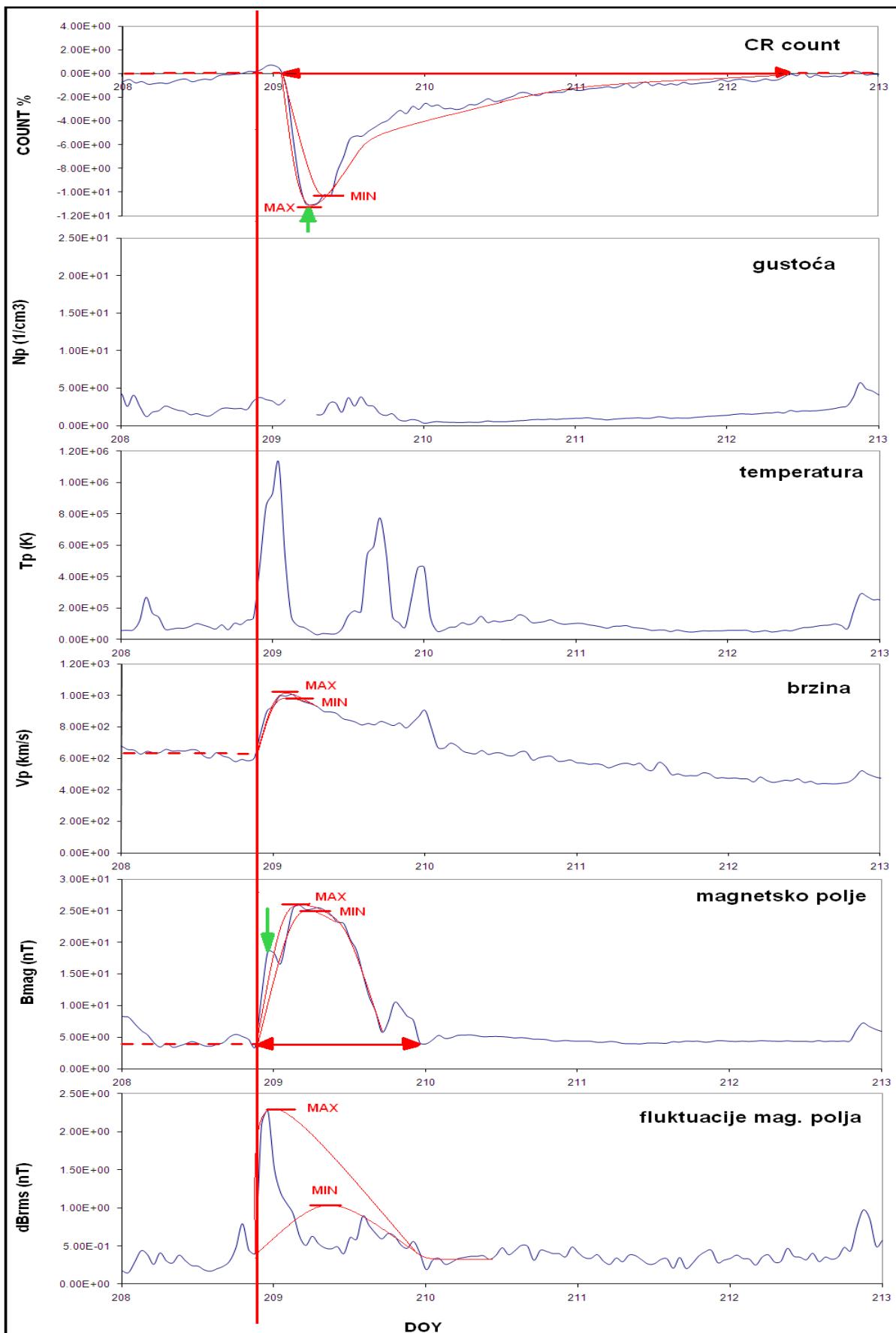
Tok CR (count %)

Relativni broj CR mjera je toka CR i izražen je u postotcima (%). Stoga će se u dalnjem tekstu koristiti i navoditi izraz tok CR.

Referentni nivo toka CR određen je prema trendu krivulje u danima koji prethode padu, a prema njemu je zatim mjerena amplituda pada. Taj nivo ne mora biti i često nije 0% (što je slučaj u danom primjeru na slici 18). Pri određivanju referentnog nivoa uzimano je u obzir da neposredno prije FD dolazi do malog porasta toka CR (zbog refleksije i/ili akceleracije CR na udarnom valu), pa takvi porasti nisu utjecali na određivanje referentne vrijednosti. Kao početak FD uzimao se trenutak kada se tok, nakon maloga porasta, vrati na referentnu vrijednost. Mjerene su amplituda pada, trajanje pada te ukupno trajanje (dakle trajanje pada i oporavka).

Amplituda FD određivana je na način da su mjerene maksimalna i minimalna amplituda (na slici 18 MAX i MIN). Kao stvarna amplituda uzimala se srednja vrijednost. Takav pristup uzima u obzir subjektivnost istraživača i daje mogućnost izračuna greške ((MAX-MIN)/2). Trajanje pada FD-a određivano je od početka pada do minimuma, koji je na slici 18 naznačen zelenom strelicom.

Ukupno trajanje FD-a (dakle trajanje pada plus oporavak) određivao se od početka do trenutka kada se vrati na referentnu razinu (kao u primjeru na slici 18), no ne uvijek. Nerijetko je povratak FD-a bio prekinut novim događajem (kada se početak novog događaja uzimao kao kraj prethodnog), ili bi se trend rasta toka CR nastavio i nakon što bi on dostigao referentnu vrijednost. U tom slučaju bi se kraj FD-a odredio subjektivnom procjenom. Iz tih razloga ovdje nije rađena ocjena greške pri mjerenu. Poteškoće u određivanju trajanja FD-a su uglavnom bile ključni kriterij kod izbora događaja. Mjereni vremenski periodi izraženi su u satima (h).



Slika 18 Prikaz mjerena na primjeru događaja 26.07.2004.

Temperatura Tp (K) i gustoća plazme Np (1/cm³)

Mjerenja ovih veličina nisu obrađivana, već su ti podaci korišteni kao pomoć u identifikaciji događaja. Kao što je spomenuto u poglavljima 3.3 i 3.4. za ICME je karakteristično da maksimumi porasta Bmag, dBrms, Vp, Np i Tp (dakle jakosti mag. polja, fluktuacija mag. polja, brzine, gustoće i temperature) budu istovremeni, a kod CIR su maksimumi Vp i Np pomaknuti u odnosu na Bmag, dBrms i Tp. Temperatura je izražena u kelvinima (K), a gustoća u 1/cm³)

Brzina plazme Vp (km/s)

Mjerena je relativna promjena brzine plazme, jer uz poremećaje u Sunčevom vjetru vežemo porast brzine. Kao i pri mjerenu amplitude FD-a određivane su maksimalna i minimalna brzina, čime je dobiven srednji porast brzine. Izražene su u mjernim jedinicama km/s.

Magnetsko polje Bmag (nT)

Mjereni su amplitudi porasta magnetskog polja Bmag u odnosu na pozadinsko magnetsko polje, određeno prema vrijednosti neposredno prije porasta. Amplitude su također mjerene metodom određivanja maksimalne i minimalne amplitude te je određena greška (slično kao kod amplitude FD-a i brzine). U nekim događajima, kod kojih je jasno izražen efekt udarnog vala, postoji velika razlika maksimalne i minimalne amplitude, što dovodi do velikih grešaka. Iz tog razloga su relativne greške amplituda Bmag puno veće od istih za FD.

Trajanje poremećaja Sunčevog vjetra određeno je iz mjerjenja Bmag. Ovdje su početak i završetak prolaska poremećaja prilično jasno vidljivi (u usporedbi sa podacima toka CR). Trajanje porasta Bmag određivan je od početka do prvog maksimuma (označeno zelenom strelicom). Mjereni vremenski periodi izraženi su u satima (h), a amplitude u nanoteslama (nT)¹³.

Fluktuacije magnetskog polja dBrms (nT)

Fluktuacije magnetskog polja dane su veličinom dBrms¹⁴ računate prema formuli:

$$dBrms = \sqrt{\sum_i \langle B_i^2 - \langle B_i \rangle_t^2 \rangle_t}$$

Gdje je $\langle \rangle_t$ oznaka za usrednjjenje po vremenu, a B_i su komponente magnetskog polja.

¹³ $nT=10^{-9}T$

¹⁴ RMS=Root Mean Square, korijen srednjeg odstupanja kvadrata

Mjerene su amplitude u porastu fluktuacija magnetskog polja metodom određivanja maksimalne i minimalne amplitude, kao kod FD, Vp i Bmag te je napravljen račun grešaka. Ovdje su razlike između minimalne i maksimalne amplitude često jako izražene, neovisno o udarnim valovima, pa su i greške velike. Rezultati su izraženi u nanoteslama (nT).

Prilikom mjerjenja zamjećeno je da postoje dva tipa događaja, koji za isti Bmag pokazuju različite amplitude FD. Tip1 događaj će za isto Bmag imati manji FD nego tip2 događaj. Također su identificirane dvije različite strukture događaja. Složeni događaji su takvi koji imaju kompleksnu strukturu te djeluju kao grupa međusobno nerazlučivih događaja. Kod takvih događaja je često bilo teško odrediti trajanje FD. Jednostavni događaji su uglavnom izolirani ICME-i, ili ICME-i popraćeni sa CIR-ovima. Među izabranim događajima također su identificirani CIR, ICME i miješani CIR-ICME događaji.

Mjerenja su prikazana grafički, a ovisnosti karakteristika FD o karakteristikama poremećaja u Sunčevom vjetru istraživana je linearnom regresijom. Jednadžbe pravaca dobivenih linearom regresijom te odgovarajući koeficijenti determinacije¹⁵ dani su ispod grafova u odgovarajućim bojama.

Korišteni su Pearsonovi koeficijenti korelacije, računati prema formuli:

$$R = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{(N \sum x^2 - (\sum x)^2)(N \sum y^2 - (\sum y)^2)}}$$

Izmjereni podaci također su prikazani u tablici 3.

¹⁵ Koeficijent determinacije kvadrat je koeficijenata korelacije, a njegov iznos nam kaže koliko je promjene zavisne varijable (y) objasnjeno promjenom nezavisne varijable (x)

dolazak	B	B err	B err%	dB	dB err	dB err%	Fd	Fd	Fd err	Fd err%	t(B)	T(B)	t(Fd)	T(Fd)	v	v err	v err %	Bv	BvT(B)	BT(B)	Fd T(Fd)	struktura	TIP	CME/CIR
01.05.1998.	11	2.0	18	1.0	0.35	37	-4.0	4.0	0.15	4	4.8	36	7.2	52.8	178	38	21	1953	70290	396	208.56	jednostavná	2	CME
04.05.1998.	11	1.5	14	1.8	0.4	22	-2.2	2.2	0.3	14	4.8	31.2	2.4	55.2	318	38	12	3334	104013	327.6	121.44	jednostavná	1	CME
08.05.1998.	4	0.5	14	1.2	0.25	22	-0.9	0.9	0.2	22	4.8	9.6	7.2	21.6	135	20	15	473	4536	33.6	19.44	jednostavná	2	CIR
24.09.1998.	14	4.0	29	1.8	0.3	17	-6.8	6.8	0.1	1	4.8	33.6	12	117.6	338	53	16	4725	158760	470.4	799.68	jednostavná	2	CME
02.10.1998.	7	2.0	29	0.8	0.1	13	-0.9	0.9	0.1	11	2.4	9.6	7.2	16.8	163	13	8	1138	10920	67.2	15.12	jednostavná	2	CME
08.11.1998.	26	4.0	15	1.1	0.2	18	-5.5	5.5	0.1	2	9.6	52.8	7.2	112.8	193	33	17	5005	264264	1372.8	620.4	jednostavná	1	CME
12.11.1998.	14	1.0	7	0.7	0.05	8	-1.8	1.8	0.1	6	16.8	64.8	12	98.4	85	20	24	1190	77112	907.2	177.12	složená	1	CME+CIR
18.02.1999.	21	0.5	2	1.5	0.55	38	-4.1	4.1	0.2	5	2.4	28.8	7.2	45.6	250	30	12	5125	147600	590.4	186.96	jednostavná	1	CME
01.03.1999.	8	1.0	13	0.7	0.15	23	-2.0	2.0	0.1	5	7.2	9.6	12	14.4	118	18	15	940	9024	76.8	28.8	složená	2	CIR
05.05.1999.	7	0.5	8	0.8	0.05	7	-2.5	2.5	0.1	4	2.4	40.8	7.2	45.6	98	13	13	634	25857	265.2	114	složená	2	CME
13.05.1999.	7	1.5	23	0.8	0.1	13	-1.1	1.1	0.15	14	4.8	9.6	4.8	24	93	18	19	601	5772	62.4	25.2	jednostavná	1	CIR
22.05.1999.	9	0.5	6	0.6	0.05	9	-2.7	2.7	0.1	4	9.6	76.8	9.6	91.2	175	25	14	1488	114240	652.8	246.24	složená	2	CIR+CME+CIR
26.06.1999.	14	4.0	29	1.1	0.15	14	-3.2	3.2	0.1	3	2.4	55.2	7.2	69.6	310	10	3	4340	239568	772.8	222.72	složená	1	CME
02.07.1999.	5	0.5	11	0.7	0.15	23	-1.2	1.2	0.05	4	4.8	40.8	2.4	45.6	170	25	15	765	31212	183.6	52.44	složená	2	CME
15.08.1999.	13	0.5	4	1.4	0.05	4	-2.0	2.0	0.05	3	7.2	45.6	12	69.6	275	40	15	3438	156750	570	135.72	složená	1	CIR
19.08.1999.	3	0.5	20	0.5	0.05	11	-3.5	3.5	0.2	6	2.4	12	14.4	24	118	13	11	294	3525	30	84	jednostavná	2	CME
19.01.2000.	9	1.0	11	0.6	0.05	9	-1.0	1.0	0.1	10	7.2	43.2	7.2	48	85	35	41	765	33048	388.8	48	složená	2	CIR
22.01.2000.	13	0.5	4	1.1	0.6	55	-1.2	1.2	0.1	8	2.4	69.6	0	79.2	78	8	10	969	67425	870	95.04	složená	1	CME(+CIR?)
27.01.2000.	19	0.5	3	1.9	0.5	26	-1.0	1.0	0.05	5	7.2	9.6	7.2	19.2	398	23	6	7354	70596	177.6	18.24	jednostavná	1	CIR+CME
11.02.2000.	5	0.5	11	0.8	0.1	13	-1.8	1.8	0.05	3	2.4	16.8	19.2	24	73	13	17	326	5481	75.6	42	jednostavná	2	CME
11.02.2000.	14	1.0	7	1.5	0.2	13	-3.7	3.7	0.05	1	2.4	38.4	7.2	55.2	150	20	13	2100	80640	537.6	201.48	složená	2	CME
20.02.2000.	8	1.0	13	0.9	0.1	11	-1.6	1.6	0.1	6	7.2	48	4.8	60	95	15	16	760	36480	384	96	složená	1	CME(+CIR?)
03.04.2000.	6	1.0	17	0.3	0.05	20	-1.0	1.0	0.05	5	7.2	21.6	7.2	19.2	45	15	33	270	5832	129.6	18.24	jednostavná	2	(CME?)
06.04.2000.	22	2.5	12	1.5	0.35	24	-2.4	2.4	0.05	2	7.2	21.6	4.8	79.2	223	28	12	4784	103329	464.4	186.12	jednostavná	1	CME(+CIR?)
16.04.2000.	9	1.0	11	0.6	0.05	9	-1.5	1.5	0.1	7	4.8	24	7.2	40.8	110	15	14	990	23760	216	61.2	jednostavná	1	CIR+CME
03.06.2000.	6	1.0	17	0.3	0.1	33	-1.1	1.1	0.05	5	2.4	21.6	7.2	21.6	65	10	15	390	8424	129.6	22.68	jednostavná	1	CIR
08.06.2000.	15	1.5	10	1.3	0.65	52	-6.2	6.2	0.1	2	4.8	60	9.6	72	248	13	5	3589	215325	870	446.4	složená	1	CME(+CIR?)
13.07.2000.	14	2.0	14	1.2	0.65	57	-7.8	7.8	0.1	1	4.8	16.8	12	31.2	140	20	14	1960	32928	235.2	243.36	jednostavná	2	CME
15.07.2000.	41	2.5	6	3.8	0.3	8	-7.6	7.6	0.1	1	2.4	26.4	9.6	79.2						1069.2	601.92	jednostavná	1	CME
16.09.2000.	10	3.5	35	0.3	0.1	33	-3.4	3.4	0.2	6	4.8	62.4	4.8	57.6	173	8	4	1639	31464	873.6	195.8	složená	2	CIR
17.09.2000.	30	3.5	12	2.5	0.6	24	-6.3	6.3	0.4	6	2.4	45.6	12	146.4	273	38	14	7903	360354	1368	922.32	jednostavná	1	CME
12.10.2000.	13	1.0	8	1.1	0.05	5	-2.8	2.8	0.15	5	4.8	76.8	2.4	81.6	130	10	8	1690	129792	998.4	224.4	složená	1	CME+CIR
28.10.2000.	11	3.0	27	0.8	0.05	7	-6.0	6.0	0.15	3	4.8	74.4	7.2	74.4	83	8	9	908	67518	818.4	442.68	složená	2	CME
06.11.2000.	17	2.5	15	0.8	0.05	7	-5.9	5.9	0.15	3	9.6	55.2	7.2	88.8	130	10	8	2145	118404	910.8	519.48	složená	1	CME

dolazak	B	B err	B err%	dB	dB err	dB err%	Fd	Fd	Fd err	Fd err%	t(B)	T(B)	t(Fd)	T(Fd)	v	v err	v err %	Bv	BvT(B)	BT(B)	Fd T(Fd)	struktura	TIP	CME/CIR	
11.11.2000.	5	0.5	11	0.9	0.1	11	-1.9	1.9	0.05	3	2.4	14.4	4.8	16.8	133	13	9	596	8586	64.8	31.08	jednostavna	2	CME	
26.11.2000.	20	3.0	15	1.4	0.05	4	-5.4	5.4	0.1	2	2.4	33.6	9.6	33.6	150	20	13	3000	100800	672	181.44	složena	1	CME	
28.11.2000.	7	2.0	29	0.5	0.05	11	-1.9	1.9	0.15	8	2.4	24	14.4	38.4	65	5	8	455	10920	168	71.04	jednostavna	1	CME?	
23.01.2001.	7	1.5	23	0.6	0.1	17	-2.1	2.1	0.2	10	2.4	79.2	14.4	117.6	133	8	6	861	68211	514.8	246.96	složena	2	CME	
31.01.2001.	6	1.0	17	0.9	0.1	11	-2.1	2.1	0.05	2	0	52.8	7.2	76.8	68	18	26	405	21384	316.8	157.44	složena	2	CME(+CIR?)	
03.03.2001.	10	0.5	5	1.0	0.15	16	-2.5	2.5	0.1	4	2.4	74.4	12	100.8	133	18	13	1259	93651	706.8	252	složena	2	CME+CIR	
07.04.2001.	9	1.0	11	0.7	0.3	43	-1.0	1.0	0.1	10	0	16.8	4.8	16.8	83	13	15	743	12474	151.2	16.8	jednostavna	1	CME	
08.04.2001.	11	2.0	18	1.3	0.25	20	-5.3	5.3	0.2	4	4.8	36	7.2	72	280	20	7	3080	110880	396	381.6	jednostavna	2	CME	
11.04.2001.	27	1.5	6	3.0	0.05	2	-	10.0	10.0	0.25	3	4.8	74.4	7.2	148.8	305	25	8	8083	601338	1971.6	1480.56	složena	2	CME
18.04.2001.	14	4.5	33	1.2	0.2	17	-3.4	3.4	0.2	6	2.4	50.4	16.8	72	145	15	10	1958	98658	680.4	244.8	složena	1	CME	
06.11.2001.	36	19.0	53	2.7	0.45	17	-9.7	9.7	0.25	3	4.8	21.6	16.8	151.2						777.6	1459.08	jednostavna	1	(CME?)	
19.11.2001.	6	1.5	27	0.9	0.05	6	-1.7	1.7	0.1	6	2.4	9.6	7.2	14.4	128	13	10	701	6732	52.8	24.48	jednostavna	2	CME	
24.11.2001.	43	8.5	20	3.9	0.15	4	-7.0	7.0	0.25	4	4.8	38.4	7.2	98.4	513	43	8	21781	836400	1632	683.88	složena	1	CME	
24.10.2003.	24	1.0	4	1.6	0.1	6	-3.9	3.9	0.2	5	4.8	40.8	7.2	40.8	135	10	7	3240	132192	979.2	159.12	složena	1	CME	
29.10.2003.	33	5.0	15	4.9	0.45	9	-22.3	22.3	0.65	3	2.4	26.4	9.6	33.6						871.2	747.6	jednostavna	2		
30.10.2003.	29	2.5	9	2.1	0.15	7	-4.0	4.0	0.4	10	7.2	33.6	4.8	33.6						957.6	134.4	jednostavna	1		
04.11.2003.	12	1.5	13	1.8	0.95	54	-1.9	1.9	0.15	8	4.8	14.4	4.8	16.8	258	13	5	2961	42642	165.6	31.08	jednostavna	1	CME	
22.07.2004.	13	0.5	4	0.9	0.1	11	-2.2	2.2	0.2	9	2.4	43.2	4.8	38.4	265	35	13	3313	143100	540	84.48	složena	2	CME	
24.07.2004.	16	1.0	6	1.3	0.2	15	-3.8	3.8	0.3	8	2.4	48	9.6	62.4	95	25	26	1520	72960	768	237.12	složena	2	CME	
26.07.2004.	22	0.5	2	1.5	0.65	45	-	10.9	10.9	0.2	2	2.4	26.4	7.2	79.2	378	33	9	8116	214269	567.6	863.28	jednostavna	2	CME
17.01.2005.	24	7.0	29	2.3	0.25	11	14.2	14.2	0.3	2	4.8	67.2	4.8	100.8	263	13	5	6300	423360	1612.8	1431.36	složena	2	CME	
21.01.2005.	23	2.0	9	2.1	0.25	12	-5.6	5.6	0.25	5	4.8	31.2	4.8	79.2	340	50	15	7820	243984	717.6	439.56	jednostavna	1	CME	

Tablica 3: Izmjereni podaci

oznake: **dolazak**-datum početka događaja, **B**-amplituda mag. polja, **Berr** - greška ampl. mag. polja, **Berr%**-relativna greška ampl. mag. polja, **dB**-amplituda fluktuacija mag. polja, **dBerr**- greška ampl. flukt. mag. polja, **dBerr%**-relativna greška ampl. flukt. mag. polja, **Fd**-Forbushevo smanjenje, **|Fd|**-apsolutna vrijednost FD, **Fderr** – greška FD, **Fderr%**-relativna greška FD, **t(B)**-trajanje porasta mag. polja, **T(B)**-trajanje poremećaja, **t(Fd)**-trajanje pada FD, **T(Fd)**-trajanje FD, **v**-relativna brzina poremećaja, **verr**-greška brzine, **verr%**-relativna greška brzine, **Bv**-umnožak ampl. mag. polja i brzine, **BvT(B)**-umnožak ampl. mag. polja, brzine i T(B), **BT(B)**-umnožak apml. mag. polja i T(B), **|Fd|T(Fd)**- umnožak |FD| i T(Fd), **struktura**-struktura poremećaja, **TIP**-tip poremećaja, **CME/CIR**-vrsta poremećaja

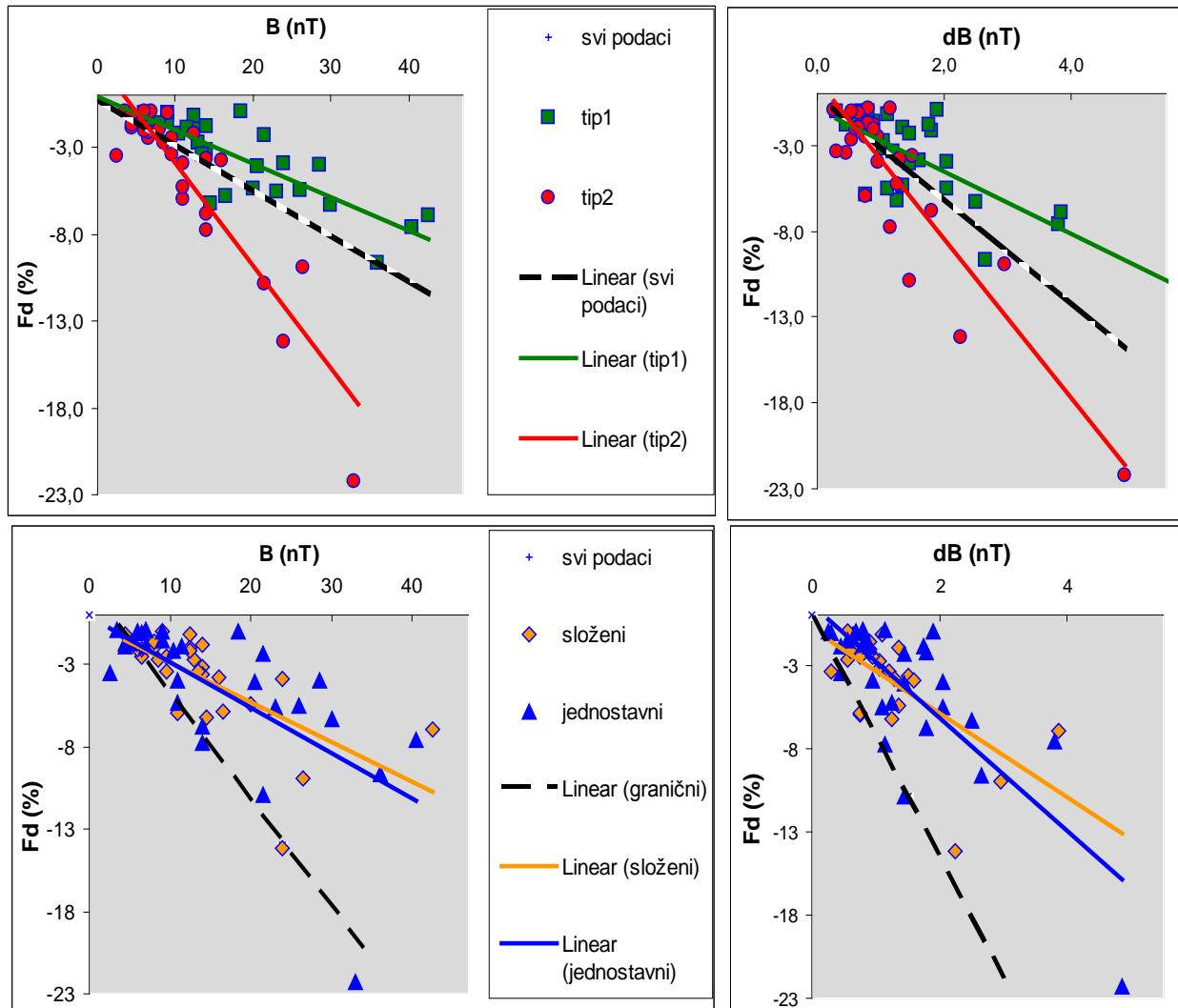
5. REZULTATI MJERENJA I DISKUSIJA

Na grafu 1 prikazana je ovisnost amplitude FD-a o amplitudi porasta jakosti magnetskog polja (B) i amplitudi porasta fluktuacija magnetskog polja (dB). Napravljena je linearna regresija za sve izmjerene podatke, a zatim i za različite tipove i strukture. Također je ucrtan granični pravac, odnosno pravac minimalnog očekivanog koeficijenta smjera. Uočeno je da se podaci od ishodišta šire u trokut. Gornja granica je u oba slučaja (i za B i za dB) $F_d=0$, a donji granični pravac prikazan je iscrtkanom crnom crtom. Granični pravac izabran je uz pretpostavku da će se granična mjerena pojavljivati oko njega, stoga ima točaka i izvan njega.

Linearna regresija svih podataka ukazuje na dobru koreliranost pada kozmičkih zraka i porasta magnetskog polja. Koeficijenti determinacije daju odgovarajuće koeficijente korelacije $R=0,66$ (za B) te $R=0,74$ (za dB). Sličan koeficijent korelacije FD i B ($R=0,66$) dobili su Belov et al. (2001), što je slabija korelacija od one koju je dobila Cane (1993) za magnetske oblake ($R=0,86$). Cane (1993) je povezala pad toka CR od 3% sa jakim magnetskim poljem od 25 nT, što ovdje očito nije slučaj. Linearna regresija svih podataka pokazuje da je za pad od 7% potrebno polje od otprilike 25nT. Međutim, važno je za zamijetiti da pad od 3% kod Cane odgovara prolasku magnetskog oblaka, a procijenjen je na temelju odnosa prvog i drugog pada u FD-ima dvostrukog pada. Ukupan pad kod Cane, koji odgovara polju od 25 nT, je 6%, što je blizu vrijednosti, koja je ovdje dobivena.

Mogu se zamijetiti dvije grane podataka, koje odgovaraju tip1 i tip2 podacima, a koje zasebno pokazuju snažnu korelaciju. Koeficijenti korelacije za B su $R=0,82$ za tip1 te čak $R=0,91$ za tip2, dok za dB iznose $R=0,67$ i $R=0,89$. Slično rasipanje podataka u trokut može se uočiti kod Bostanjiana & Chilingariana (2008). Oni su, izbacivši FD-e popraćene jakim geomagnetskim olujama dobili bolju korelaciju amplitude FD-a i porasta mag. polja, gdje argumentiraju da je pad toka CR prikriven smanjenim graničnim rigiditetom, uslijed smanjenog geomagnetskog polja, a koji dovodi do povećanog toka CR. Nije jasno, doduše, da li bi do takvog povećanja toka CR uopće moglo doći, budući da poremećaj izaziva smanjenje toka CR ne samo na Zemlji, već i u međuplanetarnom prostoru, kroz koji prolazi. S druge strane, poznato je da su FD-i detektirani pri manjim graničnim rigiditetima veći (Cane, 2000; Lockwood, 1986). Izraženiji FD-i pri manjim graničnim rigiditetima posljedica su energetske ovisnosti toka CR, zbog kojeg je početna razina toka CR veća. Ovo ne može biti slučaj kod povećane geomagnetske aktivnosti, jer je ona uzrokovana prolaskom poremećaja, prije kojeg je određen referentni nivo. Međutim, moguće je da nakon geomagnetske oluje, prije nego se geomagnetsko polje obnovi, zbog smanjenog graničnog rigiditeta uočeni FD-i budu veći. Naizgled kontradiktornim se čini i istraživanje Belova et al. (2001) u kojem je zamijećeno da je povećana geomagnetska aktivnost povezana sa većim FD-ima. Međutim takva povezanost će prije biti posljedica činjenice da jaki, frontalno nadolazeći ICME-i sa udarnim valovima uzrokuju oboje. Iako postoji sličnosti između podataka kakve su izbacili Bostanjyan & Chilingarian (2008) sa tip1 podacima na grafu 1, bez analize geomagnetske aktivnosti, nemoguće je reći da li su dvije grane tip1 i tip2 podataka posljedica iste. Bez obzira na mogući uzrok, za primjetiti je ipak, da za slične poraste magnetskog polja FD-i mogu biti prilično različiti, što ukazuje na postojanje dodatnog parametra kojeg treba uzeti u obzir.

Linearne regresije jednostavnih i složenih podataka ne razlikuju se međusobno, niti odstupaju puno od linearne regresije svih podataka. Dakle, čini se opravdana pretpostavka da se grupa međusobno slabo razlučivih događaja može promatrati kao jedan događaj.

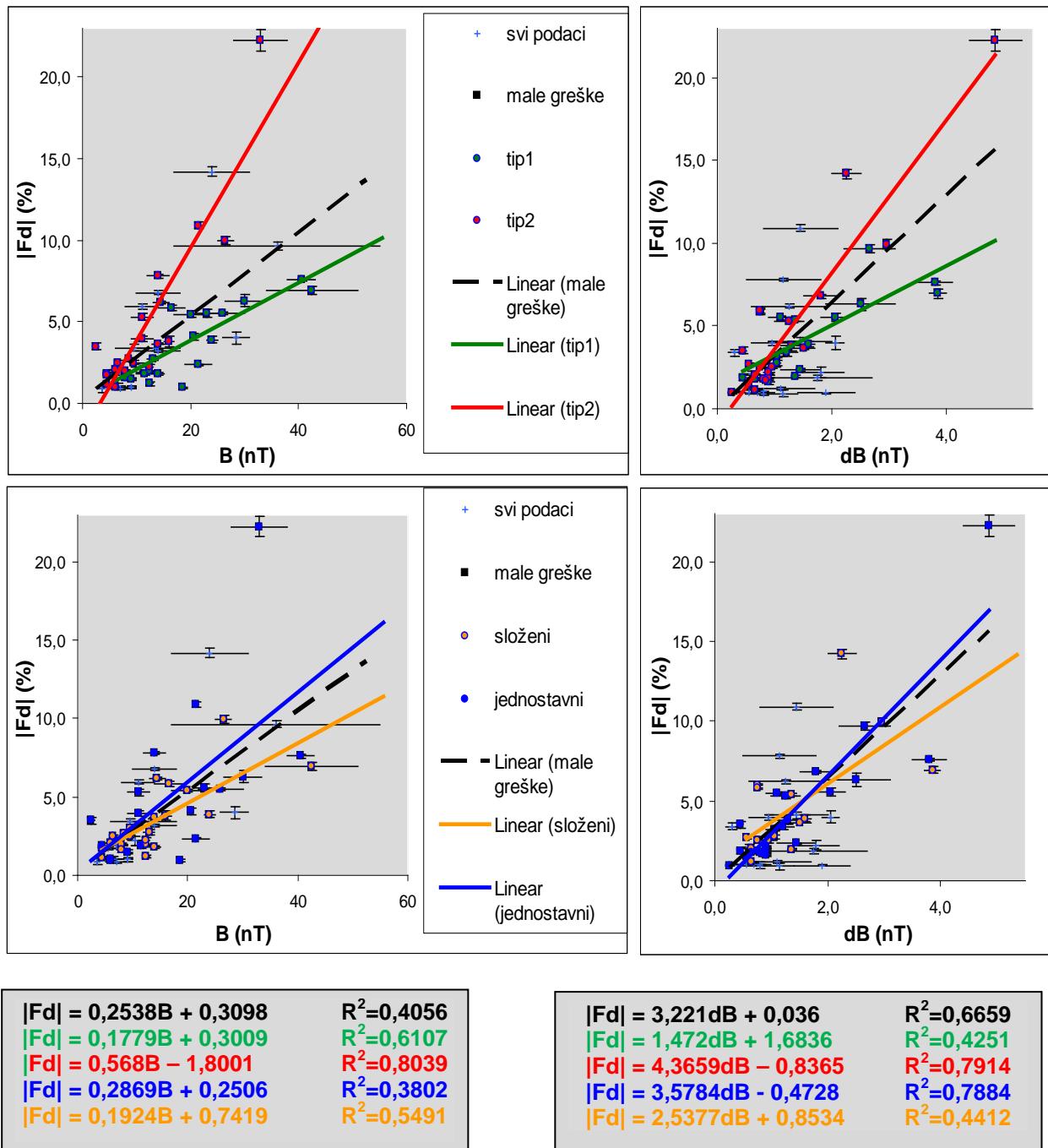


$F_d = -0.2653B - 0,1989$	$R^2=0,4407$
$F_d = -0,1935B - 0,0783$	$R^2=0,6774$
$F_d = -0,5192B + 1,9849$	$R^2=0,8289$
$F_d = -0,2760B - 0,1056$	$R^2=0,4416$
$F_d = -0,2429B - 0,4356$	$R^2=0,437$
Granični: $F_d=-0,5833B$	

$F_d = -3,0626dB - 0,0534$	$R^2=0,5488$
$F_d = -1,7984dB - 0,9374$	$R^2=0,4523$
$F_d = -4,6034dB + 0,7332$	$R^2=0,7938$
$F_d = -3,3917dB + 0,5942$	$R^2=0,6094$
$F_d = -2,5198dB - 0,8741$	$R^2=0,4342$
Granični: $F_d=-7,2667dB$	

Graf 1: Ovisnost amplitude Forbushevog smanjenja (F_d) o jakosti (B) i fluktuacijama (dB) magnetskog polja za različite tipove i strukture

Na grafu 2 prikazana je dobivena ovisnost apsolutne vrijednosti amplitude FD-a o amplitudi porasta jakosti magnetskog polja (B) i amplitudi porasta fluktuacija magnetskog polja (dB). Napravljena je linearna regresija u slučaju kad se izbace podaci čije greške premašuju 25% za B i dB te 10% za FD. Zatim su ti podaci sortirani po tipovima i strukturi, kao na grafu 1.



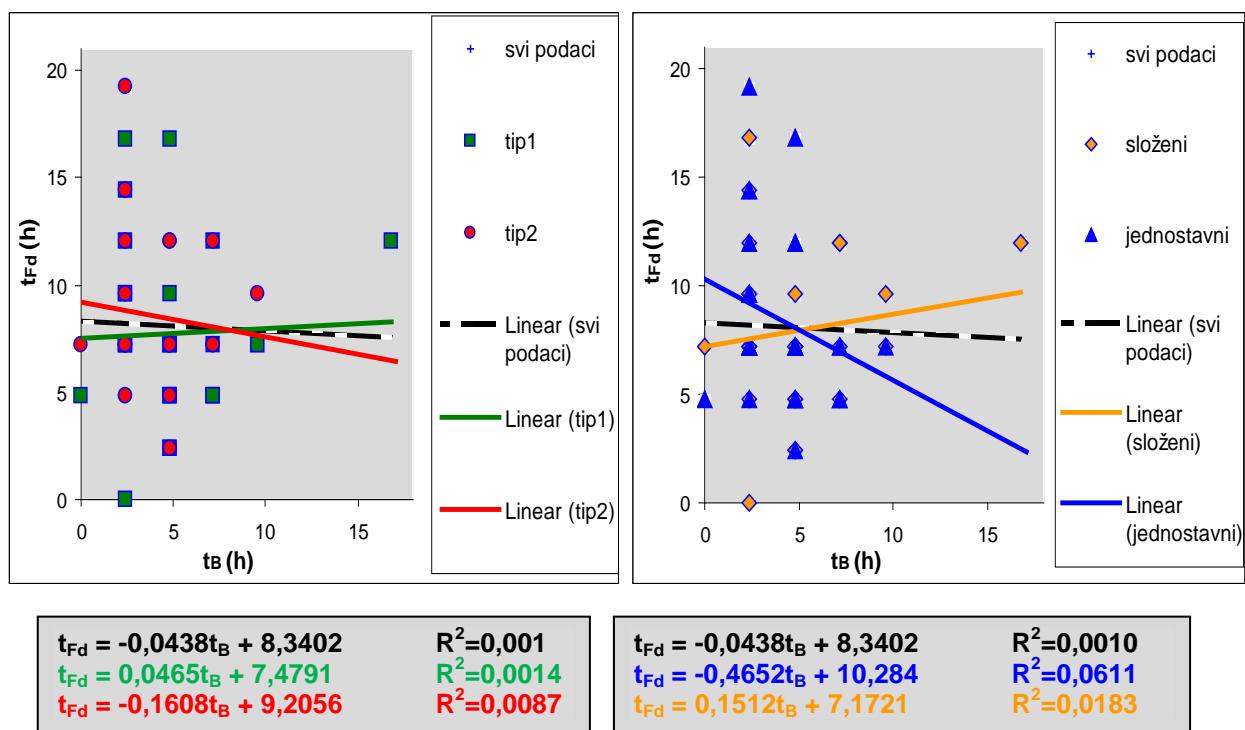
Graf 2: Ovisnost apsolutne vrijednosti amplitude Forbushevog smanjenja ($|Fd|$) o jakosti (B) i fluktuacijama (dB) magnetskog polja, sa greškama, za različite tipove i strukture

Vidimo da izbacivanje podataka sa velikim greškama dovodi do lošije korelacije $|F_d|$ i B , dok se korelacija $|F_d|$ i dB znatno popravila. Koeficijent korelacije između $|F_d|$ i B za podatke gdje su izbačene velike greške, iznosi $R=0,64$, što je za 4% manje od koeficijenta korelacije ukupnih podataka. Lošija korelacija podataka za koje su izbačene velike greške posljedica je izbacivanja podataka sa izraženim udarnim valom. U nekim događajima zamijećen je nagli, veliki porast magnetskog polja, koji vežemo uz udarni val, što je dovelo do velike razlike maksimalne i minimalne amplitudne, odnosno do velike greške. Eliminiranjem podataka sa velikim greškama ustvari su eliminirani događaji sa jako izraženim udarnim valom te odgovarajućim velikim Forbushevim smanjenjem. Istovremeno koeficijent korelacije $|F_d|$ i dB je porastao za 10% i iznosi 0,82. Prilikom mjerjenja zamijećene su velike varijacije dB sa vremenom, što je dovelo do velikih grešaka. Ovdje je izbacivanje mjerjenja sa velikim greškama dovelo do bolje koreliranosti.

Sličan trend pokazuju i podaci sortirani po tipovima, dakle smanjenje koeficijenta korelacije za B , a povećanje za dB.

Jednostavnji događaji također pokazuju smanjenje korelacije kada se izbace mjerjenja sa velikim greškama (za 7%), međutim kod složenih se događa suprotno, korelacija poraste za 12%. Može se dakle zaključiti da je kod složenih događaja smanjena uloga udarnog vala. Korelacija $|F_d|$ i dB je i ovdje jača kada se izbace mjerjenja sa velikim greškama.

Graf 3 prikazuje ovisnost trajanja pada FD-a o trajanju porasta magnetskog polja. Linearna regresija svih podataka, kao i linearna regresija za tip1, tip2 i složene događaje daje koeficijent korelacije za red veličine manji od 0,2 što ukazuje na nepostojanje korelacije. Zamjećuje se nešto veća vrijednost R za jednostavne događaje ($R=0,25$), međutim moguće je da se radi o statističkoj slučajnosti.



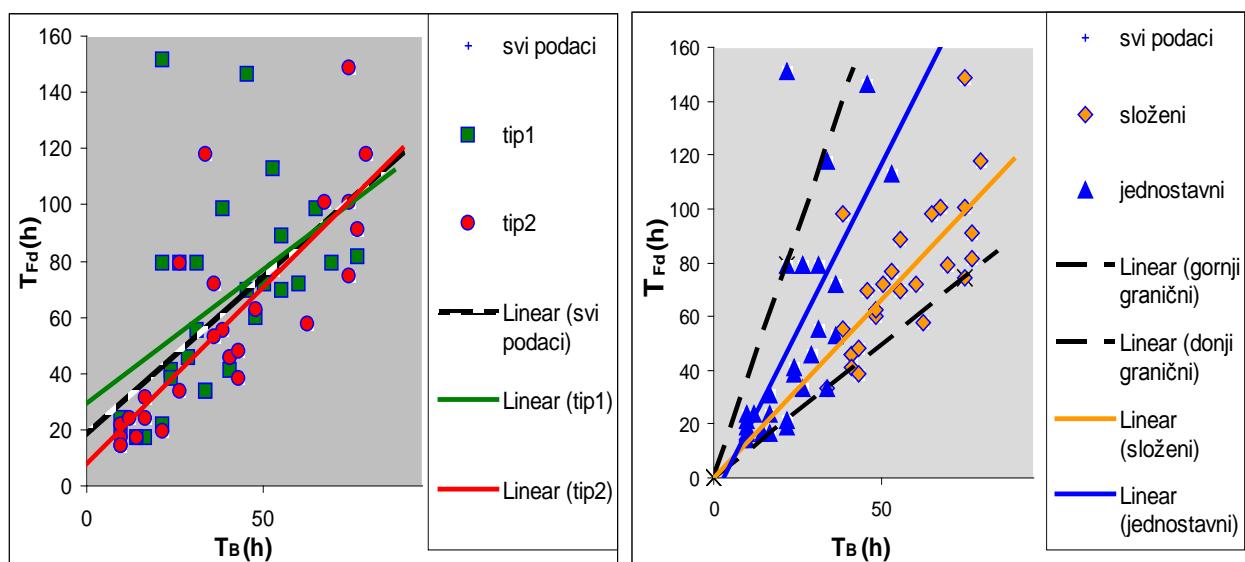
Graf 3: Ovisnost trajanja pada FD (t_{Fd}) o trajanju porasta B (t_B) za različite tipove i strukture

Usporedbom grafova 3 i 4 ustvari možemo vidjeti na koji način vrijeme oporavka toka CR ovisi o vremenu prolaska magnetskog poremećaja (a koje pak ovisi o veličini i brzini poremećaja). Kako se na grafu 3 jasno vidi da nema korelacije između trajanja pada FD-a i trajanja porasta B, korelacija dobivena na grafu 4, dakle trajanja FD-a o vremenu prolaska poremećaja, znači da je oporavak CR ovisan o trajanju poremećaja. Koeficijent korelacije za sve podatke iznosi $R=0,66$.

Sličan rezultat su dobili Badruddin et al. (1986). Oni su proučavali utjecaj vremena prolaska poremećaja na trajanje porasta FD-a i oporavka te zaključili da u prvom slučaju koreliranost ne postoji, dok je u drugom slučaju uočena ovisnost (vremena oporavka FD-a o vremenu trajanja poremećaja).

Također je napravljena linearna regresija za različite tipove i strukture. Tip2 podaci pokazuju bolju koreliranost ($R=0,81$), a tip1 lošiju ($R=0,49$).

Može se uočiti da se i ovdje podaci grupiraju u dvije grane, međutim za razliku od grafa 1, dvije grane ovdje čine jednostavnii složeni podaci. Složeni podaci za ista trajanja prolaska poremećaja pokazuju kraći oporavak. Složene događaje definirali smo kao kompleksne grupe događaja koji su međusobno nerazlučivi, a pokazuju karakteristike jednog događaja, stoga je i za očekivati da će vremena prolaska poremećaja ovdje biti nešto dulja. Obje grane pokazuju jaču korelaciju nego svi podaci (jednostavnii $R=0,69$, složeni $R=0,78$). I ovdje je, slično kao na grafu 1, uočeno da su podaci raspršeni u trokutu, koji se da iscrtati sa dva granična pravca. Procjena donjeg graničnog pravca ovdje nije zadana apscisom, kao u grafu 1, već je to identiteta $T_{Fd} = T_B$.



$$\begin{aligned} T_{Fd} &= 1,1356T_B + 17,646 \\ T_{Fd} &= 0,9536T_B + 29,343 \\ T_{Fd} &= 1,2604T_B + 7,9097 \end{aligned}$$

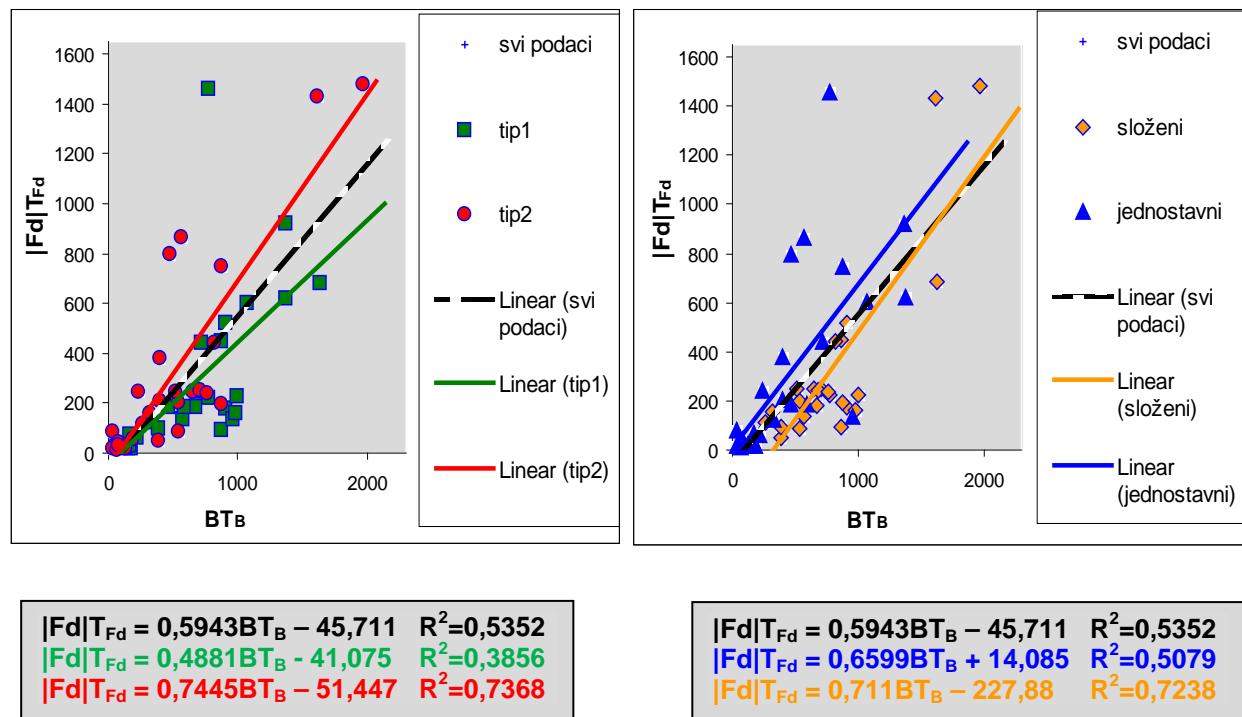
$$\begin{aligned} R^2 &= 0,4312 \\ R^2 &= 0,2352 \\ R^2 &= 0,6602 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{Fd} &= 2,4883T_B - 7,3377 \\ T_{Fd} &= 1,3259T_B + 0,0155 \\ \text{Gornji granični: } & \\ \text{Donji granični: } & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R^2 &= 0,4822 \\ R^2 &= 0,6025 \\ T_{Fd} &= 3,7T_B \\ T_{Fd} &= T_B \end{aligned}$$

Graf 4: Ovisnost trajanja FD (T_{Fd}) o vremenu prolaska poremećaja (T_B) za različite tipove i strukture

Grafovi 1 i 4 pokazali su da na karakteristike FD-a utječu amplituda porasta magnetskog polja i trajanje prolaska poremećaja, stoga je istražena korelacija umnožaka (graf 5). BT_B je umnožak amplitude porasta magnetskog polja i vremena trajanja poremećaja (tj. vremena u kojem je zabilježeno pojačano magnetsko polje) te predstavlja mjeru utjecaja poremećaja. $|Fd|T_{Fd}$ (umnožak trajanja i apsolutne vrijednosti FD-a) je mjera ukupne količine CR, koja zbog poremećaja nije stigla do Zemlje (tj. detektora).

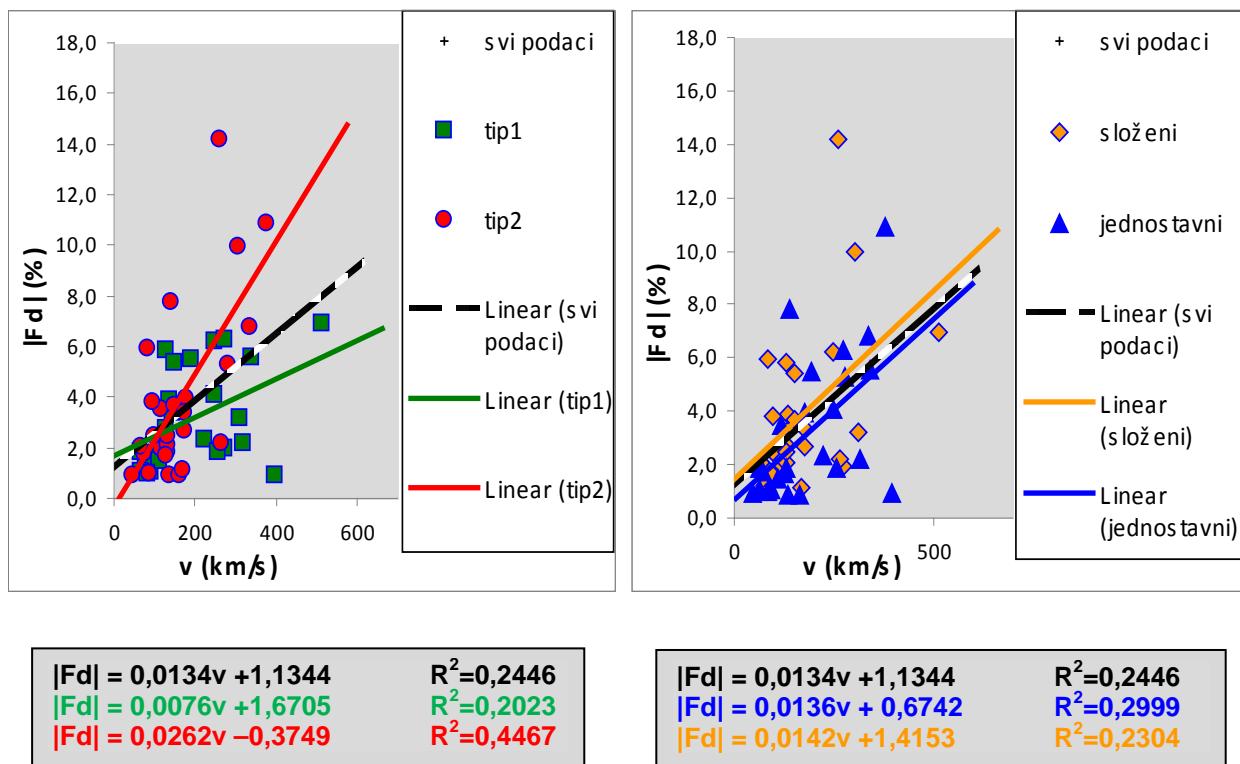


Graf 5: Ovisnost umnožaka trajanja i apsolutne vrijednosti amplitude FD-a ($|Fd|T_{Fd}$) o produktu trajanja prolaska poremećaja i jakosti magnetskog polja (BT_B) za različite tipove i strukture

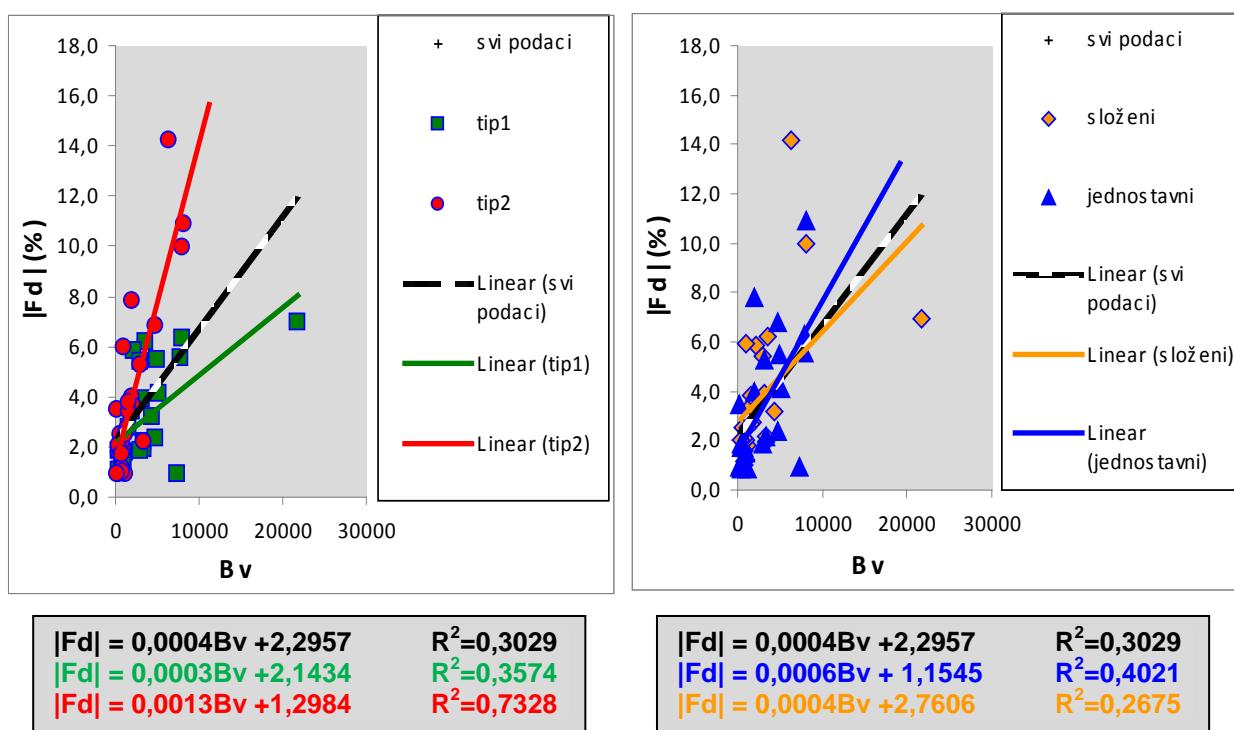
Korelacija umnožaka bolja je u usporedbi sa pojedinačnim korelacijama (grafovi 1 i 4), ovdje koeficijent korelacije za sve podatke iznosi $R=0,73$. I dalje su zamjetne dvije grane oko kojih se grupiraju tip1 i tip2 podaci (kao što je zamjećeno u ovisnosti $Fd(B)$), međutim ne uočava se ista pojava za jednostavne/složene podatke (prethodno uočena u ovisnosti $T_{Fd}(T_B)$). To vjerojatno proizlazi iz činjenice da su u prvom slučaju, dakle za tip1 i tip2 na grafu 1, koeficijenti korelacije veći nego za jednostavne i složene na grafu 4. Za uočiti je također da tip2 i jednostavni podaci pokazuju vrlo jaku koreliranost (tip2 $R=0,86$, jednostavni $R=0,85$).

Na grafovima 6 do 8 istražuje se koreliranost relativne brzine poremećaja (prema brzini Sunčevog vjetra izmjerenoj prije nailaska poremećaja) sa Forbushevim smanjenjem.

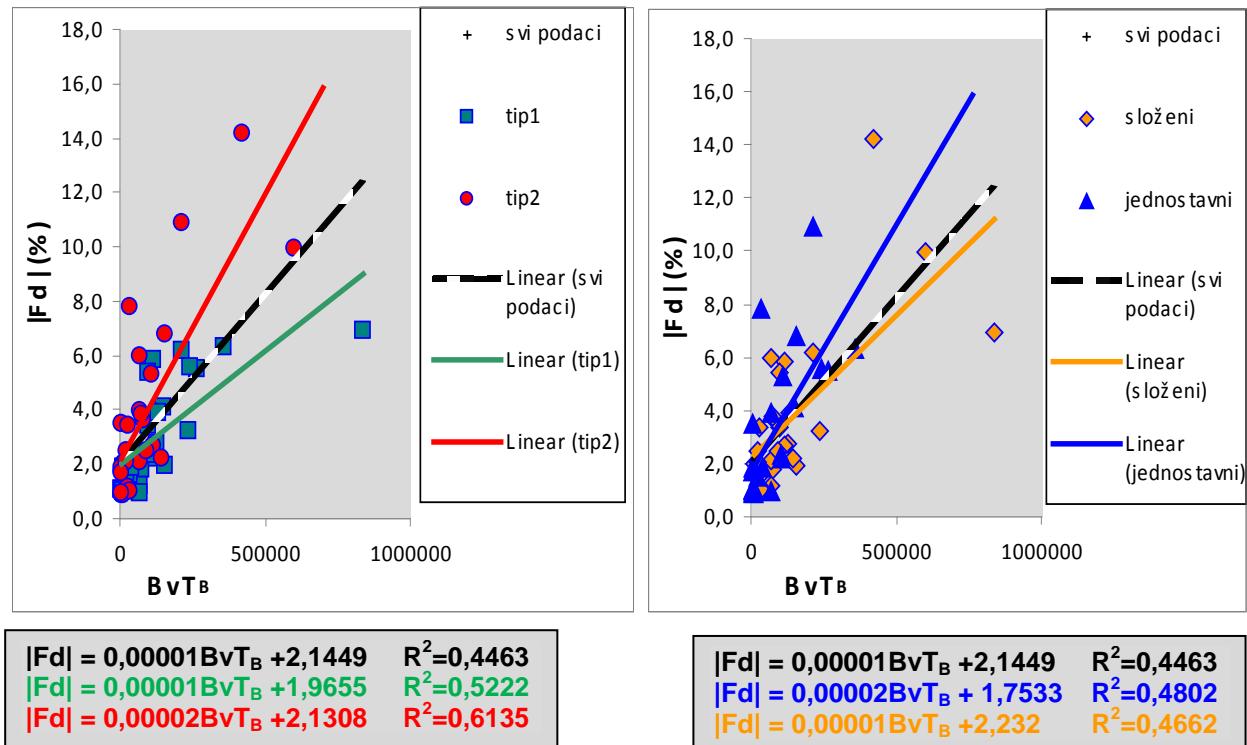
Na grafu 6 prikazana je ovisnost absolutne vrijednosti FD-a o relativnoj brzini poremećaja Sunčevog vjetra. Uočavamo da je korelacija puno slabija u usporedbi sa grafovima 1 i 4, ovdje koeficijent korelacije za sve podatke iznosi $R=0,50$. Kao i na grafu 1, izdvajaju se dvije grane za tip1 i tip2 podatke te se pokazuje da su tip2 podaci bolje korelirani (tip1 $R=0,45$, tip2 $R=0,67$). Također, jednostavniji i složeni podaci ne pokazuju drugačiji trend od svih podataka, kao što je bio slučaj i na grafu 1. Na grafovima 7 i 8 istraživana je ovisnost absolutne vrijednosti FD-a u umnošku porasta jakosti magnetskog polja s relativnom brzinom (graf 7) te dimenzijama poremećaja (graf 8). Koeficijenti korelacije za linearnu regresiju svih podataka su veći nego za brzinu i iznose $R=0,55$ (za graf 7) te $R=0,67$ (za graf 8). Na oba grafa je vidljiva struktura dviju grana za tip1 i tip2 podatke, iako je ovdje slabije izražena. Povezanost FD-a sa porastom brzine uočili su još Badruddin et al. (1986), ali je nisu detaljnije istražili. To su učinili Belov et al. (2001) koji su dobili koeficijent korelacije brzine i FD-a nešto manji nego ovdje ($R=0,22$). Također su napravili analizu produkta brzine poremećaja i porasta mag. polja gdje su dobili bolju korelaciju ($R=0,70$), a posebno dobru korelaciju ostvarili su usrednjavanjem podataka i svrstavanjem u 8 razreda umnoška Bv ($R=0,99$). Vezu brzine i FD-a istražili su i Bostanjyan & Chilingarian (2008), koji su dobili vrlo dobru koreliranost.



Graf 6: Ovisnost absolutne vrijednosti amplitude FD ($|Fd|$) o relativnoj brzini poremećaja (prema brzini Sunčevog vjetra, v) za različite tipove i strukture



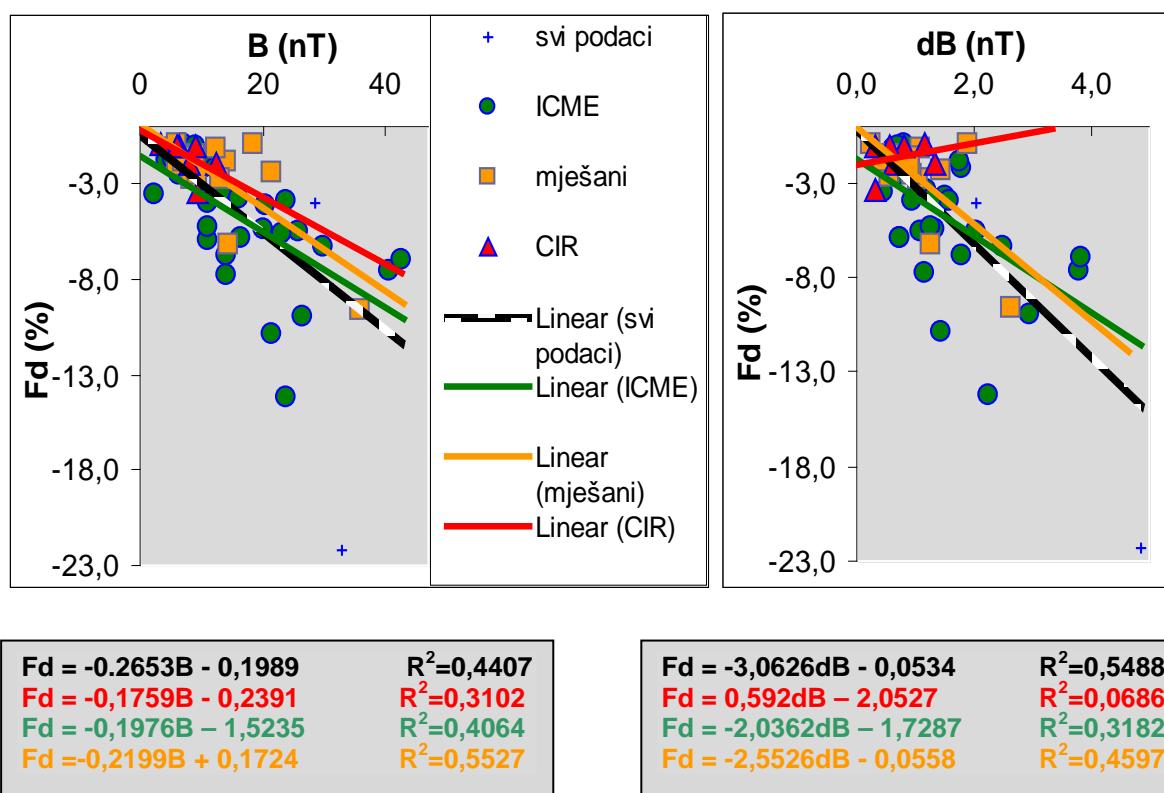
Graf 7: Ovisnost absolutne vrijednosti amplitude FD ($|Fd|$) o umnošku porasta magnetskog polja i relativne brzine poremećaja (Bv) za različite tipove i strukture



Graf 8: Ovisnost absolutne vrijednosti amplitude FD ($|Fd|$) o umnošku porasta magnetskog polja, relativne brzine i vremena prolaska poremećaja (BvT_B) za različite tipove i strukture

Na grafovima 9 do 12 promatrane su ovisnosti karakteristika FD-a za različite vrste poremećaja Sunčevog vjetra (CIR i ICME). Na grafu 9 napravljena je i analiza miješanih CIR/ICME događaja, koji nisu promatrani u grafovima 10-12. Iz analize su izbačena dva događaja, koja zbog nedostatka mjerena nisu mogla biti identificirana.

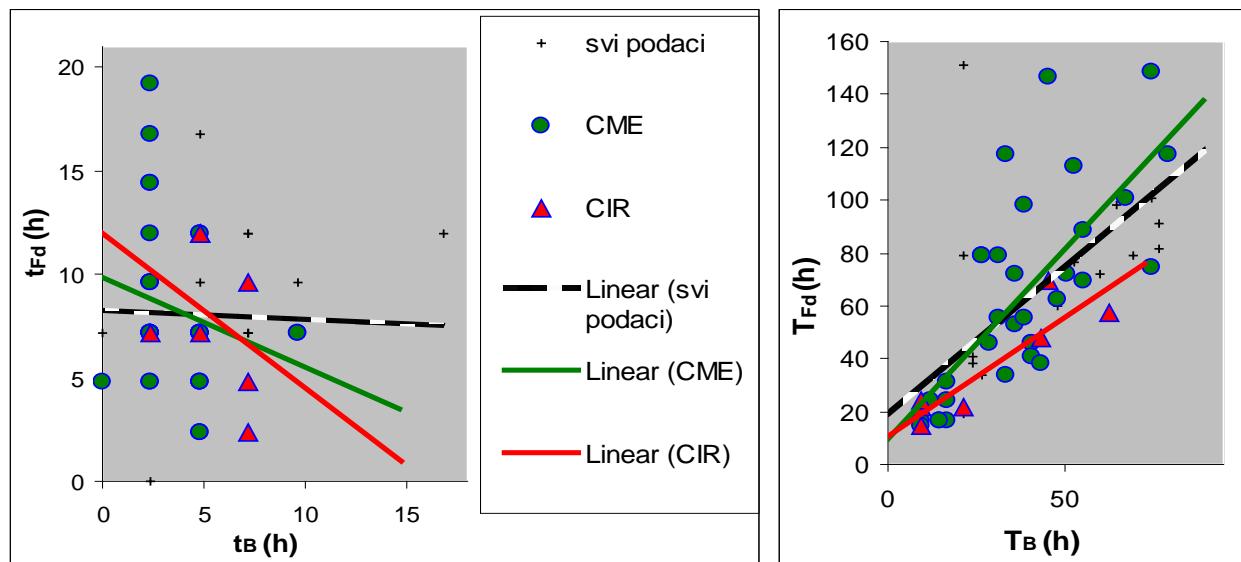
Na grafu, koji prikazuje ovisnost FD-a o amplitudi magnetskog polja (B) može se vidjeti da CIR, CME te miješani CIR/CME događaji pokazuju sličnu korelaciju kada se odvoje i kada se promatraju zajedno. Isto se ne može reći i za graf koji prikazuje ovisnost FD-a o amplitudi fluktuacija magnetskog polja (dB), gdje su CIR loše korelirani ($R=0,26$), a također je i koeficijent korelacije manji za ICME u odnosu na sve podatke ($R=0,56$). Na oba grafa može se uočiti kako ICME podaci čine trokut, pa zaključujemo da, na grafu 1 uočena slična struktura podataka, potječe upravo od ICME događaja.



Graf 9: Ovisnost amplitude Forbushevog smanjenja (Fd) o jakosti (B) i fluktuacijama (dB) magnetskog polja za različite vrste poremećaja Sunčevog vjetra

Na grafu 10 istražena je povezanost vremena trajanja FD-a i poremećaja Sunčevog vjetra. Uočavamo da CIR-evi pokazuju slabu koreliranost trajanja pada FD-a o trajanju porasta magnetskog polja ($R=0,38$), a korelacija je još slabija za ICME ($R=0,23$). Ukupna vremena trajanja i ovdje pokazuju dobru koreliranost, kao i na grafu 4, osobito za CIR-eve ($R=0,90$).

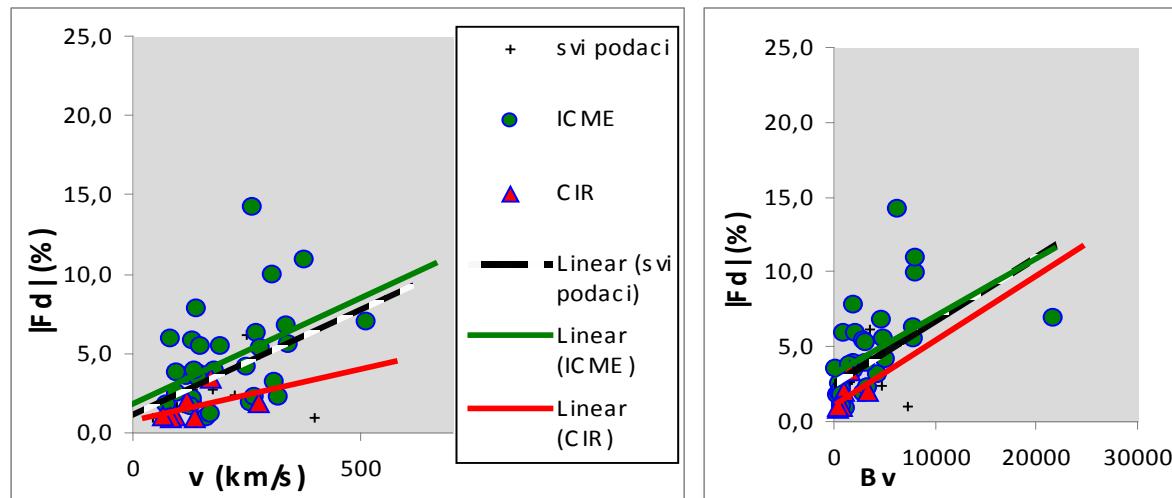
Ovisnost o brzini, prikazana na grafu 11, za CIR, ICME i sve podatke zajedno, pokazuje sličan trend, s time da se kod ICME podataka opet uočava karakterističan trokut pojavljivanja podataka.



$$\begin{aligned} t_{Fd} &= -0,0438t_B + 8,3402 & R^2 &= 0,001 \\ t_{Fd} &= -0,4344t_B + 9,8295 & R^2 &= 0,051 \\ t_{Fd} &= -0,75t_B + 12 & R^2 &= 0,1436 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{Fd} &= 1,1356T_B + 17,646 & R^2 &= 0,4312 \\ T_{Fd} &= 1,4333T_B + 9,6289 & R^2 &= 0,5268 \\ T_{Fd} &= 0,8963T_B + 10,873 & R^2 &= 0,8076 \end{aligned}$$

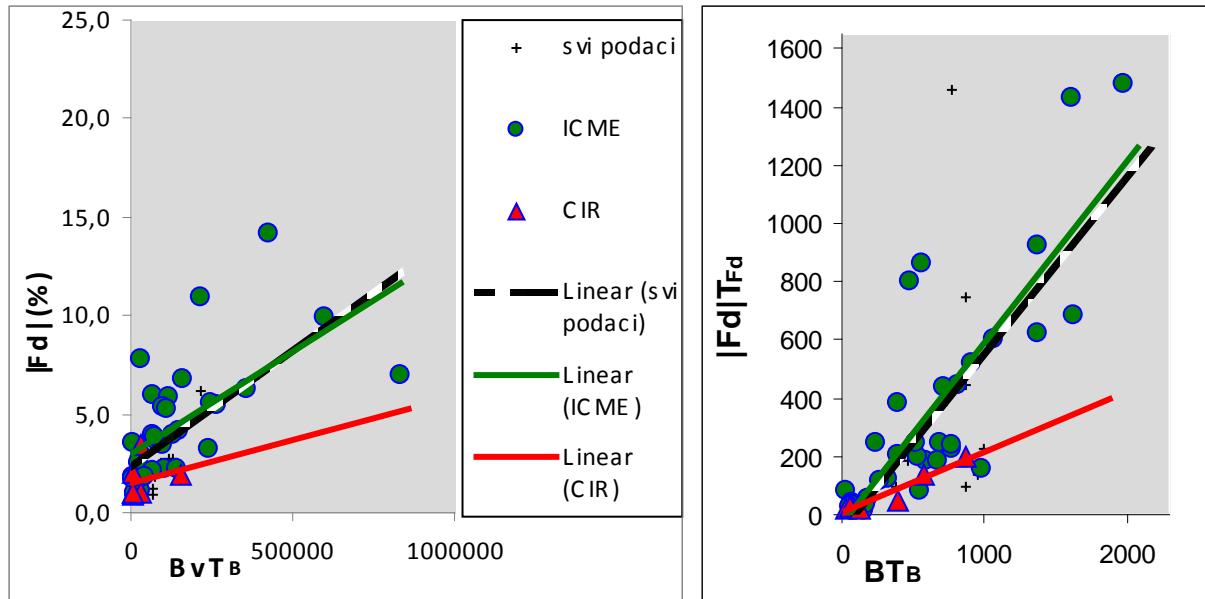
Graf 10: Isto - ovisnost trajanja pada FD-a (t_{Fd}) o trajanju porasta B (t_B) za različite vrste poremećaja Sunčevog vjetra; desno – ovisnost trajanja FD-a (T_{Fd}) o vremenu prolaska poremećaja (T_B) za različite poremećaje Sunčevog vjetra



$$\begin{aligned} |Fd| &= 0,0134v + 1,1344 & R^2 &= 0,2446 \\ |Fd| &= 0,0134v + 1,7867 & R^2 &= 0,2094 \\ |Fd| &= 0,0066v + 0,7327 & R^2 &= 0,2673 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |Fd| &= 0,0004Bv + 2,2957 & R^2 &= 0,3029 \\ |Fd| &= 0,0004Bv + 3,1133 & R^2 &= 0,2749 \\ |Fd| &= 0,0004Bv + 1,1134 & R^2 &= 0,2616 \end{aligned}$$

Graf 11: Ovisnost absolutne vrijednosti amplitude FD ($|Fd|$) o relativnoj brzini poremećaja (v) i njenom produktu s amplitudom magnetskog polja (Bv) za različite vrste poremećaja Sunčevog vjetra



$$|Fd| = 0,00001BvT_B + 2,1449 \quad R^2=0,4463$$

$$|Fd| = 0,00001BvT_B + 2,9654 \quad R^2=0,3889$$

$$|Fd| = 0,000004BvT_B + 1,4654 \quad R^2=0,0696$$

$$|Fd|T_{Fd} = 0,5943BT_B - 45,711 \quad R^2=0,5352$$

$$|Fd|T_{Fd} = 0,4881BT_B - 35,407 \quad R^2=0,6803$$

$$|Fd|T_{Fd} = 0,2101BT_B + 3,8781 \quad R^2=0,9342$$

Graf 12: Ovisnost produkata za različite vrste poremećaja Sunčevog vjetra

a) absolutna vrijednost amplitude FD ($|Fd|$) u ovisnosti o produktu amplitude mag. polja, relativne brzine i trajanja poremećaja (BvT_B)

b) produkt absolutne vrijednosti amplitude i trajanja FD ($|Fd|T_{Fd}$) u ovisnosti o produktu amplitude mag. polja i trajanja poremećaja (BT_B)

Ovisnost produkata amplituda i vremena trajanja za CIR i ICME pokazuju bolju koreliranost kada se ti podaci odvoje (graf 12.b). Koeficijent korelacije za ICME podatke iznosi $R=0,83$, a za CIR podatke $R=0,97$, što je za 13%, tj. 32% bolje nego kada se uzmu svi podaci zajedno. Istovremeno, odvojeni CIR i ICME podaci pokazuju lošiju korelaciju kada se promatra ovisnost FD-a o umnošku porasta magnetskog polja i dimenzija (graf 12.a). Koeficijenti korelacije su $R=0,62$ za ICME (što je smanjenje za 7%) tj. $R=0,26$ za CIR (što je smanjenje za čak 61%).

Važno je napomenuti da dobivene korelacije za odvojene CIR događaje treba uzeti sa zadrškom zbog malog statističkog uzorka (samo 8 događaja). Ipak, dobiveni rezultati su u skladu sa prijašnjim istraživanjima (Čalogović et al., 2008; Richardson et al., 1996).

Analizom ukupnih mjerena za sve poremećaje Sunčevog vjetra i odvojenih mjerena za CIR i ICME dobiveni su slični rezultati iz čega se može zaključiti da je efekt poremećaja na tok CR isti, bez obzira na njegovo porijeklo.

6. ZAKLJUČAK

Mjerenjem toka kozmičkih zraka i karakteristika poremećaja u Sunčevom vjetru pronađena je njihova antikoreliranost. Pronađena je korelacija absolutne vrijednosti amplitude Forbushevog smanjenja ($|F_d|$) sa amplitudom porasta magnetskog polja (B), amplitudom fluktuacija magnetskog polja (dB), relativnom brzinom poremećaja prema Sunčevom vjetru (v) te umnošku porasta mag. polja sa brzinom (B_v) i trajanjem poremećaja ($B_v T_B$). Najjača koreliranost uočena je za amplitude fluktuacija magnetskog polja, posebno kada se izbace događaji s velikim greškama ($R=0,82$). Pri analizi grešaka za porast magnetskog polja pronađeno je da se izbacivanjem grešaka korelacija pogoršava, što je povezano sa izbacivanjem mjerjenja sa jakim udarnim valovima.

Proučavanjem odnosa specifičnih perioda FD-a i poremećaja pronađeno je da između vremena porasta magnetskog polja poremećaja i vremena pada toka CR nema korelacije. Istovremeno je nađeno da ukupna vremena trajanja FD-a i poremećaja koreliraju, što upućuje i na koreliranost vremena trajanja poremećaja i oporavka toka CR.

Vrlo jaka korelacija nađena je između umnožaka absolutne vrijednosti amplitude FD-a s vremenom trajanja i amplitude porasta mag. polja s vremenom trajanja ($R=0,73$). To pokazuje da, što je dulji i jači utjecaj magnetskog polja poremećaja dok prolazi pored Zemlje, to je manja ukupna količina CR koja dolazi na Zemlju.

Ovisnosti FD-a o porastu magnetskog polja, fluktuacijama, brzini te umnošku magnetskog polja s brzinom i trajanjem pokazivale su trokutnu raspodjelu podataka, odnosno dvije grane ovisnosti za dva tipa podataka tip1 i tip2. Ovo upućuje na postojanje dodatnog parametra, potencijalno povezanog sa promjenama graničnog rigiditeta, uzrokovanim geomagnetskim poremećajima.

Trokutna raspodjela podataka javila se i na grafu ovisnosti ukupnih trajanja FD-a i poremećaja, ali sa granama za različite strukture poremećaja, jednostavnu i složenu. Ovo je ujedno jedini pokazatelj razlike jednostavnih i složenih događaja, koja se pokazuje nezamjetnom u spomenutoj ovisnosti umnožaka vremena trajanja i amplituda. Stoga je zaključeno da je opravdano i korisno grupu međusobno nerazlučivih događaja promatrati jedinstveno.

Izdvojene vrste poremećaja, ICME i CIR, pokazuju slična svojstva pri promatranju poremećaja u Sunčevom vjetru općenito. Slijedi dakle, da je utjecaj na tok CR uvjetovan svojstvima, a ne porijeklom poremećaja. Porijeklo poremećaja u Sunčevom vjetru bitno je utoliko što ICME može imati puno jače magnetsko polje od CIR-a.

Dodatak 1: Nabijena čestica u magnetskom polju

U poglavlju 2.1. je spomenuto da se GCR ubrzavaju na udarnim valovima supernova prema principu magnetskog zrcala, a u poglavlju 3.1. je istaknuta veza između magnetskog polja i modulacije toka CR. Dakle, prije dolaska na Zemlju, one interagiraju s magnetskim poljima (magnetski oblaci, IMF). Konačno, dolaze do Zemljine magnetosfere, gdje interagiraju s geomagnetskim poljem, za koje je rečeno u poglavlju 2.2. da, ovisno o energiji čestica, utječe na njihove putanje i može ih reflektirati. Interakcija CR, odnosno nabijene čestice, sa magnetskim poljem je dakle bitan faktor u njihovim putanjama i u promatranju toka CR. Ono im mijenja putanje tj. zakreće ih (pa je nemoguće odrediti položaj njihovog izvora), ili ih na kraju može spriječiti da uopće dođu do nas (tj. do detektora).

Nabijena čestica u homogenom magnetskom polju

U odsustvu električnog polja magnetsko polje (**B**) djeluje na nabijenu česticu naboja q i brzine \mathbf{v} Lorentzovom silom \mathbf{F} , koja je okomita na smjer gibanja čestice i na smjer magnetskog polja (tj. na silnice mag. polja):

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Ako se čestica giba duž silnice, tj. brzina i magnetsko polje su orijentirani paralelno (ili antiparalelno) ona neće osjećati Lorentzovu силу. Ako se čestica giba u smjeru okomitom na silnicu, odnosno vektor brzine se nalazi u ravnini okomitoj na magnetsko polje, čestica će osjećati maksimalnu Lorentzovu силу. U općenitom slučaju, čestica je usmjerena pod proizvoljnim kutom u odnosu na magnetsko polje. Takvo gibanje možemo rastaviti na komponente okomito i paralelno magnetskom polju. U paralelnom smjeru je gibanje očito linearne, jer je sila $F_{||}=0$, a u okomitom smjeru osjeća silu $F_{\perp} = qv_{\perp} B$. Ako zamjetimo da je sila okomita na brzinu v_{\perp} , postane jasno da se u homogenom magnetskom polju ustvari radi o kruženju u ravnini okomitoj na silnice, pa čestica ima centripetalnu akceleraciju $a_c=v_{\perp}^2/r$. Uzimajući u obzir da su brzine CR relativističke¹⁶, te da je magnetsko polje homogeno i vremenski nepromjenjivo, jednadžba gibanja u smjeru okomito na silnice mag. polja će dati:

$$v_{\perp} = \frac{qB}{\gamma m} r$$

Gdje je m masa čestice, r radijus zakrivljenosti, relativistički faktor. Kružna frekvencija se naziva Larmorovom ili ciklotronskom frekvencijom:

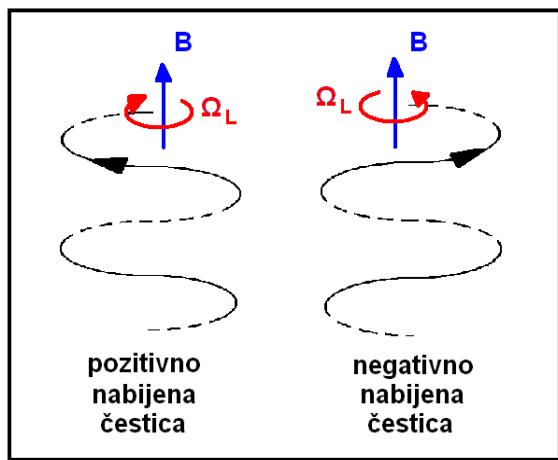
$$\vec{v} = \vec{\Omega}_L \times \vec{r} ; \quad \vec{\Omega}_L = \frac{q\vec{B}}{\gamma m}$$

¹⁶ $F_{\perp}=dp_{\perp}/dt$, gdje je $p_{\perp}=\gamma mv_{\perp}$, $\gamma=(1-\beta^2)^{-1/2}$, a $\beta=v/c$ je relativistički faktor

Odgovarajući polumjer kruženja r naziva se Larmorov polumjer, a može se izraziti preko veličine koju nazivamo magnetski rigiditet (def. $R=pc/|q|$):

$$r_L = \frac{|\vec{v}|}{|\vec{\Omega}_L|} = \frac{R}{c|\vec{B}|}$$

Iz ovako napisanoga izraza za Larmorov radijus slijedi da će R biti to veći što je r_L veći, a B manji. Odnosno drugim riječima, što je magnetsko polje slabije u odnosu na magnetski rigiditet nabijene čestice, to će ju zakretati pod većim radijusom zakrivljenosti, dakle slabije. Slijedi da je magnetski rigiditet veličina koja kaže koliko je čestica osjetljiva na magnetsko polje, a iz definicije vidimo da ovisi o energiji (pc) i naboju ($|q|$).



Ukupno gibanje čestice, kada spojimo paralelnu i okomitu komponentu, dakle linearne gibanje duž silnice i kruženje u ravni okomitoj na silnice (oko silnice), bit će helikoidalna putanja, a smjer kruženja ovisit će o predznaku naboja čestice. Ovo je prikazano na slici 19.

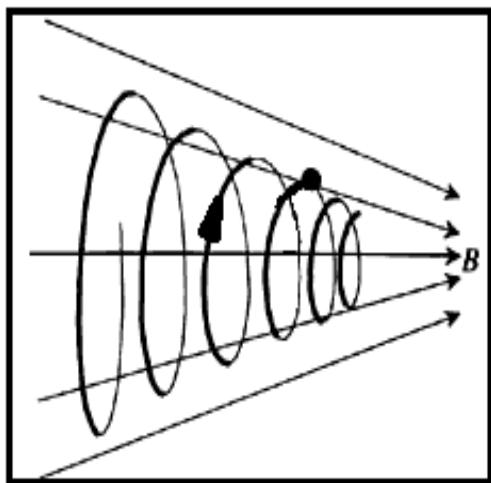
Slika 19 Helikoidalna putanja nabijene čestice u homogenom magnetskom polju

Kad CR dođe u područje homogenog magnetskog polja o njegovom rigiditetu ovisi kako će ono utjecati na njenu putanju. Ako polje ima vrlo mali rigiditet, čestica može biti uhvaćena u helikoidalnu putanju ili biti reflektirana (Larmorov radijus je mali). S druge strane, ako polje ima veliki rigiditet (što znači i veliki Larmorov radijus), CR može neometano proći kroz područje magnetskog polja, sa gotovo neizmijenjenom putanjom.

Magnetsko zrcalo i magnetska boca

Magnetsko zrcalo je takva konstrukcija magnetskog polja u kojoj nabijene čestice, prelazeći iz područja slabijeg magnetskog polja u područje jačeg magnetskog polja budu odbijene.

Gibanje nabijenih čestica u homogenom, vremenski neovisnom magnetskom polju je helikoidalno, a radijus helikoide (Larmorov radijus) ovisi o magnetskom polju. Za jača magnetska polja Larmorov radijus je manji, a za slabija, veći. Dakle prelazeći iz područja slabijeg magnetskog polja u područje jačeg magnetskog polja, Larmorov radijus će se smanjivati, tj. čestica će biti privučena bliže vodećoj silnici.

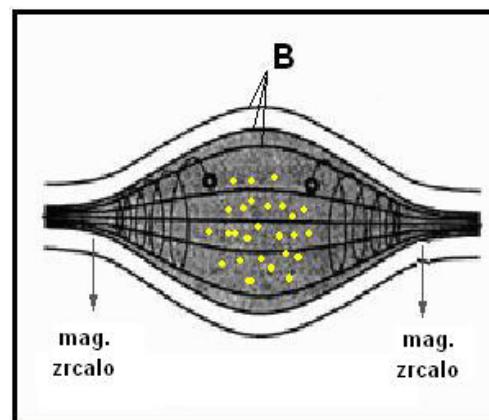


Kako je polje sve jače, znači da su silnice sve gušće, što se može primijetiti na slici 20 (silnice su prikazane ravnim crtama). Promatrano u cilindričnom koordinatnom sustavu, polje koje je izvorno u z-smjeru, ima i radikalnu komponentu. Iz tog razloga javit će se komponenta sile koja je usmjerena suprotno od $v_{||}$ i prvo će usporiti česticu u tom smjeru, a zatim ju ubrzati u suprotnom smjeru. Istovremeno, čestica će osjećati sve jače magnetsko polje, zbog čega će joj se smanjivati Larmorov radijus. Ovo se može zamijetiti na slici 20, helikoidalna putanja čestice ima sve manji radijus.

Slika 20 Magnetsko zrcalo

Čestica će se dakle pri nekoj jakosti magnetskog polja odbiti i početi ubrzavati u suprotnom smjeru. Ubrzavanje čestice dovesti će do porasta komponente $v_{||}$, također, čestica će sad osjećati sve slabije polje, što znači da će joj se povećavati Larmorov radijus.

Ako se polje mijenja iz jačeg u slabije pa opet u jače (kao na slici 21), govorimo o magnetskoj boci. To je takva magnetska struktura u kojoj čestice mogu biti zarobljene između dva magnetska zrcala (odbijajući se od njih). Međutim čestica ne može biti vječno zarobljena u magnetskoj boci. Spomenuto je da do refleksije dolazi zbog komponente sile, koja se javlja zbog radikalne komponente magnetskog polja. Ta promjena će ovisiti o kutu uspona helikoide (def. $\tan\theta = v_{\perp}/v_{||}$), na način da će čestice sa manjim θ prodirati dublje u područje magnetskog polja. Čestice sa vrlo malim kutom θ , ispod nekog graničnog kuta, izaći će iz magnetske boce (tj. neće biti reflektirane). Kut uspona helikoide specifičan je za putanje čestice, međutim ako u magnetskoj boci ima mnogo čestica, one će se stalno sudarati i mijenjati putanje, odnosno dio čestica će stalno bježati iz magnetske boce.



Slika 21 Magnetska boca

Magnetsko zrcalo i magnetska boca česte su magnetske strukture koje se javljaju u svemiru i važne su za shvaćanje putanja i ponašanja toka CR. Refleksijom na magnetskom zrcalu udarnog vala supernove mogu biti ubrzane nabijene čestice. Takvim mehanizmom objašnjive su GCR srednjih i visokih energija, kao što je spomenuto u poglavlju 2.1. Primjer zatočenja nabijenih čestica u magnetsku bocu su Van Allenovi radijacijski pojasevi, dijelovi magnetosfere koji zarobljavaju niskoenergetske CR u Zemljinom mag. polju (koje je jače prema polovima).

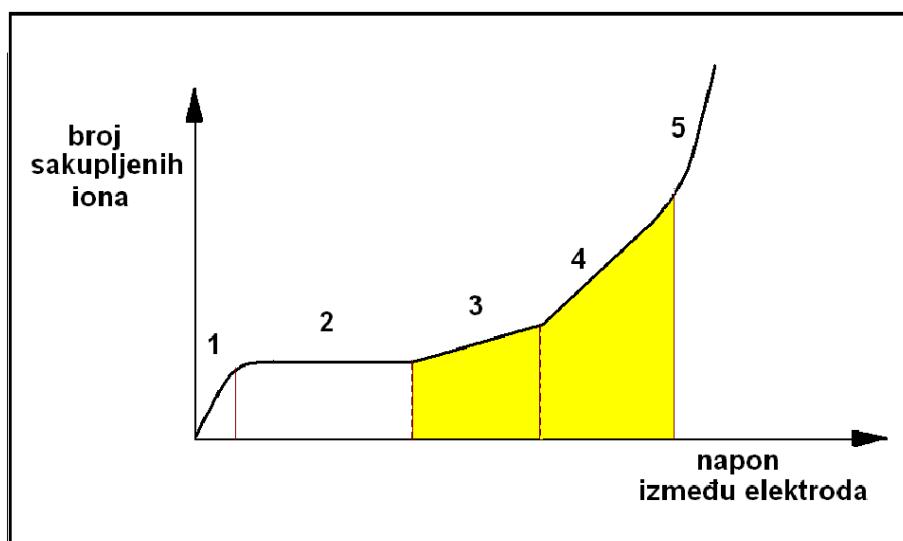
Dodatak 2: Detektori ionizacijskog zračenja

U poglavlju 2.4. je rečeno da se detekcija neutrona vrši apsorpcijom u nuklearnoj reakciji s materijalom detektora, nakon čega pobuđena jezgra emitira nabijenu česticu. Takve čestice, kao i primarne CR, koje detektiramo na letjelicama (kao što je spomenuto u poglavlju 3.5.), nazivamo ionizirajućim zračenjem (jer pobuđuju tj. ioniziraju sustav kroz koji prolaze) i detektiramo ih detektorima ionizirajućeg zračenja.

Proporcionalni brojač

Jedna od metoda detekcije ionizirajućeg zračenja koristi plinske detektore. To su cijevi napunjene plinom, koji se nalazi između katode i anode. Čestice koje želimo detektirati prolaskom kroz plin predaju svoju energiju ionizirajući atome, tj. odvajajući elektrone od pozitivnih iona, koji zatim budu privučeni prema odgovarajućim elektrodama. Njihovo kretanje prema elektrodama stvara suprotno električno polje, koje poništava početno električno polje, na taj način sprječavajući saturaciju sustava. Konačni efekt prolaska čestice je električni impuls.

Ovisno o naponu između elektroda, odnosno jakosti električnog polja, ovisi i odziv sustava, a o njemu pak ovisi izvedba detektora.



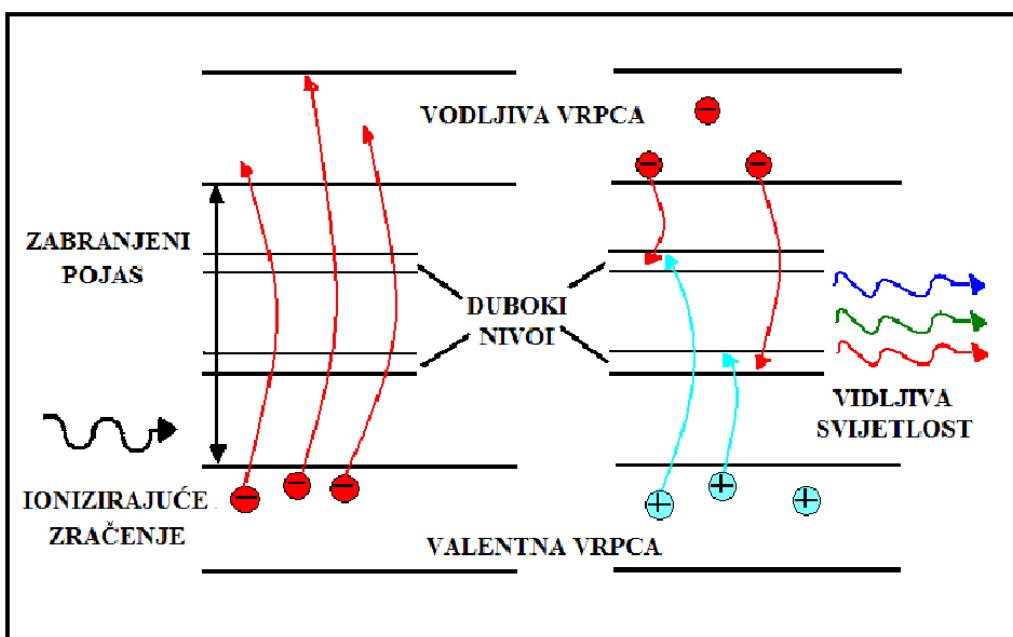
Slika 22 Odziv sustava ovisno o naponu između elektroda
5 je područja sa različitim odzivom: 1. rekombinacijsko, 2. saturacija, 3. i 4. linearne te 5. Geiger-Müllerovo (Ilakovac, 1993)

Za niske napone, električno polje između elektroda nije dovoljno jako da svi stvoreni elektroni dođu do anode (srednji slobodni put je premali). Za srednje napone postiže se područje saturacije u kome svi stvoreni elektroni dolaze do anode. Ako je el. polje jako, elektroni će biti snažno povučeni prema elektrodama te sudarajući se s neutralnim atomima po putu, stvaraju nove parove elektron-ion. Za više napone odziv

je isprva linearan (proporcionalan), a zatim, za još više napone, prelazi u eksponencijalan (Geiger-Muellerovo područje). Proporcionalni brojač radi u području linearog odziva sustava (označeno žuto na slici 22). U tom području struja koja se detektira je proporcionalna broju originalno proizvedenih ion-elektron parova (prolaskom nabijene čestice) pa se može dobiti i informacija o energiji. Proporcionalni brojač, kao što je spomenuto u poglavljju 2.4. dio je opreme neutron monitora. Plin u cijevima, koji u nuklearnim reakcijama apsorbira neutrone emitirajući nabijene čestice ujedno služi za detekciju tih nabijenih čestica.

Scintilacijski detektor

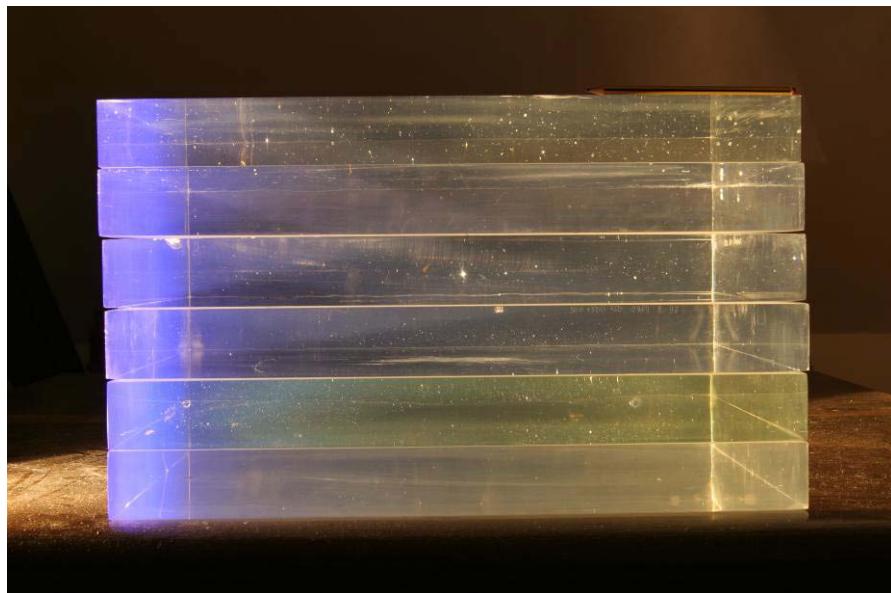
To je senzor čiji se princip rada zasniva na fizikalnoj pojavi luminiscencije. *Luminiscencija* je pojava u kojoj se pobuđeni sustav relaksira otpuštanjem fotona vidljive svjetlosti. Upadni visokoenergetski fotoni pobude elektrone u viša energetska stanja, koji se potom vraćaju prema osnovnom stanju otpuštajući fotone niže energije, kao bljeskove vidljive svjetlosti.



Slika 23 Prikaz luminiscencije na kristalnoj strukturi s nečistoćama

Kao materijal mogu se koristiti sustavi koji imaju energetske nivo – atomi, molekule ili kristali. Kod materijala s kristalnom strukturom bitan su faktor nečistoće odnosno defekti, čija uloga je da budu „klopke“. „Klopke“ u kristalu rade tzv. duboke nivo, energetske vrpce unutar zabranjenog pojasa E_g , koje mogu zarobiti elektrone iz vodljive vrpce i tako dovesti do njihove rekombinacije sa šupljinama iz valentne vrpce. Na taj način će emitirani foton imati nižu energiju od upadnog (što kod direktnе rekombinacije ne bi bio slučaj).

Materijal za detekciju koristi se u obliku scintilacijskih ploča, povezanih sa elektronikom u svrhu prevođenja signala, u korisniji električni signal. Emitirani fotoni vidljive svijetlosti se „love“ fotokatodom, djelom uređaja koji na principu fotoefekta pretvara svjetlosni impuls u električni.



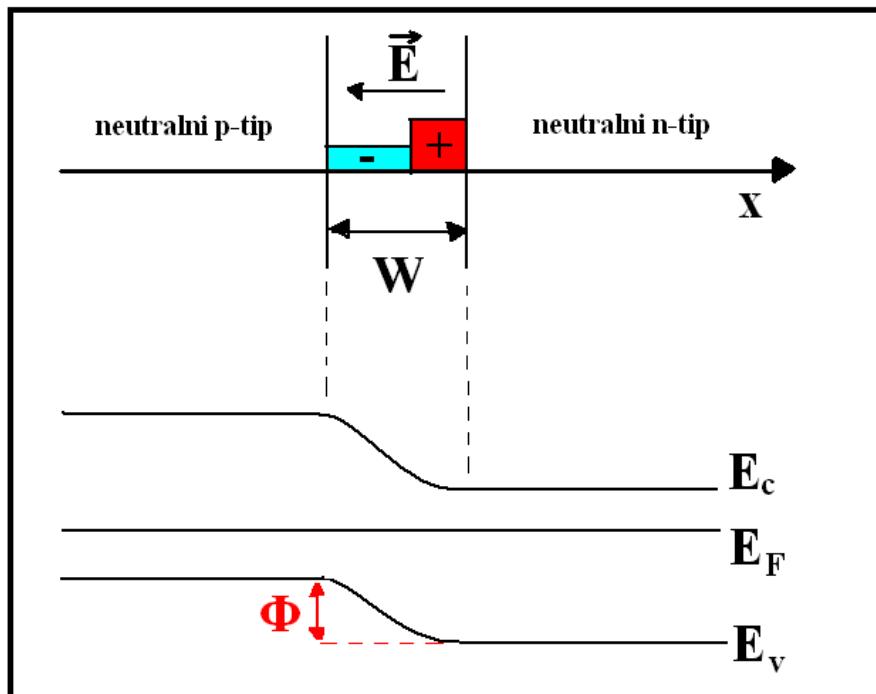
Slika 24 Scintilacijske ploče
(Zagrebačka zvjezdarnica, dr.sc. Dragan Roša)

Poluvodički detektor

Poluvodički detektori ionizacijskog zračenja su reverzno polarizirani pn spojevi. Pn spoj je spoj dva tipa poluvodiča: n-tipa, koji se dobije dopiranjem čistog kristala elementima V skupine i p-tipa, koji se dobije dopiranjem elementima III skupine. Ta dva tipa poluvodiča se razlikuju po nosiocima naboja, u n-tipu su to negativno nabijeni elektroni, a u p-tipu pozitivno nabijene šupljine. Razlika dopiranih PV u odnosu na intrinsični (nedopirani) je u vodljivosti - dopirani PV imaju puno veću vodljivost na sobnoj temperaturi od intrinsičnih.

Spajanjem ta dva tipa PV dolazi do difuzije elektrona iz n-tipa u p-tip zbog razlike u koncentraciji, pa u području oko spoja dolazi do rekombinacije i stvara se područje osiromašenja (nosiocima naboja). U području osiromašenja (W) ostaju ioni i to na strani n-tipa pozitivno, a na strani p-tipa negativno nabijeni, pa se između njih javlja jako električno polje. Novonastalo električno polje će stvoriti driftnu struju upravo tolike jakosti da poništi difuzionu, na taj način uravnotežujući sustav.

Fermijev nivo¹⁷ (kemijski potencijal, E_F) intrinsičnog PV nalazi se na sredini, između valentne (E_V) i vodljive (E_C) vrpce. Fermijevi nivoi dopiranih PV pomaknuti su prema valentnoj (p-tip) odnosno vodljivoj (n-tip) vrpci. Kako kemijski potencijal novonastalog sustava mora biti izjednačen kroz cijeli sustav, na samom spoju će se javiti potencijalna barijera (Φ).



Slika 25 PN spoj u ravnoteži

Daleko od spoja dopirani PV zadržavaju svoja svojstva (neutralni p i n-tip); u području osiromašenja (W) struja difuzije nosioca naboja poništena je driftnom strujom zbog stvorenog el. polja (E) između područja pozitivno i negativno nabijenih iona; kemijski potencijal (E_F) ostaje isti kroz čitav kristal pa se javlja potencijalna barijera (Φ) koju elektroni moraju savladati da bi prešli iz n-tipa u p-tip

Stavljanjem pozitivnog ili negativnog napona na p stranu diode dobijemo propusnu ili nepropusnu polarizaciju. Propusna polarizacija je režim rada diode u kojem struja raste eksponencijalno s naponom, a potencijalna barijera je smanjena u odnosu na ravnotežni pn spoj, kao i područje osiromašenja. Kod nepropusne (reverzne) polarizacije potencijalna barijera i područje osiromašenja se povećavaju, pa struja s naponom raste kratko do neke male konstantne vrijednosti.

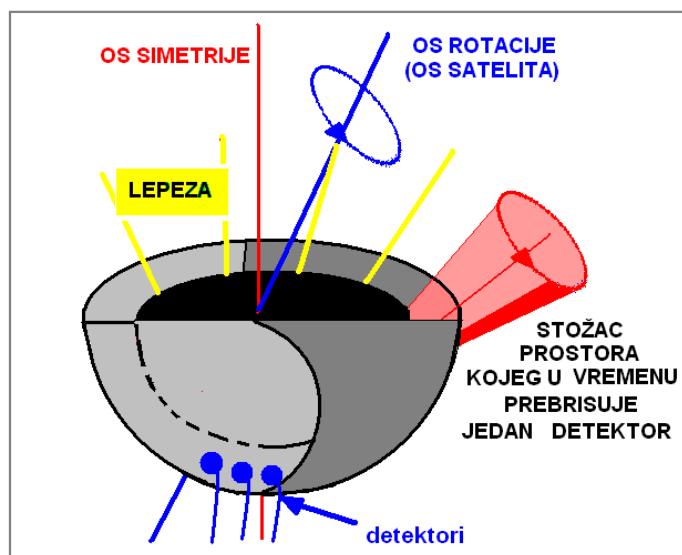
Prolazak brze čestice kroz područje osiromašenja rezultira stvaranjem nosioca naboja. Kako je područje osiromašenja u reverzno polariziranom pn spoju veliko i pridruženo mu je jako električno polje, novostvoreni nosioci naboja budu brzo povučeni prema elektrodama, čime se dobije električni impuls.

¹⁷ Fermijev nivo je pripadni kemijski potencijal za zadani broj fermiona, koji je temperaturno ovisan. Kako dva fermiona, prema Paulijevom principu, ne smiju biti u istome stanju, na 0 K to je zadnje popunjeno stanje

Dodatak 3: ACE SWEPAM-I - Elektrostatski analizator

SWEPAM-I uređaj na ACE-u je elektrostatski analizator (eng „Electrostatic Analyzer“, ESA) sferne geometrije. ESA je općenito uređaj koji koristi električno polje kako bi promijenio putanju nabijene čestice te na taj način „filtrirao“ samo čestice određene energije, tj. naboja. ESA sa sfernom geometrijom omogućava selekciju čestica iz određenog smjera, na taj način omogućavajući detekciju putanja.

Sastoji se od dvije zakrivljene koncentrične ploče, koje se drže na suprotnim naponima. Prolaskom kroz takav prostor nabijenoj čestici će se mijenjati putanja, jer će osjećati električno polje, koje će negativno nabijene čestice usmjeravati prema pozitivno nabijenoj ploči, a pozitivno nabijene čestice prema negativno nabijenoj ploči. Utjecaj električnog polja na putanju čestice će ovisiti o energiji tj. brzini čestice i količini naboja koji nosi. Dakle izborom napona, koji ćemo staviti na ploče, zadajemo uski interval vrijednosti E/q , koje čestica mora imati da bi prošla kroz ESA i došla do detektora. Detektori se nalaze na dnu polukugle, a poslagani su tako da, ovisno o mjestu gdje je čestica ušla u ESA, ona bude detektirana točno određenim detektorom. Detektori dakle „hvataju“ čestice iz točno određenih smjerova, pa njihov „pogled“ ustvari iscrtava lepezu. Dodatno, rotacijom detektora oko svoje osi, oni „prebrisuju“ nebo u stošcima, poput svjetionika (slika 26).



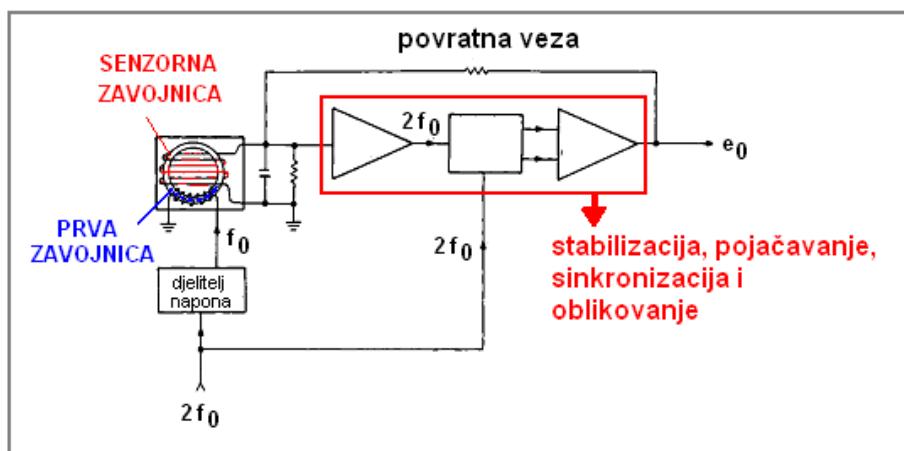
Slika 26 Prikaz geometrije elektrostatskog analizatora

Smjer dolaska CR određen je sa dva kuta – polarnim i azimutalnim. Polarni kut je kut u ravnini lepeze (dakle ravnini u kojoj leže os simetrije i os satelita) a zadan je tako da se 0° podudara sa osi rotacije (tj. osi satelita). Azimutalni kut je kut u ravnini okomitoj na os simetrije, dakle okomitoj na lepezu. Očito, ionи koji dođu pod određenim polarnim kutom završe u različitim detektorima, iako detektori ne pokrivaju interval od 0° do 180° , jer referentna os nije os simetrije, već os rotacije. CR iz različitih azimutalnih kutova mogu ući u detektor u različitim fazama rotacije. Stoga poznavanjem faze rotacije, detekcijom točno određenim detektorm znamo smjer iz kojeg je zabilježena CR došla.

Dodatak 4: ACE MAG - Triaksijalni fluxgate magnetometar

To je uređaj koji osim jakosti magnetskog polja može mjeriti i njegov smjer s obzirom na os mjernog instrumenta, odnosno, pošto su triaksijalni, mogu mjeriti jakosti za svaku od tri ortogonalne komponente. Sastoji se od tri uniaksijalna fluxgate magnetometra.

Princip rada fluxgate magnetometra je slijedeći. Magnetičnu jezgru omotamo dvjema zavojnicama, na jednu se ciklički dovodi signal koji ju magnetizira, demagnetizira, reverzno magnetizira i opet demagnetizira, a druga hvata signal. Ako se takva jezgra nalazi u prostoru bez vanjskog magnetskog polja, senzorna zavojnica će detektirati signal sa prve zavojnice, međutim ako postoji vanjsko magnetsko polje, ono će magnetizirati jezgru te na taj način utjecati na izlazni signal.



Slika 27 Shema uniaksijalnog fluxgate magnetometra

Na slici 27 prikazana je shema uređaja. Signal frekvencije $2f_0$ se odvodi prema senzoru i njegovom izlazu. Prije nego dođe na prvu zavojnicu senzora, signal prolazi kroz djelitelj napona, tako da na senzornu zavojnicu dolazi signal frekvencije f_0 . Ako je prisutno vanjsko polje, dvije polovice jezgre neće biti izbalansirane što će dovesti do javljanja signala frekvencije $2f_0$ i viših parnih harmonika (koji se filtriraju). Dobiveni signal se stabilizira, pojača, sinkronizira sa ulaznim signalom te konačno oblikuje. Povratna veza vraća dobiveni signal na senzornu zavojnicu, što će poništiti efekt vanjskog polja. Rezultat će biti periodički odziv napona izlaznog signala, čija frekvencija će ovisiti o smjeru magnetskog polja, a amplituda o jakosti vanjskog polja:

$$e_0(B, \Theta) = kR_f B \cos(\Theta) + V_z$$

gdje je $e_0(B, \Theta)$ napon izlaznog signala, k konstanta koja ovisi o svojstvima senzorne zavojnice, R_f otpor otpornika u povratnoj vezi integratora, B jakost vanjskog polja, Θ kut između osi detektor-a i osi magnetskog polja, a V_z napon šuma.

Odzivna funkcija može se mijenjati mijenjanjem vrijednosti R_f , stoga se mjerna skala magnetometra najlakše može podešavati tako da se u povratnoj vezi koristi promjenjivi otpornik. Kombinacijom tri senzora sa osima u smjeru osi satelita, dobiju se iznosi pojedinih komponenata magnetskog polja (usmjerenih duž osi satelita).

Popis slika

Slika 1 Spektar energija GCR	7
Slika 2 Geomagnetsko polje i Zemljina magnetosfera	8
Slika 3 Interakcija CR i geomagnetskog polja	9
Slika 4 Ovisnost vertikalnog graničnog geomagnetskog rigiditeta o geografskom položaju	10
Slika 5 Prikaz atmosferskog pljuska.....	11
Slika 6 Globalna mreža neutron monitora 1997. godine	12
Slika 7 Shematski prikaz IGY neutronskog monitora	13
Slika 8 Prikaz hibridnog SEVAN detektora	14
Slika 9 SEVAN CRO detektor	14
Slika 10 Ciklus Sunčeve aktivnosti i solarna modulacija	16
Slika 11 Silnice Sunčevog magnetskog polja.....	18
Slika 12 HCS i Parkerova spirala	18
Slika 13 Heliosfera, heliopauza i međuzvjezdani prostor	19
Slika 14 Prikaz ICME	20
Slika 15 Koronin izbačaj snimljen u razmacima od 1h	21
Slika 16 Ilustracija karakteristika ICME i CIR	23
Slika 17 ACE sa mjernim instrumentima	24
Slika 18 Prikaz mjerena na primjeru događaja 26.07.2004	28
Slika 19 Helikoidalna putanja	46
Slika 20 Magnetsko zrcalo	47
Slika 21 Magnetska boca	47
Slika 22 Odziv sustava ovisno o naponu između elektroda	48
Slika 23 Prikaz luminiscencije na kristalnoj strukturi s nečistoćama	49
Slika 24 Scintilacijske ploče	50
Slika 25 PN spoj u ravnoteži	51
Slika 26 Prikaz geometrije elektrostatskog analizatora	52
Slika 27 Shema uniaksijalnog fluxgate magnetometra.....	53

Popis grafova

- Graf 1:** Ovisnost amplitude Forbushevog smanjenja (F_d) o jakosti (B) i fluktuacijama (dB) magnetskog polja za različite tipove i strukture 34
- Graf 2:** Ovisnost absolutne vrijednosti amplitude Forbushevog smanjenja ($|F_d|$) o jakosti (B) i fluktuacijama (dB) magnetskog polja, sa greškama, za različite tipove i strukture 35
- Graf 3:** Ovisnost trajanja pada FD (t_{F_d}) o trajanju porasta B (t_B) za različite tipove i strukture 36
- Graf 4:** Ovisnost trajanja FD (T_{F_d}) o vremenu prolaska poremećaja (T_B) za različite tipove i strukture 37
- Graf 5:** Ovisnost umnožaka trajanja i absolutne vrijednosti amplitude FD-a ($|F_d|T_{F_d}$) o produktu trajanja prolaska poremećaja i jakosti magnetskog polja (BT_B) za različite tipove i strukture 38
- Graf 6:** Ovisnost absolutne vrijednosti amplitude FD ($|F_d|$) o relativnoj brzini poremećaja (prema brzini Sunčevog vjetra, v) za različite tipove i strukture 39
- Graf 7:** Ovisnost absolutne vrijednosti amplitude FD ($|F_d|$) o umnošku porasta magnetskog polja i relativne brzine poremećaja (Bv) za različite tipove i strukture .. 40

- Graf 8:** Ovisnost absolutne vrijednosti amplitude FD ($|Fd|$) o umnošku porasta magnetskog polja, relativne brzine i vremena prolaska poremećaja (BvT_B) za različite tipove i strukture 40
- Graf 9:** Ovisnost amplitude Forbushevog smanjenja (Fd) o jakosti (B) i fluktuacijama (dB) magnetskog polja za različite vrste poremećaja Sunčevog vjetra 41
- Graf 10:** lijevo - ovisnost trajanja pada FD -a (t_{Fd}) o trajanju porasta B (t_B) za različite vrste poremećaja Sunčevog vjetra; desno – ovisnost trajanja FD -a (T_{Fd}) o vremenu prolaska poremećaja (T_B) za različite poremećaje Sunčevog vjetra 42
- Graf 11:** Ovisnost absolutne vrijednosti amplitude FD ($|Fd|$) o relativnoj brzini poremećaja (v) i njenom produktu s amplitudom magnetskog polja (Bv) za različite vrste poremećaja Sunčevog vjetra 42
- Graf 12:** Ovisnost produkata za za različite vrste poremećaja Sunčevog vjetra..... 43

Popis tablica

Tablica 1: Vrste i uzroci promjena toka CR.....	15
Tablica 2: Neutronske monitori čiji podaci su preuzeti	26
Tablica 3: Izmjereni podaci.....	32

Popis kratica

ACE („Advanced Composition Explorer“) – *NASA-in istraživački satelit*

ACR („Anomalous Cosmic Rays“) – *anomalne kozmičke zrake*

AU („Astronomical Unit“) – *astronomска единица, srednja udaljenost od Zemlje do Sunca*

CA („Composition Aperture“) – *detektor na ACE-u*

CEM („Channel Electron Multiplier“) – *detektor na ACE-u*

CIR („Corotating Interaction Region“) – *korotirajuća regija interakcije*

CME („Coronal Mass Ejection“) – *koronin izbačaj*

CR („Cosmic Rays“) – *kozmičke zrake*

CRIS („The Cosmic Ray Isotope Spectrometer“) – *instrument na ACE-u*

DOY („Day of The Year“) – *redni broj dana u godini*

EPAM („Electron, Proton and Alpha Monitor“) – *instrument na ACE-u*

ESA¹ („Electrostatic Analyzer“) – *elektrostatski analizator*

ESA² („European Space Agency“) – *europska svemirska agencija*

FD („Forbush Decrease“) – *Forbushevo smanjenje*

GCR („Galactic Cosmic Rays“) – *galaktičke kozmičke zrake*

GLE („Ground Level Enhancements“) – *kratki i veliki porasti u intenzitetu CR uslijed dolaska SCR*

GSE („Geocentric Solar Ecliptic“) – *koordinatni sustav Zemlje, zadan spojnicom Zemlja-Sunce i sjevernim polom u odnosu na ekliptiku*

GSM („Geocentric Solar Magnetospheric“) – *koordinatni sustav Zemlje, zadan spojnicom Zemlja-Sunce i projekcijom diplone osi geomagnetskog polja na yz ravninu GSE sustava*

HCS („Heliospheric Current Sheet“) – *heliosferna strujna ploha*

ICME („Interplanetary Coronal Mass Ejection“) – *međuplanetarni koronin izbačaj*

IMF („Interplanetary Magnetic Field“) – *međuplanetarno magnetsko polje*

LEFS („Low Energy Foil Spectrometer“) – *detektor na ACE-u*

LEMS („Low Energy Magnetic Spectrometer“) – *detektor na ACE-u*

MAG („Magnetometer“) – *instrument na ACE-u*

NASA („National Aeronautics and Space Administration“) – *američka svemirska agencija*

NM („Neutron Monitor“) – *neutron monitor*

NMDB („Neutron Monitor Dana Base“) – *baza podataka o neutron monitorima na internetu*

NMN („Neutron Monitor Network“) – *globalna mreža neutronskega monitorja*

RTN („Radial-Tangential-Normal) – *koordinatni sistem satelita, čiju jednu os definira spojnica sa Suncem, a drugu vektorski umnožak spojnice i osi sunčeve rotacije*

SCR („Solar Cosmic Rays“) – *solarne kozmičke zrake*

SEPICA („Solar Energetic Particle Ionic Charge Analyzer“) – *instrument na ACE-u*

SEVAN („Space Environmental Viewing and Analysis Network“) – *mreža hibridnih monitorja*

SIS („The Solar Isotope Spectrometer“) – *instrument na ACE-u*

SOFT („Scintilating Optical Fiber Trajectory“) – *uređaj na ACE-u*

SOHO („Solar and Heliospheric Observatory“) – *zajednički istraživački satelit NASA-e i ESA-e*

SOTERIA („SOlar-TERrestrial Investigations and Archives“)

SPIDR („Space Physics Interactive Data Resource“) – *online baza podataka*

SWEPAM („Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor“) – *instrument na ACE-u*

SWEPAM-E – *SWEPAM-ov detektor za elektrone*

SWEPAM-I – *SWEPAM-ov detektor za ione*

SWICS („Solar Wind Ion Composition Spectrometer“) – *instrument na ACE-u*

SWIMS („Solar Wind Ion Mass Spectrometer“) – *instrument na ACE-u*

ULEIS („Ultra Low Energy Isotope Spectrometer“) – *instrument na ACE-u*

VGGR – *vertikalni granični geomagnetski rigiditet*

Literatura

Acuna H. M., 2002, „Space-based magnetometers“, *Review of Scientific Instruments* **73**:3717-3736

Badruddin, R.S. Yadav and N.R. Yadav, 1986, „Influence of Magnetic Clouds on Cosmic Ray Variations“, *Solar Phys.* **105**:413-428

Barnden, L.R., 1973, „The large-scale magnetic field configuration associated with Forbush decreases“, *Proc. 13th Inter. Cosmic Ray Conf.*, **2**:1277-1281

Belov, A. V. , E. A. Eroshenko, V.A. Oleneva, A. B . Sruminsky and V. G. Yankee, 2001, „What determines the magnitude of Forbush decreases?“, *Adv. Space Res.* **27**: 625-630

Bostanjyan, N. And A. Chilingarian, 2008, „On the Relation of the Forbush Decreases Detected by ASEC Monitors During the 23rd Solar Activity Cycle with ICME Parameters“, *Proceedings of International Symposium Forges 2008, Nor-Amberd, Armenia*

Cane, V.H., 1993, „Cosmic Ray Decreases and Magnetic Clouds“, *Journal of Geophysical Research* **98**:3509-3512

Cane, H.V., I.G. Richardson and T.T. von Rosenvinge, 1996, „Cosmic ray decreases 1964-1994“, *Journal of Geophysical Research* **101**:21,561-21,572

Cane, V. H., 2000, „Coronal mass ejections and Forbush decreases“, *Space Science Reviews* **93**: 55-77

Chilingarian, A., Ch. Angelov, K. Arakelyan, T. Arsov, K. Avakyan, S. Chilingaryan et al., 2009., „New Particle Detector Network for Solar Physics and Space Wheather research“, *Proceedings of the 31st ICRC, Lodz*

Čalogović J., B. Vršnak, M. Temmer and A. M. Veronig, 2008, „Cosmic Ray modulation by Corotating Interaction Regions“, *Proceedings IAU Symposium No. 257*

Jämsen, T., I.G. Usoskin, T. Räihä, J. Sarkamo, G.A. Kovaltsov, 2007, „Case study of Forbush decreases: Energy dependance of the recovery“, *Adv. Space Res.* **40**:342-347

Lockwood, J.A., W.R. Webber and J.R. Jokipii, 1986, „Characteristic Recovery Times of Forbush-Type Decreases in the Cosmic Radiation, 1. Observations at Earth at Different Energies“, *J. Geophys. Res.* **91**:2851-2857

McComas D.J., S.J. Bame, P.Barker, W.C. Feldman, J.L. Phillips, P. Riley and J.W. Griffee, 1998, „Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor (SWEPAM) for the Advanced Composition Explorer“, *Space Scinence Reviews* **86**: Nos. 1-4

Richardson, I.G., G. Wibberenz and H. V. Cane, 1996, „The relationship between recurring cosmic ray depressions and corotating solar wind streams at ≤ 1 AU: IMP 8 and Helios 1 and 2 anticoincidence guard rate observations“, *Journal of Geophysical Research*, **101**:13483-13496

Schwenn, R., A. Dal Lago, E. Huttunen and W.D. Gonzalez, 2005, „The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth“, *Ann. Geophys.*, **23**:1033-1059

Singh, Y.P. and Badruddin, 2006, „Effects of the polarity states of the heliospheric magnetic field and particle drifts in cosmic radiation“, *Solar Phys.* **234**:339-352

Smith C.W., J. L'Heureux, N.F. Ness, M.H. Acuna, L.F. Burlaga and J. Scheifele, 1998, „The ACE Magnetic Fields Experiment“, *Space Scinence Reviews* **86**: Nos. 1-4

Temmer, M., A.M. Veronig, B. Vršnak, J. Rybak, P. Gomory, S. Stoiser and D. Maričić, 2008, „Acceleration in fast HALO CMEs and synchronized flare HXR bursts“, *The Astrophysical Journal* **673**: L95-L98

Vršnak, B., 2006, „Forces governing coronal mass ejections“, *Adv. Space Res.* **38**:431-440

Vršnak, B. and Žic, T., 2007, „Transit times of interplanetary coronal mass ejections and the solar wind speed“, *A&A* **472**: 937-943

Vršnak, B., D. Vrbanec and J. Čalogović, 2008, „Dynamics of coronal mass ejections: The mass scaling of the aerodynamic drag“, *A&A* **490**: 811-815

Vršnak, B., „Processes and mechanisms governing the initiation and propagation of CMEs“, *Ann. Geophys.*, **26**: 3089-3101

Mursula, K. and I. Usoskin; „Heliospheric Physics and Cosmic Rays, lecture notes, fall term 2003., University of Oulu“, http://cc.oulu.fi/~usoskin/Lect_2003.pdf

Ilakovac,K., „Nuklearni praktikum: skripta za rad studenata u praktikumu“, Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 1993

Vršnak, B., „Temelji fizike plazme“, Školska knjiga, Zagreb, 1996.