

# Prijenos momenta količine gibanja i polje brzina velikih razmjera na Suncu

---

Skokić, Ivica

Doctoral thesis / Disertacija

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:707089>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Ivica Skokić

**PRIJENOS MOMENTA KOLIČINE  
GIBANJA I POLJE BRZINA VELIKIH  
RAZMJERA NA SUNCU**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2014.





University of Zagreb  
FACULTY OF SCIENCE  
PHYSICS DEPARTMENT

Ivica Skokić

**ANGULAR MOMENTUM  
TRANSPORT AND LARGE-SCALE  
VELOCITY FIELD ON THE SUN**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2014







Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Ivica Skokić

# **PRIJENOS MOMENTA KOLIČINE GIBANJA I POLJE BRZINA VELIKIH RAZMJERA NA SUNCU**

DOKTORSKI RAD

Mentor: dr. sc. Roman Brajša, znanstveni savjetnik

Opservatorij Hvar, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Zagreb, 2014.





University of Zagreb  
FACULTY OF SCIENCE  
PHYSICS DEPARTMENT

Ivica Skokić

# **ANGULAR MOMENTUM TRANSPORT AND LARGE-SCALE VELOCITY FIELD ON THE SUN**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: dr. sc. Roman Brajša, scientific advisor

Hvar Observatory, Faculty of Geodesy, University of Zagreb

Zagreb, 2014



# Informacije o mentoru

Mentor: dr. sc. Roman Brajša, dipl. ing., znanstveni savjetnik

Adresa: Opservatorij Hvar, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, Zagreb

E-mail: romanb@geof.hr

Telefon: + 385 (1) 4639 318



# Zahvale

Ovaj rad ne bi bio moguć bez nesebične pomoći mnogih ljudi koji su doprinijeli na razne načine. U prvom redu, želio bih zahvaliti svojem mentoru Romanu Brajši koji je uvijek našao volje i vremena strpljivo odgovoriti na sva moja pitanja i uvesti me u profesionalni istraživački rad. Nikako ne mogu izostaviti niti članove povjerenstva, Matka Milina i Bojana Vršnaka, koji su mi uvelike pomogli svojom stručnošću, sugestijama, primjedbama i komentarima. Hvala mom bratu što mi je pokazao prekrasan svijet prirodnih znanosti i tehnike, sestri, roditeljima i ostalim članovima moje obitelji koji su mi svih ovih godina bili prijeko potrebna podrška, te svojoj djevojci Ani i prijateljima koji su s razumijevanjem trpili trenutke moje izolacije, a uskakali u pravo vrijeme svojim društvom i humorom.

Iskrene zahvale upućujem Davoru Sudaru i ostalim suradnicima s Opservatorija Hvar i Zvezdarnice Zagreb, bez njihove stručnosti, savjeta i suradnje ne bih daleko dogurao, također i djelatnicima referade poslijediplomskog studija, a osobito Marini Kavur, radi njihovog bezgraničnog strpljenja i ljubaznosti, članovima Astronomskog društva „Anonymus“ i kolegama iz Hrvatske Meteorske Mreže te svojemu poslodavcu koji mi je više puta pogledavao kroz prste prilikom probijanja zacrtanih rokova.

Posebne zahvale idu ljudima koji doprinose i održavaju baze podataka Greenwich Photoheliographic Results, Solar Observing Optical Network, Solar and Heliospheric Observatory, Solar Dynamics Observatory i njihovim institucijama, National Aeronautics and Space Administration, European Space Agency, Stevenu Saaru (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA), Hubertusu Wöhlju (Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg) i svima ostalima čijom sam ljubaznošću i zalaganjem dobio potrebne podatke za ovaj rad.





# Sažetak

Cilj ovog rada je istražiti hipotezu da je Reynoldsova napetost odgovorna za prijenos momenta količine gibanja od polova prema ekvatoru i time može objasniti opažani profil diferencijalne rotacije Sunca. Također su analizirane meridijanske brzine, rezidualne rotacijske brzine, korelacije između brzina te torzione oscilacije. Od podataka su korišteni položaji grupa pjega iz baze GPR (Greenwich Photoheliographic Results) i SOON/USAF/NOAA (Solar Observing Optical Network/United States Air Force/National Oceanic and Atmospheric Administration), te položaji koroninih svijetlih točaka sa snimaka SOHO/EIT (Solar and Heliospheric Observatory/Extreme ultraviolet Imaging Telescope) i SDO/AIA (Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly). Brzine su izračunate iz promjene položaja grupa pjega i svijetlih točaka, primjenom sinodičko-sideričke korekcije i korekcije visine. Istražene su ovisnosti brzina o heliografskoj širini, vremenu i fazi ciklusa Sunčeve aktivnosti.

Rezultati pokazuju da se grupe pjega gibaju prema središtu aktivnosti, tj. srednjoj heliografskoj širini pjega, na obje polutke tijekom cijele faze ciklusa aktivnosti. Gibanja koroninih svijetlih točaka pokazuju kompleksniji profil koji se mijenja s fazom ciklusa. Iznosi meridijanskih i rezidualnih rotacijskih brzina su u rasponu  $\pm 10 \text{ m s}^{-1}$ . Očekivani uzorak torzionih oscilacija nije opažen unutar statistički značajne vrijednosti. Horizontalna Reynoldsova napetost je negativna u cijelom području promatranih heliografskih širina, s naznakom minimuma od  $q \approx -3000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  na širini od  $\pm 30^\circ$ . U korištenoj konvenciji to znači prijenos kutnog momenta prema ekvatoru, u skladu s opažanim profilom rotacije Sunca. Također je unaprijeđena metoda sinodičko-sideričke korekcije.

**Ključne riječi:** Sunce – Sunčeve pjege – koronine svijetle točke – Reynoldsova napetost – diferencijalna rotacija – meridijanska gibanja – torzione oscilacije – ciklus aktivnosti Sunca



# Abstract

**Aims:** The main goal of this thesis is to investigate Reynolds stresses and to verify the hypothesis that they are responsible for the angular momentum transport toward the solar equator, maintaining the observed profile of the solar rotation velocity. Residual rotation velocities and meridional velocities and their correlation is also analyzed, as well as their dependence on time, phase of the solar activity cycle and heliographic latitude.

**Methods:** Positions of sunspot groups from GPR (Greenwich Photoheliographic Results) and SOON/USAF/NOAA (Solar Observing Optical Network/United States Air Force/National Oceanic and Atmospheric Administration) catalogs and positions of coronal bright points deduced from images taken by SOHO/EIT (Solar and Heliospheric Observatory/Extreme ultraviolet Imaging Telescope) and SDO/AIA (Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly) were used to calculate velocities, by applying synodic-sidereal and height corrections.

**Results:** Meridional motions of sunspot groups are toward the center of activity, i.e. the mean latitude of sunspot groups, from all observed latitudes and in all phases of the solar activity cycle. Motions of the coronal bright points show a complex pattern variable in time and phase of solar activity. The range of meridional and residual rotation velocities is  $\pm 10 \text{ m s}^{-1}$ . Expected pattern of torsional oscillations was not observed within statistical significance. Horizontal Reynolds stress is negative at all available latitudes and indicates that there is a minimum value of  $q \approx -3000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  located at latitudes  $\pm 30^\circ$ .

**Conclusions:** In convection used where positive velocities indicate poleward motions and negative equatorward motions, negative Reynolds stress indicates that angular momentum is transported toward the solar equator, in agreement with the observed rotational profile of the Sun. Also, an improved method of calculating the synodic-sidereal correction was presented.

**Key words:** Sun – sunspots – coronal bright points – Reynolds stress – differential rotation – meridional motions – torsional oscillations – solar activity cycle



# Sadržaj

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
1.1. Kratki povijesni pregled . . . . .	2
1.2. Rezultati dosadašnjih istraživanja . . . . .	4
1.2.1. Diferencijalna rotacija . . . . .	4
1.2.2. Torzione oscilacije . . . . .	6
1.2.3. Meridijanska gibanja . . . . .	6
1.2.4. Divovske ćelije . . . . .	8
1.2.5. Korelacija azimutalnih i meridijanskih brzina . . . . .	9
1.3. Glavni doprinosi ovog rada . . . . .	10
<b>2. Teorija diferencijalne rotacije</b>	<b>11</b>
2.1. Reynoldsova dekompozicija . . . . .	11
2.2. Prijenos momenta količine gibanja . . . . .	12
2.3. Meridijanska cirkulacija . . . . .	13
2.4. Reynoldsova napetost . . . . .	14
2.5. Magnetsko polje i Maxwellova napetost . . . . .	15
2.6. Viskoznost . . . . .	15
2.7. Što nam govore modeli? . . . . .	16
<b>3. Metode</b>	<b>19</b>
3.1. Objekti i strukture praćenja . . . . .	19
3.1.1. Sunčeve pjege . . . . .	19
3.1.2. Koronine svijetle točke . . . . .	21
3.2. Određivanje položaja objekata na Suncu . . . . .	23
3.3. Profil diferencijalne rotacije . . . . .	24
3.4. Određivanje brzina . . . . .	26
3.5. Sinodičko-siderička korekcija . . . . .	27
3.6. Korekcija visine . . . . .	31
3.7. Srednji profil rotacije . . . . .	33
3.8. Linearne brzine i Reynoldsova napetost . . . . .	33

3.9. Pogreške radi strukture objekata i rubnih efekata . . . . .	34
3.10. Pogreške orijentacije osi . . . . .	35
3.11. Pogreške zbog neravnomjerne distribucije objekata praćenja . . . . .	36
3.12. Ostale pogreške . . . . .	38
<b>4. Podaci i rezultati</b>	<b>39</b>
4.1. Extended Greenwich Photoheliographic Results . . . . .	39
4.1.1. Podaci . . . . .	39
4.1.2. Diferencijalna rotacija . . . . .	40
4.1.3. Meridijanska gibanja . . . . .	41
4.1.4. Torzione oscilacije . . . . .	44
4.1.5. Korelacije brzina i Reynoldsova napetost . . . . .	45
4.2. Solar and Heliospheric Observatory . . . . .	51
4.2.1. Podaci . . . . .	51
4.2.2. Rezidualna rotacijska gibanja . . . . .	52
4.2.3. Meridijanska gibanja . . . . .	53
4.2.4. Korelacija brzina i Reynoldsova napetost . . . . .	54
4.2.5. Osno-nesimetrična meridijanska gibanja . . . . .	55
4.2.6. Vlastita gibanja koroninih svijetlih točaka . . . . .	56
4.2.6.1. Raspodjele brzina . . . . .	56
4.2.6.2. Vrijeme života . . . . .	60
4.2.6.3. Srednji slobodni put . . . . .	62
4.2.6.4. Koeficijent difuzije nasumičnog hoda . . . . .	64
4.3. Solar Dynamics Observatory . . . . .	65
4.3.1. Podaci . . . . .	65
4.3.2. Profil diferencijalne rotacije . . . . .	66
4.3.3. Meridijanske i rezidualne rotacijske brzine . . . . .	72
4.3.4. Korelacije brzina i Reynoldsova napetost . . . . .	73
4.3.5. Koeficijent difuzije nasumičnog hoda . . . . .	75
<b>5. Diskusija i zaključak</b>	<b>79</b>
5.1. Profil diferencijalne rotacije . . . . .	79
5.2. Meridijanska gibanja . . . . .	81
5.3. Rotacijska rezidualna gibanja i torzione oscilacije . . . . .	82
5.4. Korelacije brzina i Reynoldsova napetost . . . . .	83
5.5. Vlastita gibanja koroninih svijetlih točaka . . . . .	83
5.6. Zaključak . . . . .	84

<b>A. Dodatak</b>	<b>85</b>
<b>Bibliografija</b>	<b>89</b>





# Popis slika

1.1. Usporedba Sunca u vidljivoj svjetlosti i magnetograma . . . . .	2
1.2. MHD mehanizam . . . . .	3
1.3. Profil diferencijalne rotacije (GONG) . . . . .	5
1.4. Torzione oscilacije (Mount Wilson) . . . . .	7
1.5. Meridijanska gibanja (Doppler) . . . . .	8
1.6. Sinoptička karta . . . . .	9
2.1. Tipičan rezultat modeliranja profila rotacije . . . . .	16
2.2. Tipičan rezultat modeliranja toka momenta količine gibanja . . . . .	17
2.3. Rezultat algebarskog modela Reynoldsove napetosti . . . . .	18
3.1. Grupa pjega, rasprostranjenost i površina . . . . .	20
3.2. Koronine svijetle točke (SDO/AIA) . . . . .	21
3.3. Nastanak koroninih svijetlih točaka . . . . .	22
3.4. Heliografski i helioprojektivni koordinatni sustav . . . . .	23
3.5. Prikaz parametara orijentacije Sunčeve osi . . . . .	28
3.6. Usporedba metoda za sinodičko-sideričku korekciju . . . . .	29
3.7. Wilsonov efekt . . . . .	35
3.8. Utjecaj neravnomjerne raspodjele objekata na meridijanska gibanja . . . . .	37
4.1. Raspodjela položaja grupa pjega iz skupa podataka EGR . . . . .	40
4.2. Meridijanske brzine grupa pjega iz EGR podataka . . . . .	41
4.3. Meridijanska gibanja usrednjena po područjima širine $2^\circ$ po latitudi . . . . .	42
4.4. Meridijanske brzine i srednja širina aktivnosti . . . . .	43
4.5. Ovisnost rezidualnih rotacijskih brzina o fazi ciklusa aktivnosti i latitudi . . . . .	45
4.6. Rezidualne rotacijske brzine za tri epohe . . . . .	46
4.7. Korelacije meridijanskih i rezidualnih rotacijskih gibanja za EGR . . . . .	47
4.8. Ovisnost kovarijance o latitudi za EGR . . . . .	48
4.9. Ovisnost kovarijance o fazi ciklusa i latitudi . . . . .	49
4.10. Srednje vrijednosti $q$ i aproksimacija eksponencijalnim modelom . . . . .	50
4.11. Rezidualne rotacijske brzine (SOHO/EIT) . . . . .	52

4.12. Rezidualne rotacijske brzine, automatska metoda (SOHO/EIT) . . . . .	53
4.13. Meridijanske brzine (SOHO/EIT) . . . . .	53
4.14. Meridijanske brzine, automatska metoda (SOHO/EIT) . . . . .	54
4.15. Kovarijance brzina, automatska metoda (SOHO/EIT) . . . . .	55
4.16. Osno-nesimetrična meridijanska gibanja, interaktivna metoda (SOHO/EIT)	56
4.17. Raspodjela meridijanskih brzina, interaktivna metoda (SOHO/EIT) . . . .	57
4.18. Raspodjela rezidualnih rotacijskih brzina, interaktivna metoda (SOHO/EIT)	57
4.19. Raspodjela apsolutnih brzina, interaktivna metoda (SOHO/EIT) . . . . .	58
4.20. Raspodjela apsolutnih brzina, interaktivna metoda (SOHO/EIT) . . . . .	58
4.21. Vrijeme života koroninih svijetlih točkaca, interaktivna metoda (SOHO/EIT)	61
4.22. Korelacija apsolutne brzine i vremena života, data set 1 (SOHO/EIT) . .	61
4.23. Korelacija apsolutne brzine i vremena života, data set 2 (SOHO/EIT) . .	62
4.24. Ovisnost apsolutne brzine svijetlih točkaca o vremenu života, data set 1 i 2	63
4.25. Ovisnost apsolutne brzine svijetlih točkaca o vremenu života, log-normal prikaz, data set 1 i 2 . . . . .	64
4.26. Usporedba slike Sunca i detektiranih koroninih svijetlih točkaca . . . . .	66
4.27. Kretanje detektirane koronine svijetle točke na snimkama SDO/AIA . . . .	67
4.28. Raspodjela koroninih svijetlih točkaca s vektorima brzina (SDO/AIA) . . .	68
4.29. Pogreške kutnih rotacijskih i meridijanskih brzina . . . . .	69
4.30. Pogreške izmjerenih meridijanskih i rotacijskih brzina . . . . .	70
4.31. Profil diferencijalne rotacije Sunca iz podataka SDO/AIA . . . . .	71
4.32. Diferencijalna rotacija Sunca iz podataka SDO/AIA . . . . .	71
4.33. Ovisnost meridijanskih brzina o heliografskoj širini (SDO/AIA) . . . . .	72
4.34. Ovisnost rezidualnih rotacijskih brzina o heliografskoj širini (SDO/AIA) . .	73
4.35. Korelacija između meridijanskih i rezidualnih rotacijskih brzina (SDO/AIA)	74
4.36. Ovisnost kovarijance među brzinama o heliografskoj širini (SDO/AIA) . . .	75
4.37. Raspodjela brzina (SDO/AIA) . . . . .	76
4.38. Vremena života koroninih svijetlih točkaca (SDO/AIA) . . . . .	77

# Popis tablica

4.1. Koeficijenti linearne regresije meridijanskih gibanja (EGR) . . . . .	43
4.2. Srednje vrijednosti kovarijance brzina (EGR) . . . . .	48
4.3. Koeficijenti eksponencijalnog modela za $q$ . . . . .	50
4.4. Srednje vrijednosti brzina za tri tipa svijetlih točaka, interaktivna metoda, (SOHO/EIT). . . . .	59
4.5. Usporedba vrijednosti koeficijenta difuzije nasumičnog hoda . . . . .	65
4.6. Parametri profila diferencijalne rotacije Sunca (SDO/AIA). . . . .	69
4.7. Srednje vrijednosti kovarijance brzina (SDO) . . . . .	74
4.8. Srednje vrijednosti meridijanskih, rezidualnih rotacijskih i apsolutnih brzina (SDO/AIA) . . . . .	76
4.9. Srednji slobodni put i koeficijent difuzije (SDO/AIA) . . . . .	77
5.1. Usporedba mjerenja profila diferencijalne rotacije Sunca . . . . .	80



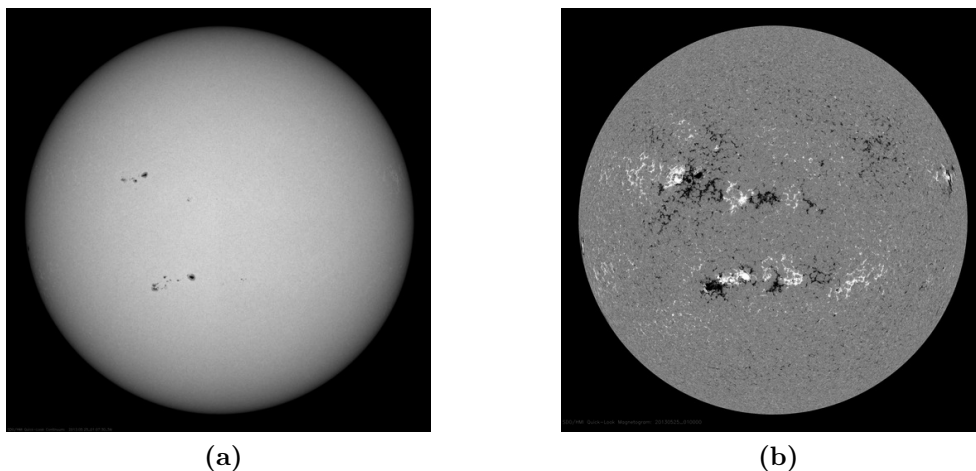
# 1. Uvod

Rotacija je jedno od osnovnih svojstava Sunca, a proučavanje veze rotacije i Sunčeve aktivnosti predstavlja važan zadatak solarne astronomije. Mjerenja tokova velikih razmjera na Suncu daju granične uvjete na teorijske modele konvekcijske zone i MHD dinamika za koje se pretpostavlja da imaju glavnu ulogu u generiranju i održavanju magnetskog polja Sunca kao i cjelokupne Sunčeve aktivnosti (Stix, 2004). Razumijevanje ciklusa aktivnosti i uloge MHD dinamika predstavlja jedan od ključnih neriješenih problema fizike Sunca.

Sunce je magnetski aktivna zvijezda i očito postoji mehanizam koji regenerira magnetsko polje. Aktualni teorijski modeli i opažanja upućuju na diferencijalnu rotaciju tj. rotaciju gdje period rotacije ovisi o latitudi, kao jedan od glavnih elemenata tog procesa. Kod Sunca, ekvatorska područja imaju veću kutnu brzinu od polarnih, a za održavanje rotacije takvih svojstava mora postojati prijenos momenta količine gibanja od polova prema ekvatoru. Mogući mehanizmi uključuju meridijanska gibanja, Reynoldsovu napetost (uz interakciju s Maxwelllovom napetošću) te viskoznu difuziju.

Gibanja plazme i struktura na Suncu su vrlo složena zbog turbulentne konvekcije u vanjskoj trećini Sunčevog polumjera. Na površini i atmosferi Sunca ih opažamo na raznim skalama počevši od granulacije, tj. konvektivnih ćelija veličine oko 1000 km, preko mezogranulacije, izbačaja, erupcija i prominencija sve do supergranulacije (oko 30 Mm), divovskih konvekcijskih ćelija, meridijanskih i azimutalnih tokova te konačno diferencijalne rotacije. Ove skale gibanja obično dijelimo na one malih i srednjih (do  $\sim 50$  Mm) te velikih (preko  $\sim 50$  Mm) razmjera.

Ciljevi ovog rada su mjerenje polja brzina velikih razmjera u atmosferi Sunca, rezidualnih gibanja pjega i koroninih svijetlih točaka i njihove moguće asimetrije sjever-jug s obzirom na Sunčev ekvator te mjerenje iznosa Reynoldsove napetosti u prijenosu momenta količine gibanja. Istraživanje se temelji na hipotezi da Reynoldsova napetost u kombinaciji s meridijanskim gibanjima održava prijenos momenta količine gibanja i time može protumačiti opažani profil diferencijalne rotacije. Pretpostavlja se i ovisnost između brzine diferencijalne rotacije i faze ciklusa Sunčeve aktivnosti zbog utjecaja Maxwelllove napetosti, što će se također istražiti.



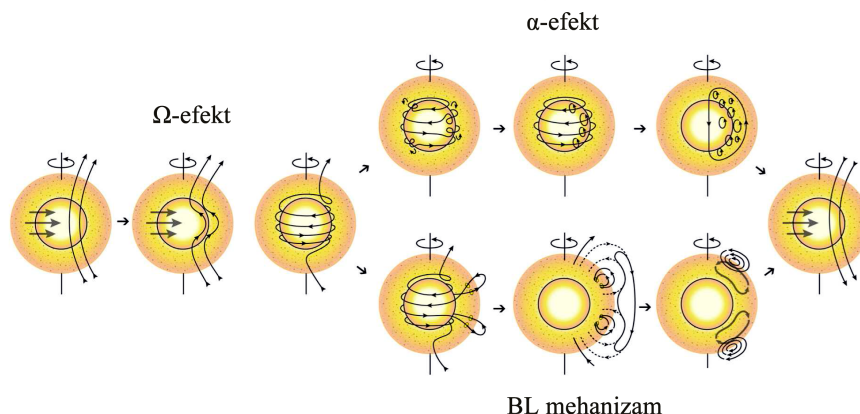
**Slika 1.1.:** Usporedba Sunca u (a) vidljivoj svjetlosti i (b) magnetogramu 25. svibnja 2013. Bijela područja na magnetogramu označavaju sjeverni magnetski polaritet, a crna područja južni polaritet. Ljubaznošću NASA/SDO.

### 1.1. Kratki povijesni pregled

Važnost Sunca za život na Zemlji poznata je od davnina. Već su drevni narodi obožavali Sunce i pridavali mu božanska obilježja. Neke njegove karakteristike poput pjega bile su zabilježene stoljećima prije nove ere (kineski astronomi su zabilježili opažanja velikih grupa pjega golim okom kroz maglu ili kad je Sunce nisko nad obzorom), a sustavno proučavanje počinje izumom teleskopa i promatranjima J. Fabriciusa, T. Harriota, G. Galileja i C. Scheinera, početkom 17. stoljeća. Vrlo brzo se došlo do otkrića rotacije Sunca, a nešto kasnije, Scheiner (1630) primjećuje da pjege bliže ekvatoru rotiraju brže od onih na višim heliografskim širinama i time otkriva njezin diferencijalni karakter. Sredinom 19. stoljeća H. Schwabe (1844) otkriva 11-godišnji ciklus izmjene broja pjega, a njegov rad nastavlja R. Wolf pobrojavanjem dotad poznatih ciklusa i uvođenjem indeksa aktivnosti iz broja opaženih pjega, tzv. Wolfvog broja. Sustavna mjerenja diferencijalne rotacije i orijentacije rotacijske osi sredinom 19. stoljeća provodi R. C. Carrington (1863). Minimizacijom meridijanskih komponenti vlastitih gibanja Sunčevih pjega odredio je nagib Sunčeve osi rotacije koji se koristi još i danas, iako moderna mjerenja daju malo drugačije vrijednosti (Balthasar et al., 1986a, 1987; Beck i Giles, 2005).

Novo razdoblje fizike Sunca počinje kada G. E. Hale (1908) otkriva magnetska polja na Suncu, opažanjem Zeemanovog efekta u spektru pjega. Rezultati opažanja ga navode na zaključak da se pjege obično pojavljuju u grupama u magnetski bipolarnim područjima, orijentiranim u smjeru rotacije (slika 1.1). Nakon višegodišnjih mjerenja, sa suradnicima objavljuje pravila polariteta bipolarnih područja (Hale et al., 1919):

- magnetska orijentacija bipolarnih područja ostaje nepromijenjena na obje polutke



**Slika 1.2.:** MHD mehanizam Sunčevog dinama. BL označava Babcock-Leightonov mehanizam (prema Sanchez et al., 2013).

tijekom pojedinačnog 11-godišnjeg ciklusa

- bipolarna područja na sjevernoj i južnoj polutci imaju suprotnu magnetsku orijentaciju
- magnetska orijentacija bipolarnih područja izmjenjuje se sa svakim ciklusom

Posljedica ovih pravila je da se isti polariteti magnetskih polja ponavljaju svake 22 godine. Postoje i grupe pjega koje se ne ponašaju u skladu s ovim pravilima, ali one su rijetke i kratkoživuće. Uz ova pravila primjećene su još dvije zakonitosti u ponašanju pjega i bipolarnih područja. Prva je *Spörerov zakon* (G. Spörer) koji kaže da se prve pjege početkom ciklusa pojavljuju na širinama od  $30 - 35^\circ$  na obje polutke, s napredovanjem ciklusa se pojavljuju sve bliže ekvatoru, te se zadnje pjege obično pojavljuju na oko  $\pm 10^\circ$  od ekvatora. Ova pravilnost se jasno vidi u leptir dijagramu koji je prvi prikazao E. W. Maunder (1922). Druga pravilnost je *Joyev zakon* (A. H. Joy) koji kaže da je vodeći polaritet (u smjeru rotacije) određenog bipolarnog područja bliži ekvatoru od pratećeg polariteta i da se taj nagib povećava s heliografskom širinom.

Opažene pravilnosti upućivale su na neki opći mehanizam usko povezan s magnetskim poljem Sunca. Njegovo tumačenje započinje radom H. Alfvéna i proučavanjem svojstava magnetizirane plazme čime je pokrenuo novo područje fizike, tzv. magnetohidrodinamiku (MHD; Alfvén, 1942). Između mnogobrojnih doprinosa, Alfvén opisuje pojavu „zamrzavanja“ magnetskih silnica u plazmi te MHD valove. Nedugo zatim, Parker (1955a,b) daje prvi kompletan model magnetskog ciklusa Sunca koji je mogao objasniti opažene pravilnosti. Približno istovremeno, Babcock (1961) i Leighton (1969) razvijaju nešto drugačiji model, koji, zajedno s Parkerovim, čini osnovu većine današnjih teorija magnetskog ciklusa aktivnosti Sunca.

Oba modela započinju jednakim mehanizmom generiranja toroidalnog polja (slika 1.2).



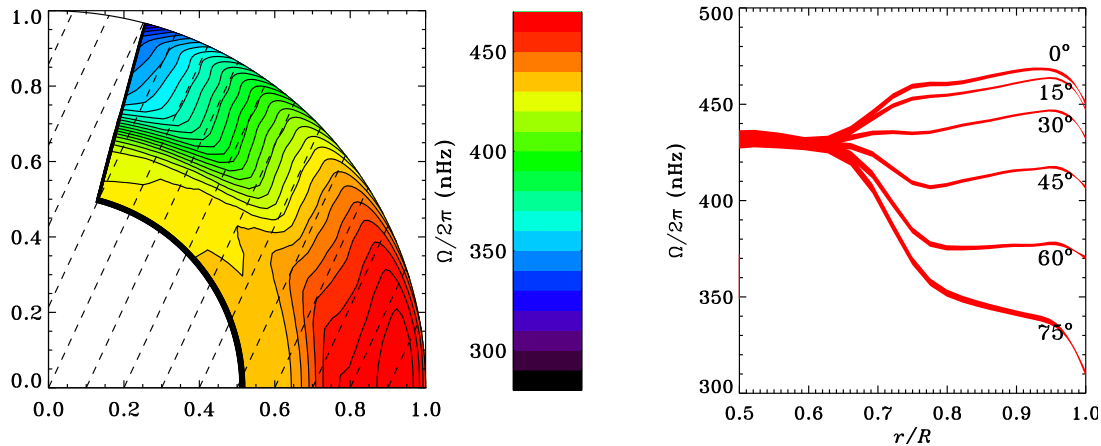
Kod većine astrofizičkih objekata pa tako i kod Sunca, difuzija magnetskog polja je zanemariva te je magnetsko polje zamrznuto u plazmi. Diferencijalna rotacija silnice početnog poloidalnog magnetskog polja povlači za sobom i rasteže ih u smjeru rotacije, čime se generira toroidalno polje. Ovaj mehanizam je poznat kao  $\Omega$ -*efekt*, a odvija se pri dnu konveksijske zone. Magnetske cijevi toroidalnog polja počinju se uzdizati prema površini kad je tlak u njima niži od okoline. Kad takva cijev stigne do površine Sunca, probija je u dvije točke suprotnog polariteta - nastaje bipolarno aktivno područje.

Da bi se ciklus zatvorio, potrebno je ponovno regenerirati poloidalno polje iz toroidalnog. Prema Parkerovom modelu, helikoidalne (ciklonske) turbulencije u konvektivnoj zoni uvijaju uzdižuće magnetske cijevi u meridijansku ravninu, generirajući time malene petlje čijim se usrednjavanjem dobije konačno poloidalno polje. Nasuprot tome, u Babcock-Leightonovom modelu se proces regeneracije odvija blizu površine. Kad magnetske cijevi eruptiraju na površini u obliku bipolarnih aktivnih područja, zbog Coriolisove sile prilikom uzdizanja imaju sistematski nagib od latitudinalnog smjera (Joyev zakon) te suprotne polaritete na polutkama. Prilikom raspada aktivnih područja, dijelovi bliže ekvatoru se prespajaju (rekonektiraju) s onima sa suprotne polutke dok dijelovi bliže polovima postupno mijenjaju polaritet poloidalnog polja inicirajući time novi ciklus. Ovaj proces regeneracije poloidalnog iz toroidalnog polja općenito je poznat kao  $\alpha$ -*efekt*. Isti naziv se ponekad upotrebljava za Parkerov model  $\alpha$ -efekta (mean-field ili MF  $\alpha$ -efekt) koji je bio dominantan do kraja 20. stoljeća kad je počelo ponovno oživljavanje Babcock-Leighton modela (BL mehanizam, BL ili dinamički  $\alpha$ -efekt).

## 1.2. Rezultati dosadašnjih istraživanja

### 1.2.1. Diferencijalna rotacija

Iznos i profil diferencijalne rotacije različit je za različite objekte i strukture čija se gibanja promatraju. Tako dugoživuće povratne grupe pjega rotiraju sporije od pojedinačnih pjega ili grupa pjega što se pripisuje kočenju pri gibanju pjega kroz sporiju plazmu (Balthasar et al., 1982). Dopplerovska mjerenja gibanja plazme daju nešto manju brzinu rotacije, dok supergranule rotiraju brže. To se obično pripisuje različitim dubinama u kojima su usidreni praćeni objekti (Ruždjak et al., 2004), ali to ne objašnjava sve rezultate (Meunier i Zhao, 2009). U novije vrijeme se za mjerenje diferencijalne rotacije koriste koronine svijetle točke zbog njihove rasprostranjenosti po cijelom disku Sunca (Brajša et al., 2001, 2002b). To su mala područja pojačane aktivnosti u rentgenskom i ultraljubičastom dijelu spektra u donjim dijelovima korone, a povezane su s magnetskim bipolima. Rezultati tih mjerenja su slični profilu rotacije dobivenom iz gibanja pjega, a postoji i indikacija



**Slika 1.3.:** Srednji profil rotacije Sunca iz GONG podataka. Konture konstantne brzine rotacije (lijevo) te ovisnost brzine rotacije o dubini (desno) za pojedine heliografske širine (prema Howe, 2009).

asimetrije sjeverne i južne polutke (Wöhl et al., 2010).

Analizirajući mjerenja položaja grupa pjega iz baze Greenwich Photoheliographic Results (GPR) za period 1879.-1976., Javaraiah (2003) zaključuje da parni i neparni ciklusi Sunčeve aktivnosti pokazuju znatne razlike: kod neparnih ciklusa rotacija je brža, više diferencijalna i asimetrična (sjever-jug) nego kod parnih ciklusa. Rezultate potvrđuju Brajša et al. (2006), a slična mjerenja na podacima Extreme Ultraviolet Imaging Telescope (EIT) instrumenta sa satelita Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) iz perioda 1998.-2006. daju podjednake rezultate i za koronine svijetle točke (Jurdana-Šepić et al., 2011). Manje diferencijalnu rotaciju u maksimumu, a jače diferencijalnu od prosjeka u minimumu aktivnosti dobivaju i Komm et al. (1993b) iz magnetograma s Nacionalnog Observatorija Kitt Peak. Gigolashvili (2001) proučavanjem pjega i filamenata pronalazi da sjeverna polutka rotira brže kod parnih ciklusa, a kod neparnih dominira južna polutka.

Modernim helioseizmološkim mjerenjima uspjelo se proniknuti i ispod površine Sunca. Prva takva mjerenja su poduzeta sredinom 1980-ih godina (Duvall et al., 1984), da bi razvojem i poboljšavanjem sofisticiranih metoda inverzije kao i metoda opažanja, krajem 1990-ih doživjele pravi procvat. Schou et al. (1998) su poduzeli detaljnu analizu profila rotacije s dubinom, prema podacima Michelson Doppler Imager (MDI) instrumenta sa satelita SOHO, koristeći nekoliko različitih tehnika analize. Rezultati potvrđuju prijašnja mjerenja (Thompson et al., 1996; Kosovichev et al., 1997) koja pokazuju da je diferencijalna rotacija prisutna u gotovo cijeloj konvektivnoj zoni te prelazi u rotaciju poput krutog tijela u jezgri. Jednaki rezultati se dobijaju i helioseizmološkim analizama Dopplerovskih mjerenja mreže Global Oscillation Network Group (GONG; Howe et al., 2000b; slika 1.3). Tanak sloj posmaka pri dnu konvektivske zone ( $\sim 0.7R_{\odot}$ ) gdje diferencijalna rotacija prelazi u rotaciju poput krutog tijela i koji je odgovoran za generiranje toroidal-

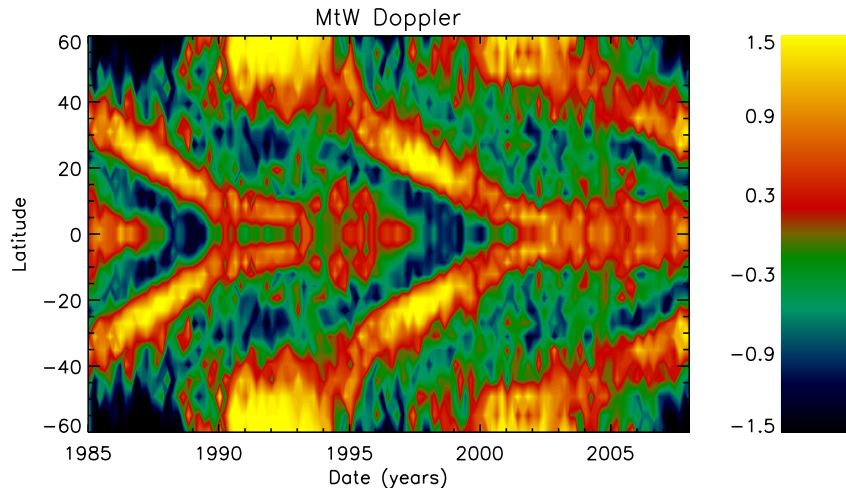
nog magnetskog polja, prozvan je *tahoklina* (Spiegel i Zahn, 1992). Također je pronađen sličan sloj brže rotacije blizu površine ( $\sim 0.95R_{\odot}$ ) koji može objasniti opažene veće brzine pjega od Sunčeve plazme na površini.

### 1.2.2. Torzione oscilacije

Osim evolucijskog gubitka momenta količine gibanja zbog magnetskog kočenja (Guinan i Engle, 2009), Sunce također pokazuje promjene rotacije i na kraćim vremenskim skalama. Iz spektroskopskih podataka Opservatorija Mount Wilson, Howard i Labonte (1980) pronalaze valovite periodične varijacije diferencijalne rotacije - tzv. *torzione oscilacije*: naizmjenične brze i spore zone po latitudi koje migriraju prema ekvatoru u skladu s ciklusom Sunčeve aktivnosti. Na heliografskim širinama ispod  $\pm 40^{\circ}$ , zone putuju prema ekvatoru i imaju širinu oko  $15^{\circ}$ , a brzine se kreću oko  $5 - 10 \text{ m s}^{-1}$ . Howe et al. (2000a) pokazuju helioseizmičkim mjerenjima da se iste varijacije pojavljuju i dublje u konvektivnoj zoni, a ne samo na površini (slika 1.4). Gilman i Howard (1984a) pokazuju da varijacije brzine rotacije od oko  $0.1^{\circ}$  po danu prate ciklus aktivnosti te da cijela površina Sunca polagano ubrzava i usporava, s najvećom brzinom rotacije u vrijeme minimuma i maksimuma aktivnosti. Komm et al. (1993c) pronalaze torzione oscilacije i u gibanjima magnetskih elemenata na magnetogramima s Opservatorija Kitt Peak koji općenito odgovaraju Dopplerovskim mjerenjima. Međutim, u odnosu na Dopplerovske, izmjerene brzine su veće za faktor 1.5, nešto su bliže ekvatoru te prethode Dopplerovskim oscilacijama dvije godine. Autori pretpostavljaju da do razlike dolazi zbog različite dubine u kojoj su ukorijenjeni indikatori oscilacija. Gibanja koroninih svijetlih točaka isto su u skladu s torzionim oscilacijama (Vršnak et al., 2003).

### 1.2.3. Meridijanska gibanja

Dosadašnja proučavanja meridijanskih gibanja daju raznolike rezultate, kvalitativno i kvantitativno. Analizom grupa pjega s Opservatorija Mount Wilson, Howard i Gilman (1986) su opazili da je za niže heliografske širine ( $\psi < \pm 15^{\circ}$ ) meridijanski tok negativan tj. prema ekvatoru i reda veličine oko  $0.02^{\circ} \text{ dan}^{-1}$ . Na višim širinama tok je prema polovima s mogućim nagovještajem da na još višim širinama ponovno mijenja smjer. Wöhl i Brajša (2001) su proučavali meridijanska gibanja stabilnih povratnih (rekurentnih) grupa pjega te su također opazili srednji tok iste magnitude kao Howard i Gilman (1986), usmjeren prema ekvatoru na nižim širinama, a prema polovima na širinama višim od srednje širine pjega za opažani period, tzv. širine središta aktivnosti. Međutim, njihovi podaci nisu dali nikakve indikacije promjene smjera na još višim širinama zbog slabe zastupljenosti pjega u tim područjima. Proučavanjem pjega sa crteža Japanskog Nacionalnog Astronomskog

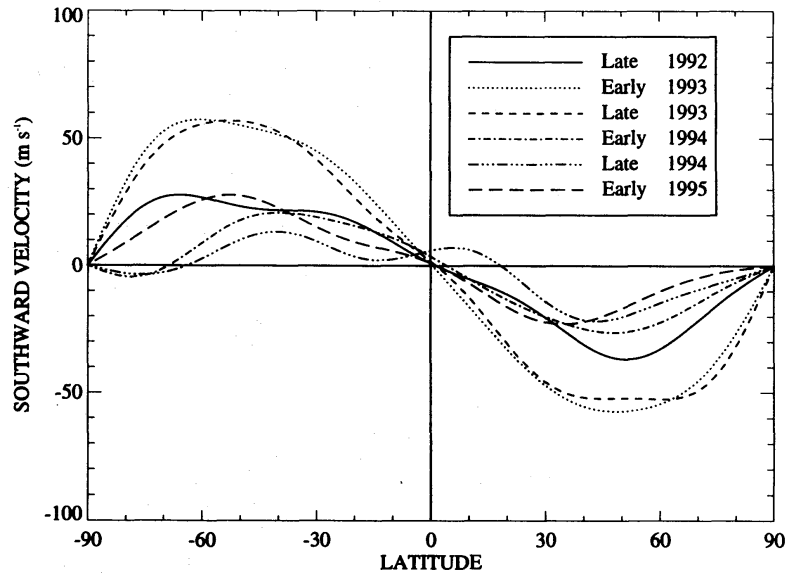


**Slika 1.4.:** Ovisnost torzionih oscilacija (zonskih tokova) iz Dopplerovskih mjerenja s Opservatorija Mount Wilson o vremenu i heliografskoj širini. Mjerna skala je u nHz (prema Howe, 2009).

Opservatorija iz perioda 1954.-1986., Kambry et al. (1991) zapažaju da je meridijanski tok usmjeren prema ekvatoru za širine u rasponu od  $-20^\circ$  do  $15^\circ$ . Također pronalaze indicacije da meridijanski tok ovisi o fazi ciklusa aktivnosti. Howard (1991a, 1996) zaključuje da se grupe pjega udaljavaju od srednje širine aktivnosti dok joj se kromosferske baklje približavaju.

Mjerenjem Dopplerovog pomaka spektralnih linija, Duvall (1979) je opazio približno konstantan tok prema polovima reda veličine  $20 \text{ m s}^{-1}$  u cijelom području promatranih heliografskih širina ( $10^\circ - 50^\circ$ ). Howard (1979) spominje istu vrijednost, ali samo za više širine. Analizom Dopplerovskih brzina dobivenih instrumentima mreže GONG, Hathaway (1996) zaključuje da je meridijanski tok usmjeren prema polovima na svim širinama s tipičnim brzinama od  $20 \text{ m s}^{-1}$ , ali s povremenim epizodama puno jačih tokova ( $60 \text{ m s}^{-1}$ , slika 1.5). Potpuno suprotno ovome, Pérez Garde et al. (1981) opažaju tok prema ekvatoru brzine  $\approx 20 \text{ m s}^{-1}$ . Lustig i Wöhl (1990) su proučavali meridijanska gibanja plazme pomoću Dopplerovog pomaka u periodu 1982.-1986., pokrivši oko pola ciklusa aktivnosti. Zaključili su da sustavno meridijansko gibanje, ako je uopće prisutno, ne može biti veće od  $10 \text{ m s}^{-1}$  prema Sunčevom ekvatoru, za heliografske širine ispod  $\psi = \pm 35^\circ$  na obje polutke.

Pomoću magnetograma visoke rezolucije snimljenih u periodu 1978.-1990. pomoću NSO Vakuumskog Teleskopa Opservatorija Kitt Peak, Komm et al. (1993a) opažaju polarno usmjereni tok reda veličine  $10 \text{ m s}^{-1}$  na obje polutke. Tok se povećavao u amplitudi od  $0 \text{ m s}^{-1}$  na ekvatoru do maksimuma na srednjim širinama, a zatim bi opet opadao na višim širinama. Zhao i Kosovichev (2004) također opažaju tok prema polovima brzine oko  $20 \text{ m s}^{-1}$ , primjenom vrijeme-udaljenost (eng. time-distance) helioseizmologije. Dodatno



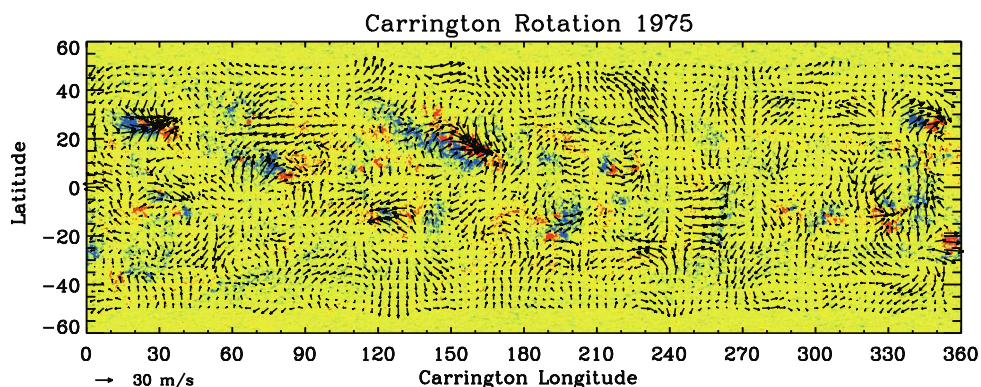
**Slika 1.5.:** Ovisnost brzine meridijanskih gibanja o heliografskoj širini određena iz Dopplerovog pomaka za period 1992.-1995. Pozitivne brzine su prema južnom polu Sunca (prema Hathaway, 1996).

pronalaze meridijanske cirkulacijske ćelije koje konvergiraju prema pojasu aktivnosti na obje polutke.

Očuvanje mase zahtijeva povratni dubinski tok, ali značajno manjeg iznosa od tek  $1 - 2 \text{ m s}^{-1}$  kojemu bi trebalo oko 11 – 12 godina za prijenos tvari sa srednjih širina na ekvator (Nandy, 2004), što se podudara s periodom aktivnosti Sunca. Smatra se da bi on mogao igrati značajnu ulogu u određivanju jakosti i trajanja pojedinog ciklusa aktivnosti (Hathaway i Rightmire, 2010; Dikpati et al., 2010), ali ga je zbog vrlo malih iznosa teško izmjeriti. Zhao et al. (2013) su koristili podatke Helioseismic Magnetic Imager (HMI) instrumenta sa satelita Solar Dynamics Observatory (SDO) te helioseizmološkom analizom pronašli tok prema ekvatoru od  $10 \text{ m s}^{-1}$  na dubini  $0.82 - 0.91R_{\odot}$  te prema polu na još većoj dubini što ukazuje na još jednu moguću cirkulacijsku ćeliju u konvekcijskoj zoni. Ostali pokušaji nisu dali konkretne rezultate (Scherrer et al., 1995; Hathaway i Rightmire, 2010).

#### 1.2.4. Divovske ćelije

Potruga za sistematskim gibanjima na skali od  $\sim 10^8 \text{ m}$  na površini Sunca daje raznolike rezultate. Schröter i Wöhl (1976) pronalaze pravilan uzorak od četiri ćelije razmještene po ekvatoru, opažajući Sunce u liniji ioniziranog kalcija tijekom ljeta 1975. Izmjerali su razlike u brzini do  $80 \text{ m s}^{-1}$  i tokove koji prelaze ekvator. Spektroskopskim mjerenjima Pérez Garde et al. (1981) opažaju nizove ćelija longitudinalne širine oko  $45^\circ$  i brzina



**Slika 1.6.:** Sinoptička karta rezidualnih tokova na dubini 0 – 3 Mm dobivena primjenom time-distance helioseizmologije za Carringtonovu rotaciju no. 1975. Na osi apscisa je heliografska dužina, a na ordinati heliografska širina. Veličine strelica odgovaraju iznosima brzina (prema Zhao i Kosovichev, 2004).

do  $40 \text{ m s}^{-1}$ , a slične veličine ćelija opažaju i Beck et al. (1998). Ulrich (2001) smatra da se radi o Rossbyjevim valovima ili spektru unutrašnjih oscilacija, a ne cirkulacijskim ćelijama (Rossbyjevi valovi su male varijacije visine površine Sunca od  $\sim 100$  metara, prisutne na razmjerima od  $\sim 87000 \text{ km}$ , a odgovaraju oceanskim Rossbyjevim valovima na Zemlji - varijacijama oceanske površine amplitude 5-10 cm koje polagano putuju u smjeru istok-zapad; Chelton i Schlax, 1996; Kuhn et al., 2000).

Napretkom helioseizmologije započinje njena primjena i u mjerenju horizontalnih rezidualnih tokova. Mape gibanja dobivene oduzimanjem doprinosa diferencijalne rotacije i meridijanske cirkulacije, otkrivaju kompleksna evoluirajuća gibanja na raznim skalama (Haber et al., 2002; Zhao i Kosovichev, 2004). Pri površini, tokovi amplitude do  $30 \text{ m s}^{-1}$  konvergiraju prema aktivnim područjima, često kao vrtlozi (slika 1.6). Dublje, na 10 Mm ispod površine, uzorak je suprotan - tokovi divergiraju iz aktivnih područja (Zhao i Kosovichev, 2004).

### 1.2.5. Korelacija azimutalnih i meridijanskih brzina

Koristeći podatke o položajima pjega Opservatorija Greenwich u periodu 1935.-1944., Ward (1965) primjećuje korelaciju meridijanskih i longitudinalnih vlastitih brzina pjega te zaključuje da je ona rezultat Reynoldsove napetosti i pokazuje da je izmjereni iznos dovoljan za održavanje izmjerene diferencijalne rotacije. Belvedere et al. (1976) dobijaju slične rezultate pri analizi gibanja fakula uz iznos kovarijance brzina (horizontalne Reynoldsove napetosti) od  $4 \cdot 10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ , a jednake rezultate navode Schröter i Wöhl (1976). Gilman i Howard (1984b) ponovno mjere korelaciju u gibanjima pjega iz podataka Opservatorija Mount Wilson i za grupe pjega dobivaju iznos od  $2 \cdot 10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  dok je za pojedinačne pjege iznos 3 puta manji, što pripisuju drugačijim karakteristikama pjega. Pulkkinen i

Tuominen (1998a) također koriste pjege, ali iz baze Opservatorija Greenwich uz slične zaključke dok Vršnak et al. (2003) opažaju da korelacija postoji i u gibanjima koroninih svijetlih točaka. S druge strane, Nesme-Ribes et al. (1993) ne pronalaze značajnije korelacije analizom gibanja pjega iz baze Opservatorija Meudon.

Pokušaji određivanja ovisnosti Reynoldsove napetosti s heliografskom širinom većinom daju linearnu ovisnost porasta s mogućim maksimumom na oko  $30^\circ$  i naglim padom na višim širinama, ali s velikom nepouzdanošću (Ward, 1965; Gilman i Howard, 1984b; Pulkkinen i Tuominen, 1998a; Vršnak et al., 2003).

### 1.3. Glavni doprinosi ovog rada

Ovaj rad predstavlja nastavak navedenih istraživanja u cilju boljeg razumijevanja izmjerenih gibanja na Suncu. Počevši sa samim metodama analize, provjerena je točnost postojećih metoda za sinodičko-sideričku korekciju te je prikazana nova poboljšana metoda (Skokić et al., 2014).

Za Sunčeve pjege iz kombinirane baze GPR i SOON/USAF/NOAA za period 1878.-2011. izmjerene su distribucije i korelacije brzina, profili diferencijalne rotacije, meridijske brzine i rezidualne rotacijske brzine te latitudinalni profil Reynoldsove napetosti, ovisno o fazi ciklusa Sunčeve aktivnosti, a napravljena je i usporedba s postojećim mjerenjima i teorijskim modelima (Sudar et al., 2014).

Iz podataka EIT instrumenta satelita SOHO, isto je provedeno za period 1998.-2006., a posebno je napravljena analiza vlastitih gibanja koroninih svijetlih točaka, njihovog srednjeg vremena života, distribucije brzina i koeficijenta difuzije za podatke 1998.-1999. (Brajša et al., 2008).

Također je napravljena analiza preliminarnih podataka o koroninim svijetlim točkama dobivenih instrumentom Atmospheric Imaging Assembly (AIA) sa satelita SDO (Skokić et al., u pripremi). Rezultati su u skladu s GPR/SOON i SOHO/EIT analizama, ali kako ti podaci pokrivaju dio kraćih vremenskih skala (od minute do dana) koje se nadovezuju na prijašnje, bit će potrebno doraditi postojeće metode analize.

## 2. Teorija diferencijalne rotacije

Početak 20. stoljeća smatralo se da je diferencijalna rotacija „fosilni“ ostatak iz vremena stvaranja Sunca tj. da je Sunce zadržalo početni gradijent kutne brzine. Međutim, s vremenom je postalo jasno da pretpostavka fosilne rotacije ne može objasniti održavanje diferencijalne rotacije jer bi turbulentna difuzija u konvekcijskoj zoni za samo nekoliko godina izgladila gradijente i rotaciju učinila kao kod krutog tijela. Došlo se do zaključka da postoji stalan prijenos momenta količine gibanja, usmjeren radijalno unutar konvektivne zone, a meridionalno na površini, koji održava rotaciju diferencijalnom. Lebedinski (1941) pretpostavlja da konvekcija igra veliku ulogu te da mora postojati i nedifuzivni doprinos prijenosu momenta, nazvan  $\Lambda$ -efekt.

U nastavku je teorijski prikaz mehanizma održavanja diferencijalne rotacije, temeljen na jednadžbama mehanike fluida i teorije srednjeg polja (eng. mean-field theory), a u tom mehanizmu jednu od glavnih uloga igra Reynoldsova napetost. Prikaz se temelji na dosadašnjem razvoju teorije diferencijalne rotacije i modeliranja turbulencije (Durney, 1976; Schmidt, 1982; Schmidt i Stix, 1983; Rüdiger, 1989; Durney, 1993; Stix, 2004; Miesch, 2005).

### 2.1. Reynoldsova dekompozicija

Sunčeva plazma u konvekcijskoj zoni je u stanju turbulencije. Matematički opis turbulentnih gibanja vrlo je složen jer su promjene osobina fluida poput tlaka i brzine kaotične, a njihovo numeričko praćenje je procesorski vrlo zahtjevno. Da bi se pojednostavio opis takvih gibanja, koristi se Reynoldsova dekompozicija kojom se neka funkcija  $\mathbf{u}$  razlaže na zbroj usrednjenog dijela  $\langle \mathbf{u} \rangle$  i fluktuacije  $\mathbf{u}'$  (Reynolds, 1895):

$$\mathbf{u} = \langle \mathbf{u} \rangle + \mathbf{u}'. \quad (2.1)$$



Pri tome, dvije funkcije  $\mathbf{u}$  i  $\mathbf{v}$  moraju zadovoljavati tzv. Reynoldsova pravila:

$$\langle \mathbf{u} + \mathbf{v} \rangle = \langle \mathbf{u} \rangle + \langle \mathbf{v} \rangle, \quad (2.2)$$

$$\langle \mathbf{u}\langle \mathbf{v} \rangle \rangle = \langle \mathbf{u} \rangle \langle \mathbf{v} \rangle, \quad (2.3)$$

$$\langle c \rangle = c, \quad (2.4)$$

$$\langle \cdot \rangle \text{ komutira s } \nabla, \partial/\partial t, \int dt \quad (2.5)$$

gdje je  $c$  proizvoljna konstanta. Posljedica ovih pravila je  $\langle \mathbf{u}' \rangle = 0$ , tj. da je srednja vrijednost fluktuacije jednaka nuli, te pravila  $\langle \langle \mathbf{u} \rangle \rangle = \langle \mathbf{u} \rangle$ ,  $\langle \mathbf{u}'\langle \mathbf{v} \rangle \rangle = 0$  i  $\langle \mathbf{u}\mathbf{v} \rangle = \langle \mathbf{u} \rangle \langle \mathbf{v} \rangle + \langle \mathbf{u}'\mathbf{v}' \rangle$ . Funkcija  $\mathbf{u}$  je proizvoljna funkcija položaja  $\mathbf{r}$  i vremena  $t$ . Usrednjavanje se može vršiti po skupu (eng. ensemble) velikog broja kopija istovrsnih sustava ili po  $\mathbf{r}$  ili  $t$ . Kod proučavanja gibanja velikih razmjera na Suncu, usrednjavanje je prostorno po longitudi  $\phi$ :

$$\langle \mathbf{u} \rangle = \frac{1}{2\pi} \int \mathbf{u} d\phi. \quad (2.6)$$

Takvo usrednjavanje rezultira osno-simetričnim gibanjima. Ova pravila definiraju proces dekompozicije turbulentnog gibanja na usrednjeni (ustaljeni) tok te fluktuirajući (perturbirajući) tok.

## 2.2. Prijenos momenta količine gibanja

Pri opisu gibanja Sunčeve plazme polazimo od jednadžbe očuvanja mase (jednadžbe kontinuiteta)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2.7)$$

i jednadžbe očuvanja količine gibanja, tj. Navier-Stokesove jednadžbe

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p - \rho \mathbf{g} - 2\rho \boldsymbol{\Omega}_0 \times \mathbf{v} + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \nabla \cdot \mathcal{D}, \quad (2.8)$$

gdje  $\mathbf{v}$  predstavlja ukupnu brzinu plazme,  $\rho$  je gustoća plazme,  $p$  je tlak,  $\mathbf{g}$  gravitacijsko ubrzanje,  $\boldsymbol{\Omega}_0$  je kutna brzina rotacije referentnog sustava (u ovom slučaju Sunca),  $\mathbf{B}$  je magnetska indukcija (u nastavku „magnetsko polje“), a  $\mathcal{D}$  je tenzor viskozne napetosti. U konvektivnoj zoni Sunca, plazma posjeduje mali Machov broj (omjer brzine prema brzini zvuka), tj. kinetička energija konvekcije je relativno mala prema unutrašnjoj energiji plazme. U takvom slučaju možemo zanemariti vremenske promjene gustoće te termodinamičke veličine promatrati kao poremećaje prema sferno-simetričnom pozadinskom stanju. Takvo približenje zovemo anelastično (eng. anelastic approximation), a u

njemu jednadžba (2.7) glasi:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0. \quad (2.9)$$

Strogo uzevši, na malim skalama anelastično približenje ne vrijedi jer promjene gustoće pogone konvekciju, ali na većim razmjerima gdje se promatraju usrednjena gibanja, ono je opravdano.

Moment količine gibanja definiran je kao:

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}, \quad (2.10)$$

gdje je  $\mathbf{r}$  krak, a  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$  količina gibanja. Za djelić plazme Sunca, moment količine gibanja po jedinici mase,  $\mathcal{L}$ , iznosi:

$$\mathcal{L} = r \sin \theta (\Omega_0 r \sin \theta + \langle v_\phi \rangle) = s^2 \Omega, \quad (2.11)$$

gdje je krak  $s$  definiran kao  $s = r \sin \theta$ . Usrednjavanjem zonske komponente jednadžbe (2.8) po longitudi Reynoldsovom dekompozicijom, množenjem s krakom  $s$  te upotrebom izraza (2.9), dobije se jednadžba očuvanja momenta količine gibanja (Miesch, 2005):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathcal{L}) = -\nabla \cdot (\mathbf{F}^{\text{MC}} + \mathbf{F}^{\text{RS}} + \mathbf{F}^{\text{VD}} + \mathbf{F}^{\text{MS}} + \mathbf{F}^{\text{MT}}), \quad (2.12)$$

pri čemu su na desnoj strani jednadžbe doprinosi ukupnom toku momenta od meridijanskog gibanja  $\mathbf{F}^{\text{MC}}$ , Reynoldsove napetosti  $\mathbf{F}^{\text{RS}}$ , viskozne difuzije  $\mathbf{F}^{\text{VD}}$ , Maxwelllove napetosti  $\mathbf{F}^{\text{MS}}$  i srednjeg magnetskog polja  $\mathbf{F}^{\text{MT}}$ . U nastavku ćemo pogledati svaki doprinos pojedinačno.

## 2.3. Meridijanska cirkulacija

Prvi član u jednadžbi (2.12) predstavlja advekciju momenta količine gibanja od strane srednjeg meridijanskog gibanja

$$\mathbf{F}^{\text{MC}} = \rho \langle \mathbf{v}_m \rangle \mathcal{L} = \rho \langle \mathbf{v}_m \rangle s^2 \Omega, \quad (2.13)$$

gdje je  $\mathbf{v}_m = v_r \hat{\mathbf{r}} + v_\theta \hat{\boldsymbol{\theta}}$  brzina meridijanskog toka. Meridijanska cirkulacija utječe na profil rotacije preko Coriolisove sile,  $-2m\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}$  (zadnji desni član u izrazu (2.13)), koja zakreće meridijanska gibanja u azimutalnom smjeru (i obrnuto). Ako zanemarimo ostale mehanizme transporta momenta količine gibanja tada meridijanska cirkulacija ima tendenciju ubrzavanja polarnih područja i unutrašnjosti, što očito nije slučaj kod Sunca te mora postojati i neki drugi mehanizam. Meridijanska cirkulacija također može nastati

zbog razlike u termodinamičkim veličinama ovisno o latitudi (npr. razlike u temperaturi na polu i ekvatoru).

## 2.4. Reynoldsova napetost

Smatra se da najveći utjecaj u održavanju diferencijalne rotacije Sunca ima Reynoldsova napetost,  $\mathbf{F}^{\text{RS}}$ . Ona predstavlja doprinos prijenosu momenta količine gibanja od strane konvektivnih turbulentnih gibanja. Naime, rotacija, Coriolisova sila, magnetsko polje, stratifikacija i ostale pojave unose neizotropnost u takva gibanja koja se očituje kao korelacija fluktuirajućih komponenti brzina:

$$\mathbf{F}^{\text{RS}} = \rho s \left( \langle v'_r v'_\phi \rangle \hat{\mathbf{r}} + \langle v'_\theta v'_\phi \rangle \hat{\boldsymbol{\theta}} \right). \quad (2.14)$$

Kovarijance  $Q_{r\phi} = \langle v'_r v'_\phi \rangle$  i  $Q_{\theta\phi} = \langle v'_\theta v'_\phi \rangle$  predstavljaju Reynoldsovu napetost u radijalnom i horizontalnom smjeru. Ako u jednadžbi očuvanja momenta količine gibanja (2.12) ostavimo samo doprinose od meridijanskih gibanja i Reynoldsove napetosti, dobivamo:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho s^2 \Omega) + \nabla \cdot (\rho s^2 \Omega \mathbf{v}_m + \rho s \langle v'_\phi \mathbf{v}'_m \rangle) = 0. \quad (2.15)$$

Da bi se jednadžba (2.15) mogla riješiti, potrebno je modelirati Reynoldsovu napetost preko srednjih brzina, a ne fluktuirajućih (eng. closure problem). J. V. Boussinesq je 1887. predložio model Reynoldsove napetosti preko vrtložne viskoznosti:

$$(Q_{r\phi}, Q_{\theta\phi}) = -\nu_t s \nabla \Omega, \quad (2.16)$$

gdje je  $\nu_t$  koeficijent vrtložne viskoznosti ili turbulentne difuzije. Time se Reynoldsova napetost modelira kao zaglađujući difuzivni efekt turbulencije na gradijente u gibanjima velikih razmjera. Ako bi doprinos održavanju diferencijalne rotacije dolazio samo od takve difuzivne Reynoldsove napetosti, rotacija bi postala poput krutog tijela u roku nekoliko godina. Očito model treba proširiti i nedifuzivnim dijelom (Rüdiger, 1980):

$$Q_{r\phi} = -\nu_r r \sin \theta \frac{\partial \Omega}{\partial r} + \Lambda_r \sin \theta \Omega, \quad (2.17)$$

$$Q_{\theta\phi} = -\nu_h \sin \theta \frac{\partial \Omega}{\partial \theta} + \Lambda_h \cos \theta \Omega. \quad (2.18)$$

Dodatni nedifuzivni dio se zove  $\Lambda$ -efekt, a opisan je parametrima  $\Lambda_r$  za radijalni i  $\Lambda_h$  za horizontalni smjer, te koeficijentima vrtložne viskoznosti  $\nu_r$  i  $\nu_h$ , koji općenito imaju različite vrijednosti u radijalnom i horizontalnom smjeru pa ih se još naziva neizotropnom

viskoznošću (eng. anisotropic viscosity).  $\Lambda$  parametri bi trebali prikazivati korelacije flukuirajućih brzina induciranih Coriolisovom silom i mogu biti funkcije radijusa, latitude i brzine rotacije. Specifikacijom  $\Lambda$  parametara, koeficijenta neizotropne viskoznosti i meridijanske rotacije, jednadžba (2.15) se može numerički riješiti da bi se dobio ravnotežni profil rotacije.

## 2.5. Magnetsko polje i Maxwellova napetost

Magnetsko polje na Suncu može utjecati na profil rotacije na dva načina: smanjujući utjecaj Reynoldsove napetosti time što guši konvekciju ili direktno prenositi moment količine gibanja preko Lorentzove sile. Tok momenta od strane Lorentzove sile rastavljamo na udio koji dolazi od fluktuirajućeg polja  $\mathbf{F}^{\text{MS}}$  i srednjeg (osno-simetričnog) polja  $\mathbf{F}^{\text{MT}}$ . Fluktuirajuća komponenta je poznata kao Maxwellova napetost i uključuje nelinearne korelacije između komponenti polja,  $\langle B'_r B'_\phi \rangle$  i  $\langle B'_\theta B'_\phi \rangle$ :

$$\mathbf{F}^{\text{MS}} = -\frac{s}{\mu_0} \left( \langle B'_r B'_\phi \rangle \hat{\mathbf{r}} + \langle B'_\theta B'_\phi \rangle \hat{\theta} \right). \quad (2.19)$$

Maxwellova napetost može nastati zbog turbulentne konvekcije, valova ili nestabilnosti plazme, isto kao i Reynoldsova napetost. Komponenta toka momenta od srednjeg magnetskog polja dolazi od poloidalnog polja  $\mathbf{B}_m = B_r \hat{\mathbf{r}} + B_\theta \hat{\theta}$  i toroidalnog polja  $B_\phi$ :

$$\mathbf{F}^{\text{MT}} = -\frac{s}{\mu_0} \langle B_\phi \rangle \langle \mathbf{B}_m \rangle. \quad (2.20)$$

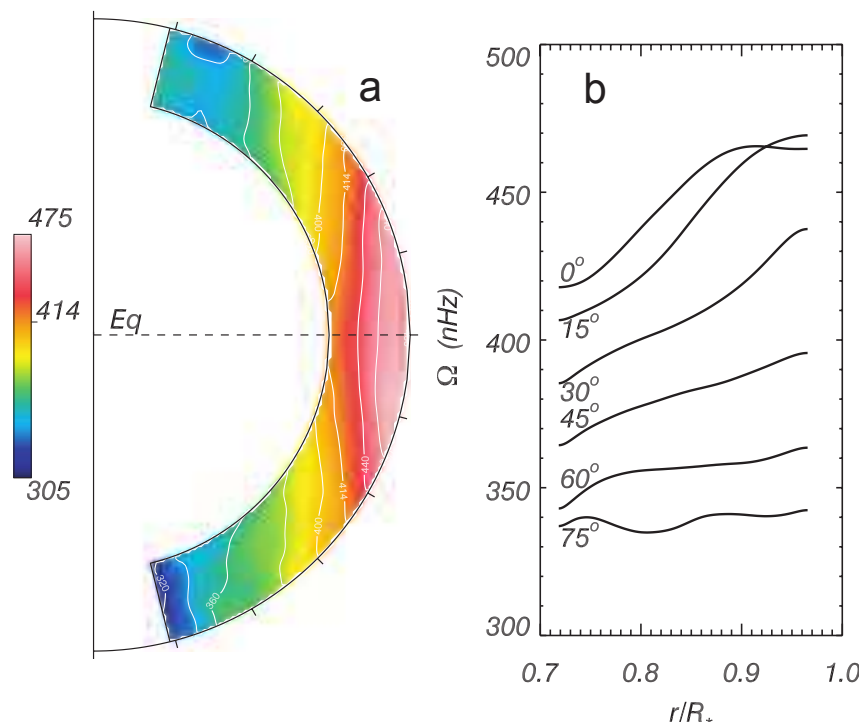
Utjecaj magnetskog polja je da se opire deformacijama u zonalnom smjeru tj. magnetska tenzija smanjuje gradijente kutne brzine i čini rotaciju sličniju rotaciji krutog tijela. Doprinosi prijenosu momenta od magnetskog polja su značajno manji od Reynoldsove napetosti, ali igraju ulogu u modifikaciji meridijanskih gibanja i parametrima ciklusa aktivnosti Sunca, a najvjerojatnije su odgovorni i za torzione oscilacije (Durney, 2000).

## 2.6. Viskoznost

Viskozna difuzija također „izglašava“ gradijente kutne brzine rotacije poput magnetskog polja:

$$\mathbf{F}^{\text{VD}} = -\rho \nu s^2 \nabla \Omega. \quad (2.21)$$

Kako je viskoznost Sunčeve plazme vrlo mala ( $\nu \approx 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ), njen utjecaj na diferencijalnu rotaciju nije velik, a djeluje tako da pokušava dovesti sustav u rotaciju poput krutog tijela.

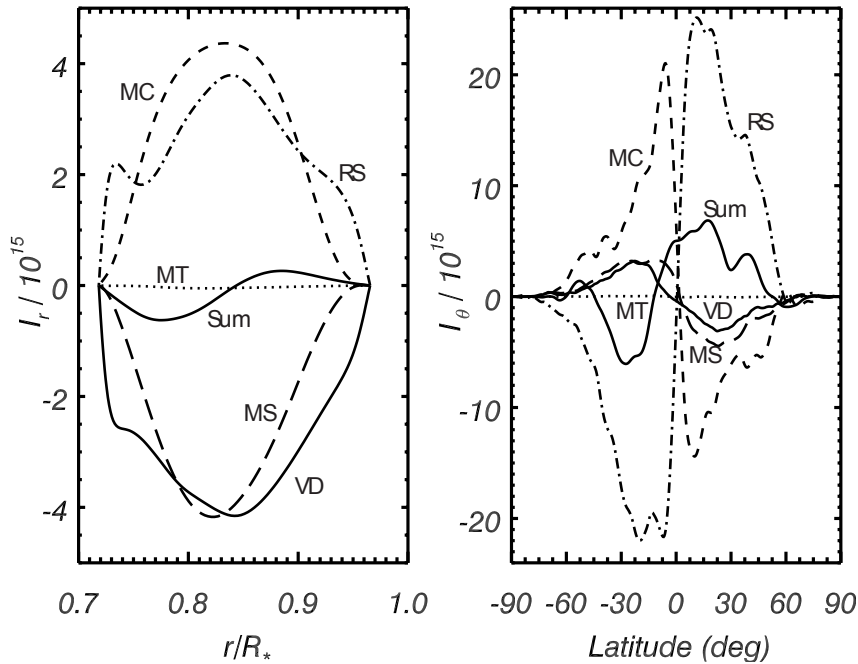


**Slika 2.1.:** Kutna brzina rotacije prema modelu M3 (Brun et al., 2004), usrednjen po longitudi i vremenu, te prikazan u presjeku (a) i kao funkcija radijusa (b) za odabrane heliografske širine (prema Brun et al., 2004).

## 2.7. Što nam govore modeli?

Razvojem super-računala i naprednih tehnika programiranja poput paralelnog procesiranja, moguće je sve detaljnije modelirati i simulirati Sunčevu rotaciju. Prvi jednostavniji modeli se nisu pretjerano slagali s mjerenjima, ali s vremenom su postali sve bolji i složeniji te danas dosta uspješno simuliraju mnoge karakteristike rotacije. Jedan od glavnih problema ovih simulacija je modeliranje turbulentnih konvektivnih gibanja te nelinearnosti i povratni utjecaji polja na plazmu i obrnuto pa ih je potrebno rješavati na samousuglašen način.

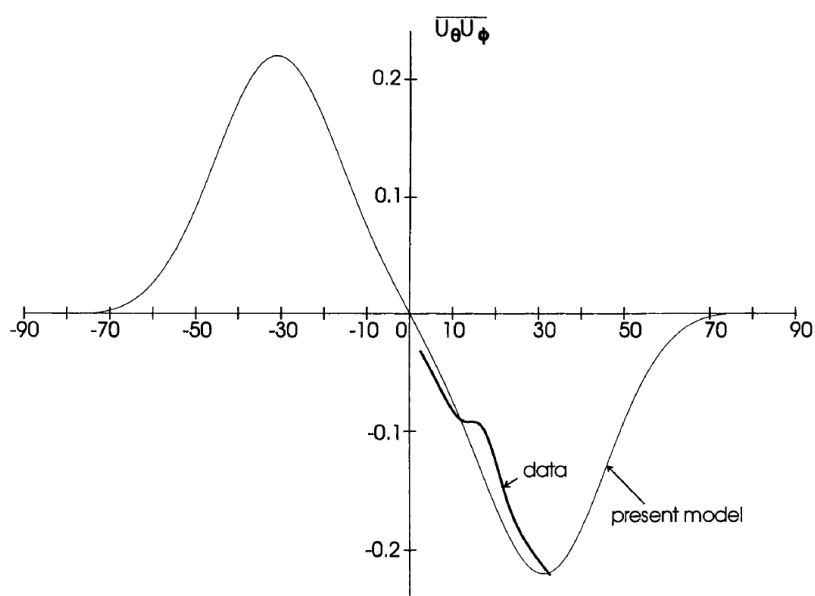
Za primjer uzimamo jedan tipičan rezultat simulacija prema Brun et al. (2004). Na slici 2.1 je prikazan profil kutne brzine rotacije s dubinom i heliografskom širinom. Usporedbom s rezultatima helioseizmoloških mjerenja (slika 1.3) vidi se da su brzine rotacije i ovisnost o širini na površini u skladu s mjerenjima, ali se s dubinom sve više razlikuju od rezultata mjerenja (slika 2.1). Jedan od mogućih uzroka neslaganja bi prema autorima moglo biti izostavljanje tahokline iz modela. Iz slike 2.2 gdje je prikazan tok momenta količine gibanja kao rezultat simulacije, može se zaključiti da konvekcija preko Reynoldsove napetosti uspijeva održati diferencijalnu rotaciju usprkos drugim utjecajima koji je žele izgladiti.



**Slika 2.2.:** Tok momenta količine gibanja za model M3 (Brun et al., 2004), kao funkcija radijusa (a) i heliografske širine (b). Podaci su usrednjeni po vremenu. Različite linije označavaju različite doprinose, a njihov zbroj je označen punom linijom. Tokovi su izraženi u cgs sustavu ( $\text{g s}^{-1}$ ), normalizirani s  $10^{15} r_2^2$  gdje je  $r_2$  polumjer vanjske ljuske (prema Brun et al., 2004).

Canuto et al. (1994) daju vrlo zanimljiv algebarski model Reynoldsove napetosti. Naime, autori pokazuju da je upotreba Boussinesqovog modela Reynoldsove napetosti preko vrtložne viskoznosti gdje je smicanje slojeva srednjeg toka uzrok turbulencije, a time i Reynoldsove napetosti, neadekvatna u slučaju Sunca te okreću uzrok i posljedicu stavljajući uzgon (konvekciju) kao izvor turbulencije, a usrednjeni tok kao posljedicu Reynoldsove napetosti. Uz nekoliko pretpostavki uspijevaju svesti skup od 11 diferencijalnih jednadžbi na samo jednu, preko skupa algebarskih izraza. Pokazuju da smicanje i uzgon sami nisu dovoljni za opis izmjerenih gibanja te da je potrebna nelinearna interakcija između vrtložnosti i uzgona, što ujedno objašnjava  $\Lambda$ -efekt.

Rezultat njihovog modela za horizontalnu komponentu Reynoldsove napetosti prikazan je na slici 2.3. Model je skaliran prema rezultatima mjerenja iz Sunčevih pjega (Gilman i Howard, 1984b). Zanimljivo je da model vrlo uspješno opisuje izmjerenu latitudinalnu ovisnost uz korištenje samo jednog slobodnog parametra čija se vrijednosti podudara s vrijednostima izračunatim iz solarnih modela. Model također predviđa minimum Reynoldsove napetosti na oko  $30^\circ$  širine te odnos vrijednosti anizotropnih viskoznosti od 1.3 što je u skladu s mjerenjima.



**Slika 2.3.:** Rezultat algebarskog modela Reynoldsove napetosti u usporedbi s rezultatima mjerenja iz Sunčevih pjega (Gilman i Howard, 1984b). Vrijednosti na  $y$ -osi su skalirane prema mjerenjima (prema Canuto et al., 1994).

## 3. Metode

Gibanja na Suncu određuju se raznim tehnikama: praćenjem pojedinih pojava u atmosferi Sunca, korelacijskim tehnikama, mjerenjem Dopplerovog pomaka i helioseizmološkim metodama (Meunier i Zhao, 2009). Različite metode osjetljive su na različite dubine i skale gibanja u Sunčevoj atmosferi pa se i rezultati mogu razlikovati ovisno o upotrebnoj metodi. Ovdje ćemo se ograničiti na površinska rotacijska i meridijanska gibanja velikih razmjera, te na metodu praćenja pomaka objekata (grupa pjega i malih svijetlih koroninih struktura) u atmosferi Sunca.

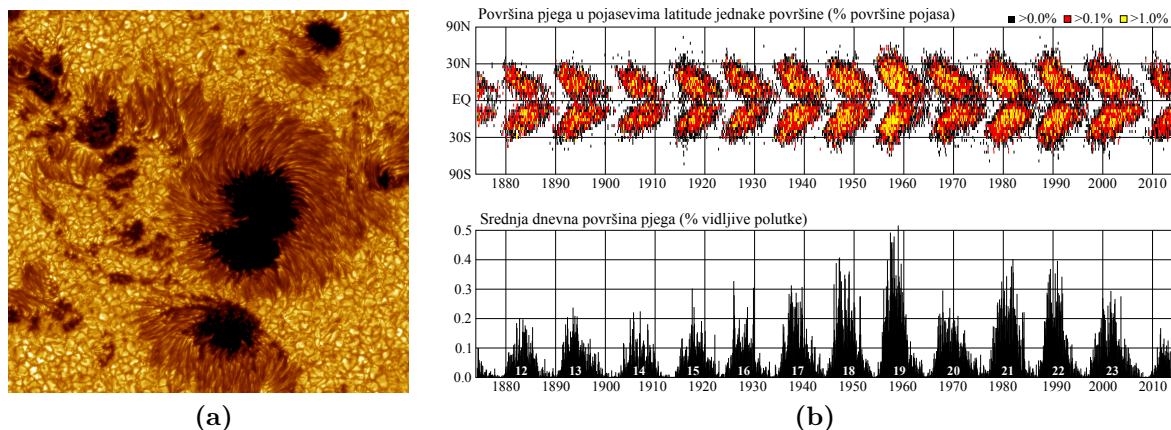
### 3.1. Objekti i strukture praćenja

Za mjerenje polja brzina i profila rotacije Sunca koriste se razni objekti, počevši sa Sunčevim pjegama, filamentima te fotosferskim i kromosferskim bakljama, preko struktura vidljivih u pojedinim spektralnim linijama (najčešće  $H\alpha$  i  $Ca II$ ), svijetlim područjima slabog i jakog intenziteta u milimetarskom području spektra zračenja, pa sve do koroninih svijetlih točaka i šupljina vidljivih u dalekom ultraljubičastom i rentgenskom području. Pjege su najčešće korišteni objekti zbog odlične vidljivosti u optičkom dijelu spektra i sustavnog praćenja dužeg od stoljeća. Koronine svijetle točke su vidljive u dalekom ultraljubičastom i rentgenskom dijelu spektra, otkrivene su puno kasnije (1969. snimanjima i mjerenjima zračenja Sunca visinskim raketama) jer je Zemljina atmosfera neprozirna za taj dio spektra, a za razliku od pjega prisutne su po cijeloj površini Sunca. U ovom radu koriste se upravo te dvije vrste struktura za mjerenje gibanja velikih razmjera.

#### 3.1.1. Sunčeve pjege

Sunčeve pjege su tamna područja vidljiva u bijeloj svjetlosti u fotosferi (slika 3.1a). Imaju širok raspon dimenzija od  $\sim 100$  kilometara (tzv. pore) pa do preko 100 Mm. Otkriće se pripisuje T. Harriotu, ocu i sinu J. i D. Fabriciusu, G. Galileju i C. Scheineru oko 1610.-1611., iako su povremeno opažane golim okom i puno ranije. Pjege su područja pojačane magnetske aktivnosti gdje magnetske cijevi u obliku petlji izbijaju na površinu stvarajući bipolarna aktivna područja. Zbog toga se najčešće javljaju u bipolarnim grupama, ali se



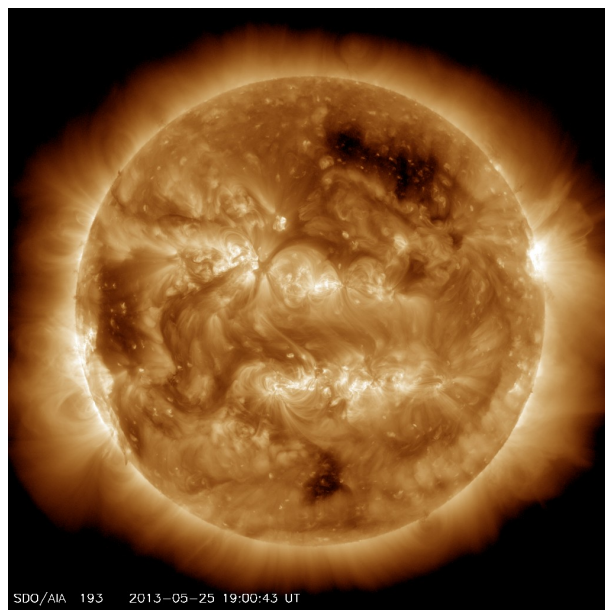


**Slika 3.1.:** (a) Grupa Sunčevih pjega snimljena Švedskim Solarnim Teleskopom 15. srpnja 2002. (b) Latitudinalna rasprostranjenost i dnevna površina pjega usrednjena po pojedinim rotacijama Sunca (ljubaznošću Kraljevske Švedske Akademije Znanosti i D. Hathaway/NASA/MSFC 2013/11).

također mogu pojaviti i kao pojedinačne pjege. Jako magnetsko polje od 0.1 – 0.4 T guši konvekciju zbog čega je temperatura unutar pjege manja od okoline za oko 1500 K i zato ih vidimo kao tamna područja na svjetlijoj fotosferi.

Tipično vrijeme života im je od nekoliko dana do nekoliko tjedana pa čak i mjeseci. U tom periodu evoluiraju, od početnih manjih pjega i pora prerastaju u velike pjege i grupe pjega kojima obično dominiraju dvije velike pjege, a tada polagano nestaju prvo manje pjege, a na kraju i preostale velike. Zürich-ška klasifikacija pjega upravo je zasnovana na evolucijskoj promjeni karakteristika, a razne faze se označavaju velikim štampanim slovima od A do I, što je uveo M. Waldmeier 1940-ih godina. Veće pjege se obično sastoje od sjene (umbre) gdje je magnetsko polje okomito na površinu Sunca i polusjene (penumbre) gdje su magnetske silnice pod nekim manjim kutom prema površini.

Pjege se javljaju u području heliografskih širina od  $\pm(5^\circ - 40^\circ)$ , u skladu s 11-godišnjim ciklusom aktivnosti Sunca, ocrtavajući pritom oblik leptirovih krila po latitudi (Maunderov leptir-dijagram, slika 3.1b). U vrijeme minimuma aktivnosti zna proći i po više dana bez ijedne vidljive pjege, a u periodu 1645.-1715. ih je opažen izuzetno mali broj (Maunderov minimum). Prednosti pjega u određivanju karakteristika rotacije su u sustavnom praćenju od oko 150 godina, dugom vremenu života, te u odnosu na spektroskopske metode što daju obje komponente brzine, a glavni nedostaci su relativno mali broj, jaka ovisnost broja o ciklusu aktivnosti, slaba rasprostranjenost po Suncu, složena i varijabilna struktura te vlastito gibanje (Schröter, 1985).



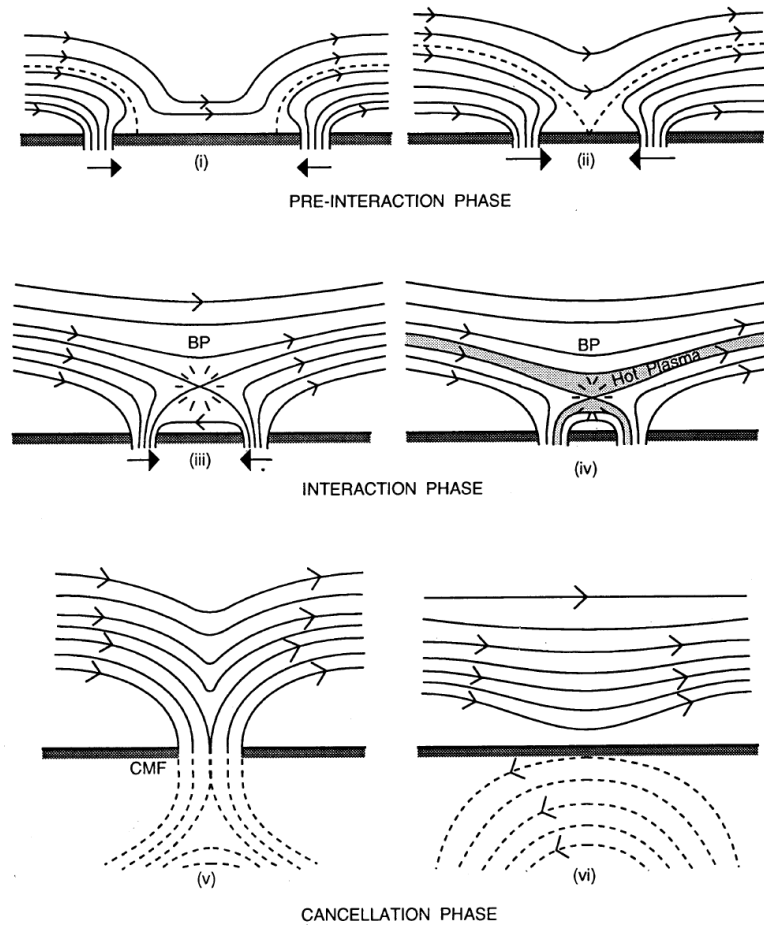
**Slika 3.2.:** Koronine svijetle točke na slici Sunca sa satelita SDO, snimljene instrumentom AIA s 19.3 nm filterom, 25. svibnja 2013. (ljubaznošću NASA/SDO).

### 3.1.2. Koronine svijetle točke

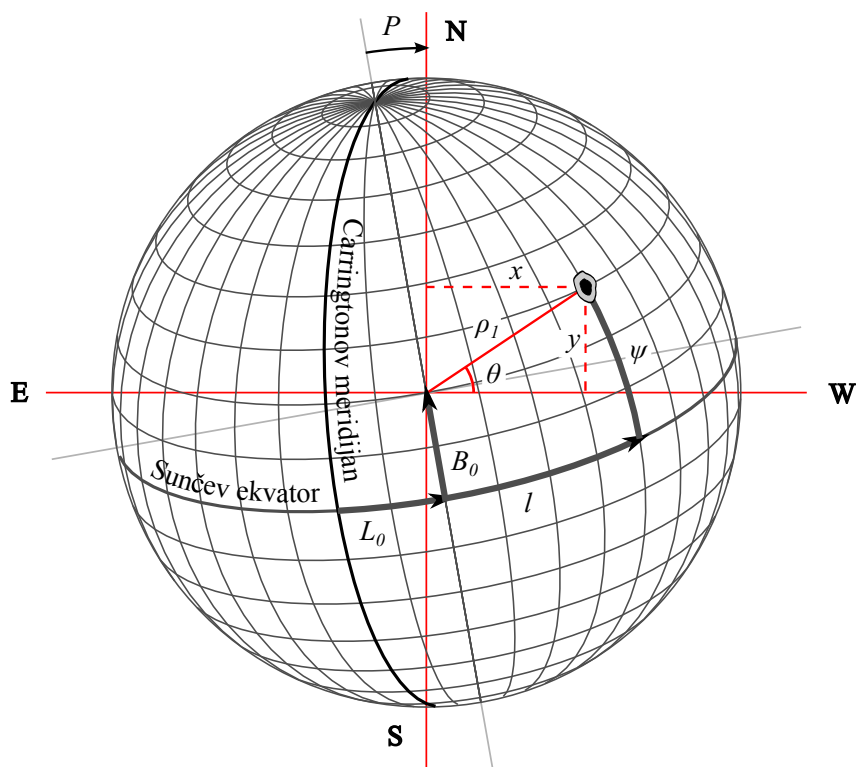
Koronine svijetle točke su manje magnetske strukture u niskoj koroni (8000-12000 km iznad fotosfere; Brajša et al., 2004), vidljive u dalekom ultraljubičastom i rentgenskom dijelu spektra (slika 3.2). Sjajnije su od okolne plazme, s temperaturom od oko  $2 \times 10^6$  K i gustoćom od  $\sim 5 \times 10^9$  g cm<sup>-3</sup>. Uglavnom se pojavljuju iznad novonastajućih bipolarnih područja i poništavajućih magnetskih struktura (Harvey-Angle, 1993). Vrijeme života im varira od nekoliko sati do nekoliko dana, a često pokazuju složenu strukturu u obliku malih petlji. U jednom danu ih se može vidjeti od par stotina do preko tisuću na snimkama Sunca, a pojavljuju se u svim područjima, od ekvatorskih do polarnih.

Prema modelu konvergirajućeg toka (Priest et al., 1994), svijetle točke nastaju pri interakciji dva magnetska područja suprotnog polariteta (slika 3.3). U prvoj fazi predinterakcije, dva magnetska područja se približavaju i stvaraju se neutralne strujne plohe, tzv. nul-točke. U idućoj, interakcijskoj fazi, nul-točka se uzdiže u koronu kao svijetla točka gdje magnetsko prespajanje uzrokuje brzu promjenu sjaja i kreiranje vrućih petlji. U zadnjoj, poništavajućoj fazi, magnetska područja dolaze u kontakt i fotosfersko prespajanje konačno uzrokuje slabljenje magnetskog polja i nestanak svijetle točke.

Prednosti koroninih svijetlih točaka u mjerenju gibanja na Suncu su velik broj i ravnomjernija rasprostranjenost, manja ovisnost njihovog broja o fazi ciklusa aktivnosti, a nedostaci u relativno kratkom vremenu života te složenoj i dinamičkoj strukturi.



**Slika 3.3.:** Faze nastanka koroninih svijetlih točaka prema modelu konvergirajućeg toka. Približavanje i interakcija dva magnetska područja suprotnog polariteta pri čemu nastaje nul-točka (i) i (ii). Nul-točka se uzdiže u koronu kao svijetla točka (iii) i nastaju vruće petlje (iv). Fotosfersko prespajanje konačno uzrokuje opadanje jakosti magnet-skog polja (v) i (vi) (prema Priest et al., 1994).



**Slika 3.4.:** Heliografski koordinatni sustav (crno) s ucrtanim helioprojektivnim sustavom (crveno).

## 3.2. Određivanje položaja objekata na Suncu

Postoji više koordinatnih sustava za opis položaja objekata na Suncu (Waldmeier, 1955; Thompson, 2006). Najčešće se koristi heliografski sustav, sferni sustav definiran s obzirom na Sunčevu os rotacije, s duljinom  $\phi$  koja se mjeri od početnog ili Carringtonovog meridijana u smjeru zapadnog ruba, te širinom  $\psi$  koja se mjeri od Sunčevog ekvatora i pozitivna je prema sjeveru. Položaj osi rotacije Sunca s obzirom na ekliptiku iskazuje se inklinacijom  $i$  i longitudom uzlaznog čvora Sunčevog ekvatora  $\Omega$ , dok se prema ekvatorskom nebeskom sustavu iskazuje heliografskim koordinatama središta Sunčevog diska,  $B_0$  i  $L_0$  te pozicijskim kutem  $P$  koji predstavlja kut između sjevernog pola Sunca i sjevernog nebeskog pola (slika 3.4).

Položaji objekata na Suncu se obično određuju iz snimaka. Na snimci je Sunce predstavljeno kao disk i izmjereni položaj objekta potrebno je pretvoriti u heliografske koordinate. Označimo sa  $\rho_1$  kutnu udaljenost objekta od središta Sunčeva diska, a sa  $\theta$  pozicijski kut koji se mjeri u suprotnom smjeru od kazaljke na satu od satne kružnice na nebeskoj sferi koja prolazi središtem Sunčeva diska. Ove koordinate su povezane s pravokutnim koordinatama  $x$  i  $y$ , normaliziranim na polumjer diska, preko relacija (Roša et al., 1995b,

1998):

$$\rho_1 = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad x = \rho_1 \sin \theta, \quad y = \rho_1 \cos \theta, \quad (3.1)$$

pri čemu je referentna ravnina okomita na liniju promatranja,  $x$  os je u smjeru istoka, a  $y$  os u smjeru  $\theta = 0$ . Ako u heliografskom sustavu kutnu udaljenost objekta od središnjeg meridijana označimo sa  $l$ , a sa  $\rho$  označimo kutnu udaljenost objekta od pravca prema Zemlji, tada vrijede relacije:

$$\sin \psi = \sin B_0 \cos \rho + \cos B_0 \sin \rho \cos(P - \theta), \quad (3.2)$$

$$\cos \psi \sin l = \sin \rho \sin(P - \theta), \quad (3.3)$$

$$\cos \rho = \sin B_0 \sin \psi + \cos B_0 \cos \psi \cos l. \quad (3.4)$$

Kut  $\rho$  se može odrediti iz izraza:

$$\sin(\rho + \rho_1) = \frac{D}{R_\odot} \sin \rho_1, \quad (3.5)$$

gdje je  $R_\odot$  polumjer Sunca, a  $D$  udaljenost Zemlje (promatrača) od Sunca. Heliografska dužina se dobije iz udaljenosti od središnjeg meridijana:

$$\phi = l + L_0. \quad (3.6)$$

Kutevi  $P$ ,  $B_0$  i  $L_0$  (tzv. fizikalne efemeride Sunca) su izlistani u astronomskim godišnjacima za pojedini dan u godini, tablično na efemeridnim web servisima poput Jet Propulsion Laboratory Horizons (JPL Horizons) sustava<sup>1</sup> i Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE) sustava<sup>2</sup> ili se mogu izračunati prema metodi prikazanoj u Meeus (1991).

### 3.3. Profil diferencijalne rotacije

Opažani profil diferencijalne rotacije Sunca obično se prikazuje u obliku:

$$\omega(\psi) = A + B \sin^2 \psi + C \sin^4 \psi \quad (3.7)$$

Parametar  $A$  predstavlja brzinu rotacije na ekvatoru, a  $B$  i  $C$  su diferencijalni parametri koji govore koliko brzina rotacije na nekoj širini odstupa od ekvatorske brzine. Kad se

<sup>1</sup><http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>

<sup>2</sup><http://www.imcce.fr>

parametri rotacije određuju iz pjega i ostalih objekata koji se pojavljuju samo u blizini ekvatora, obično se izostavlja parametar  $C$  čiji se utjecaj vidi tek u višim heliografskim širinama. Parametri se najčešće određuju metodom najmanjih kvadrata, prilagodbom krivulje na rezultate mjerenja.

Problem se javlja zbog toga što sinusne funkcije u jednadžbi (3.7) nisu ortogonalne pa  $B$  i  $C$  parametri nisu međusobno nezavisni (Snodgrass, 1984; Snodgrass i Howard, 1985; Snodgrass i Ulrich, 1990; Stix, 2004). U praksi se to rješava na nekoliko načina:

1. postavljanjem  $C = 0$ ,
2. postavljanjem  $B = kC$ , gdje je  $k$  proizvoljna konstanta (najčešće se uzima  $k = 1$ ),
3. upotrebom Legendreovih polinoma,
4. upotrebom Gegenbauerovih polinoma.

Prva opcija se koristi kad se profil promatra samo na nižim heliografskim širinama, a druga je samo zgodna zakrpa. Prva tri parna Legendreova polinoma glase (uz  $x = \sin\psi$ ):

$$P_0 = 1, \quad (3.8)$$

$$P_2 = \frac{1}{2}(3x^2 - 1), \quad (3.9)$$

$$P_4 = \frac{1}{8}(35x^4 - 30x^2 + 3). \quad (3.10)$$

Ako usporedimo razvoj  $\omega = a_0 + a_2P_2(x) + a_4P_4(x)$  s jednadžbom (3.7), dobijemo vezu među koeficijentima:

$$a_0 = A + \frac{1}{3}B + \frac{1}{5}C, \quad (3.11)$$

$$a_2 = \frac{2}{3}B + \frac{4}{7}C, \quad (3.12)$$

$$a_4 = \frac{8}{35}C. \quad (3.13)$$

Legendreovi polinomi su ortogonalni na sferi, ali mi Sunce opažamo u projekciji kao disk. Stoga je još bolje koristiti razvoj preko funkcija koje su ortogonalne na disku (Snodgrass, 1984; Snodgrass i Howard, 1985; Snodgrass i Ulrich, 1990). Takve funkcije su Gegenbauerovi polinomi, generalizacije Legendreovih i Čebišljevih polinoma. Slično kao i kod Legendreovih polinoma, za razvoj uzimamo funkcije:

$$T_0^1 = 1, \quad (3.14)$$

$$T_2^1 = \frac{3}{2}(5x^2 - 1), \quad (3.15)$$

$$T_4^1 = \frac{15}{8}(21x^4 - 14x^2 + 1). \quad (3.16)$$

Usporedbom razvoja oblika  $\omega = \bar{a}_0 + \bar{a}_2 T_2^1(x) + \bar{a}_4 T_4^1(x)$  s jednađbom (3.7) dobijemo odnos koeficijenata:

$$\bar{a}_0 = A + \frac{1}{5}B + \frac{3}{35}C, \quad (3.17)$$

$$\bar{a}_2 = \frac{2}{15}B + \frac{4}{45}C, \quad (3.18)$$

$$\bar{a}_4 = \frac{8}{315}C. \quad (3.19)$$

### 3.4. Određivanje brzina

Kutne brzine se određuju iz dva ili više izmjerenih položaja promatranog objekta na Suncu. Postoji više metoda, npr. metoda uzastopnih prolaza središnjim meridijanom koja se koristi kod dugoživućih povratnih grupa pjega. U ovom radu koristimo metodu dnevnog pomaka (eng. daily-shift method) gdje su uzima razlika dvaju položaja u razmaku jednog dana, te metodu linearne prilagodbe (eng. linear least-squares fit) gdje se više položaja u vremenu prikaže pravcem pomoću metode najmanjih kvadrata. Obje metode pretpostavljaju da se objekt giba jednoliko i pravocrtno u promatranom vremenskom intervalu tj. ako je gibanje kompleksnije, ono će se izglatiti i dati srednju brzinu.

Kod metode dnevnog pomaka, za dva položaja  $(l_0, \psi_0, t_0)$  i  $(l_1, \psi_1, t_1)$  imamo:

$$\omega_{syn} = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{l_1 - l_0}{t_1 - t_0}, \quad (3.20)$$

$$\omega_{mer} = \frac{\Delta \psi}{\Delta t} = \frac{\psi_1 - \psi_0}{t_1 - t_0}, \quad (3.21)$$

gdje je  $\omega_{syn}$  izmjerena (sinodička) kutna brzina rotacije, a  $\omega_{mer}$  izmjerena meridijanska kutna brzina. U slučaju metode linearne prilagodbe, izrazi glase

$$\omega_{syn} = \frac{N \sum_{i=1}^N l_i t_i - \sum_{i=1}^N l_i \sum_{i=1}^N t_i}{N \sum_{i=1}^N t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N t_i \right)^2}, \quad (3.22)$$

$$\omega_{mer} = \frac{N \sum_{i=1}^N \psi_i t_i - \sum_{i=1}^N \psi_i \sum_{i=1}^N t_i}{N \sum_{i=1}^N t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N t_i \right)^2}, \quad (3.23)$$

gdje je  $N$  broj podataka, odnosno izmjerenih položaja za promatrani objekt. Umjesto navedenih izraza za metodu linearne prilagodbe koristile su se gotove funkcije (polyfit)

programskih alata Matlab i Python/NumPy.

### 3.5. Sinodičko-siderička korekcija

Opažani ili sinodički period rotacije Sunca razlikuje se od pravog, sideričkog perioda. Uzrok tome je gibanje Zemlje oko Sunca te je stoga potrebno transformirati izmjerene sinodičke brzine,  $\omega_{syn}$ , u sideričke,  $\omega_{sid}$ . Uobičajeni način je da se sinodičkoj brzini doda srednja vrijednost orbitalne kutne brzine Zemlje,  $\bar{\omega}_{Earth}$  (koja iznosi  $0.9856^\circ \text{ dan}^{-1}$ ):

$$\omega_{sid} = \omega_{syn} + \bar{\omega}_{Earth}. \quad (3.24)$$

Graf (1974) je primijetio da takav postupak unosi sistematsku pogrešku zbog zanemarenja eliptičnosti Zemljine putanje i nagiba Sunčeve osi rotacije prema ravnini ekliptike. Predložio je novu metodu utemeljenu na upotrebi tablica efemerida iz almanaha te dao izraz:

$$\omega_{sid} = \omega_{syn} - \arctan \left[ \frac{\tan(\lambda_0 - \Omega) - \tan(\lambda'_0 - \Omega')}{(\cos i)^{-1} + \cos i \tan(\lambda_0 - \Omega) \tan(\lambda'_0 - \Omega')} \right], \quad (3.25)$$

gdje  $\lambda_0$  predstavlja prividnu longitudu Sunca u odnosu na pravi trenutni ekvinocij,  $\Omega$  je longituda uzlaznog čvora Sunčevog ekvatora prema ekliptici, a  $i$  je nagib Sunčevog ekvatora prema ekliptici (slika 3.5).  $\lambda'_0$  i  $\Omega'$  označavaju vrijednosti istih varijabli 24 sata kasnije. Roša et al. (1995a) poboljšavaju postupak dajući izraze za izračunavanje svih potrebnih parametara bez potrebe za tablicama efemerida te predlažu modifikaciju izraza (3.25):

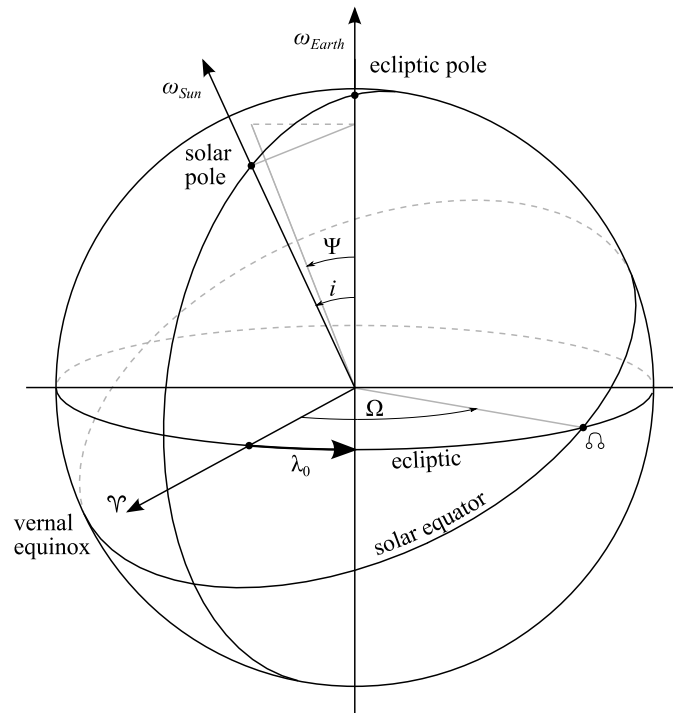
$$\omega_{sid} = \omega_{syn} + \{ \arctan[\cos i \tan(\lambda'_0 - \Omega')] - \arctan[\cos i \tan(\lambda_0 - \Omega)] \}. \quad (3.26)$$

Međutim, dani izrazi imaju dva nedostatka. Prvi nedostatak je u tome da treba biti vrlo pažljiv prilikom izračunavanja arcus funkcija i izbora odgovarajućeg kvadranta jer inače lako dođe do naglih skokova i krivih rezultata (slika 3.6a). Ovaj problem je razmotren u Brajša et al. (2002a). Drugi nedostatak je što je potrebno izračunati sve vrijednosti za dva uzastopna trenutka. Korištenjem 2. Keplerovog zakona, Wittmann (1996) daje jednostavniji izraz za koji je dovoljno poznavanje elemenata samo za traženi trenutak:

$$\omega_{sid} = \omega_{syn} + \omega_{Earth} \cos \Psi, \quad (3.27)$$

gdje je  $\Psi$  kut između ortografskih projekcija vektora kutnih brzina kruženja Zemlje i





**Slika 3.5.:** Prikaz veličina koje definiraju orijentaciju Sunčeve osi rotacije u prostoru i prema Zemlji. Zemlja se nalazi u smjeru čitatelja.

rotacije Sunca na ravninu opažanog diska Sunca, a može se odrediti iz (Very, 1897):

$$\tan \Psi = \tan i \cos(\lambda_0 - \Omega), \quad (3.28)$$

dok se trenutna orbitalna kutna brzina Zemlje s dovoljnom točnošću može izračunati iz 2. Keplerovog zakona:

$$\omega_{Earth} = \frac{\bar{\omega}_{Earth}}{r^2}, \quad (3.29)$$

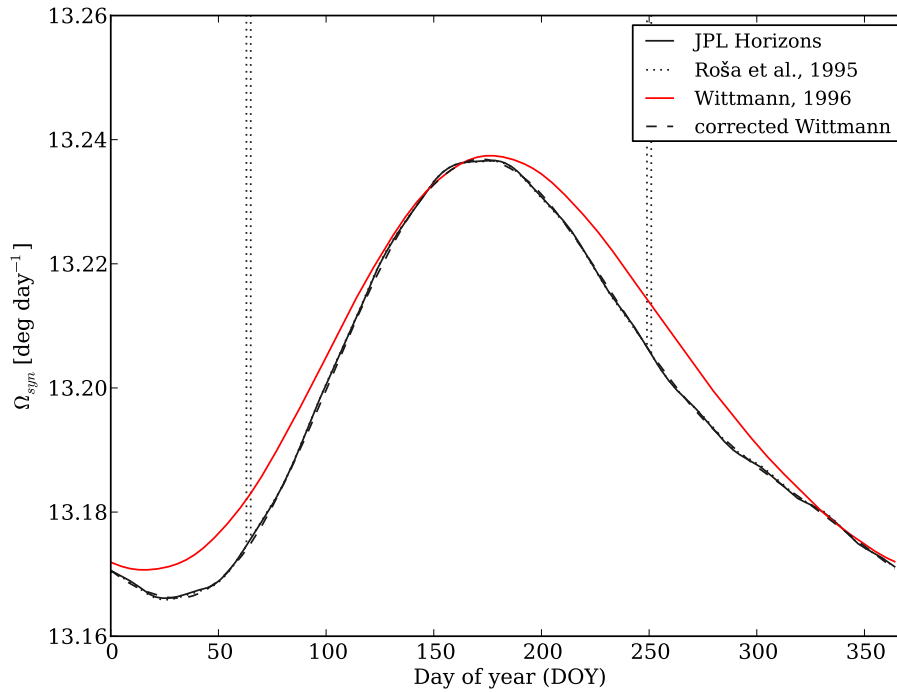
gdje je  $r$  trenutna udaljenost Zemlje od Sunca izražena u a.j.

Radi provjere točnosti navedenih metoda, korištene su efemeride iz JPL Horizons sustava<sup>3</sup> (Giorgini et al., 1996). Iz efemeridnih podataka za heliocentričku duljinu Zemlje,  $L_0$ , izračunata je sideričko-sinodička korekcija prema izrazu

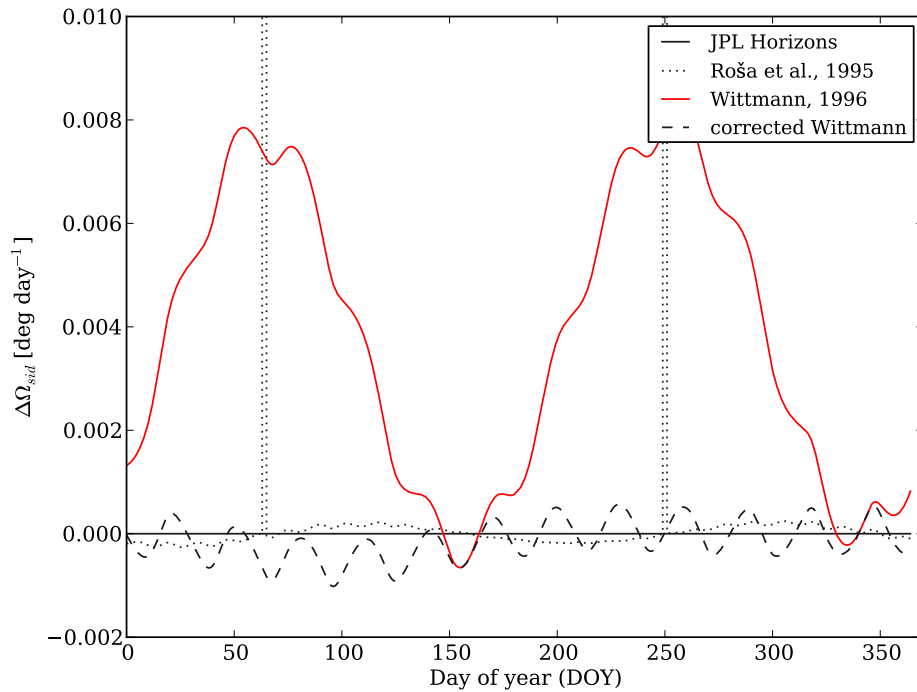
$$\omega_{sid} - \omega_{syn} = \omega_C + \frac{dL_0}{dt}, \quad (3.30)$$

gdje  $\omega_C = 14.1844^\circ \text{ dan}^{-1}$  predstavlja Carringtonovu brzinu rotacije. Kako bi se izračunala referentna sinodička brzina, ova korekcija je primjenjena na fiksni siderički period rotacije za koji je također korišten Carringtonov period od 25.38 dana. Iz iste fiksne sideričke brzine rotacije izračunata je sinodička brzina prema izrazima (3.26) i (3.27), a rezultati

<sup>3</sup><http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>



(a) Sinodičke brzine izračunate raznim metodama za siderički period od 25.38 dana



(b) Pogreške metoda u odnosu na JPL efemeride

**Slika 3.6.:** Usporedba metoda za preračunavanje sinodičkih brzina u sideričke.

su uspoređeni na slici 3.6. Iz slike je vidljivo da izraz (3.26) daje vrijednosti u suglasju sa JPL efemeridama dok izraz (3.27) ima odstupanje do  $\sim 0.01^\circ \text{ dan}^{-1}$ . Detaljnijim uvidom se ispostavlja da izrazu (3.27) nedostaje faktor koji projicirani doprinos brzine Zemlje ortogonalno re-projicira nazad na os rotacije pa izraz treba glasiti (Skokić et al., 2014):

$$\omega_{sid} = \omega_{syn} + \omega_{Earth} \frac{\cos^2 \Psi}{\cos i}. \quad (3.31)$$

Rezultati proračuna izrazom (3.31) također su dani na slici 3.6 te pokazuju njegovu ispravnost, a izbjegnuti su i diskontinuiteti koji se znaju pojaviti kod prethodnih metoda. Na slici 3.6b uspoređene su pogreške navedenih metoda u odnosu prema JPL efemeridama. Wittmannova metoda daje maksimalnu pogrešku od oko  $0.008^\circ \text{ dan}^{-1}$  dok su pogreške ostalih metoda za red veličine manje. Pogreške u metodi prema Roša et al. (1995a) dolaze iz upotrebe pojednostavljenih izraza za izračunavanje orbitalnih elemenata Zemlje dok pogreške s približnim periodom od mjesec dana pri korištenju izraza (3.31) su najvjerojatnije posljedica zanemarenja utjecaja Mjeseca pri izračunavanju trenutne orbitalne brzine Zemlje iz 2. Keplerovog zakona. Kad se u cijelosti koriste JPL efemeride, ove varijacije nestanu.

Do izraza (3.31) se može doći i analitičkim putem. Trenutna sinodičko-siderička korekcija je zapravo vremenska derivacija heliografske duljine Zemlje (izraz 3.30) te se stoga može odrediti na dva načina. Prvi način je određivanjem  $L_0$  u dva uzastopna trenutka što rezultira izrazima (3.25) i (3.26). Drugi način je diferenciranjem  $L_0$  polazeći od relacije (Roša et al., 1995a)

$$\tan(L_0 + W) = \tan(\lambda_0 - \Omega) \cos i, \quad (3.32)$$

gdje je  $W$  kutna udaljenost Carringtonovog meridijana od uzlaznog čvora. Deriviranjem po vremenu dobije se

$$\frac{dL_0}{dt} + \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \{ \arctan[\tan(\lambda_0 - \Omega) \cos i] \}. \quad (3.33)$$

Koristeći izraz (3.30) i  $\omega_C = dW/dt$  umjesto lijevog člana te deriviranjem desnog člana (uz zanemarivanje  $d\Omega/dt \approx 50 \text{ arcsec god}^{-1}$ ), dobijemo

$$\omega_{sid} - \omega_{syn} = \frac{\cos i}{[1 + \tan^2(\lambda_0 - \Omega) \cos^2 i] \cos^2(\lambda_0 - \Omega)} \frac{d\lambda_0}{dt}. \quad (3.34)$$

Zadnji član na desnoj strani,  $d\lambda_0/dt$ , predstavlja orbitalnu kutnu brzinu Zemlje. Sređivanjem nazivnika dobijemo

$$\omega_{sid} - \omega_{syn} = \omega_{Earth} \frac{\cos i}{\cos^2(\lambda_0 - \Omega) + \sin^2(\lambda_0 - \Omega) \cos^2 i}, \quad (3.35)$$

dok se konverzijom sinusa u kosinuse i preslagivanjem nazivnika dobije

$$\omega_{sid} - \omega_{syn} = \omega_{Earth} \frac{\cos i}{\cos^2(\lambda_0 - \Omega) \sin^2 i + \cos^2 i}. \quad (3.36)$$

Izvlačenjem  $\cos^2 i$  člana iz nazivnika imamo

$$\omega_{sid} - \omega_{syn} = \omega_{Earth} \frac{1}{\cos i [\cos^2(\lambda_0 - \Omega) \tan^2 i + 1]}. \quad (3.37)$$

Član u zagradi u nazivniku predstavlja  $1/\cos^2 \Psi$  (vidi izraz (3.28)) te njegovim uvrštavanjem se konačno dobije traženi izraz (3.31).

## 3.6. Korekcija visine

Nepoznata visina objekata u atmosferi Sunca može rezultirati sistematskim pogreškama i krivim interpretacijama rezultata kod proučavanja rotacije Sunca (Brajša et al., 1991). Postoji nekoliko metoda za rekonstrukciju 3D položaja i oblika, a time i visine objekata koje se obično svrstavaju u dvije skupine, stereoskopske i tomografske (Aschwanden, 2011). Stereoskopske metode se oslanjaju na paralaksu, tj. na prividni pomak objekta zbog promjene kuta opažanja dok se tomografske metode baziraju na „režnjevima“ tj. slikama dobivenih nekom vrstom prodirućeg zračenja poput rentgenskog, obično iz više različitih kuteva čime se dobiva rekonstrukcija po dubini. Ovo područje fizike Sunca doživljava procvat zadnjih godina, osobito nakon lansiranja misije Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO) 2006. godine (Aschwanden, 2011).

U ovom radu koristimo metodu korekcije visine koja omogućava istovremeno određivanje visine i prave sinodičke brzine (Roša et al., 1998; Brajša et al., 2004). Ona spada u stereoskopske metode gdje se za promjenu kuta opažanja koristi sama rotacija Sunca. U nastavku opisa metode sa zvjezdicom su označene opažene vrijednosti, a bez zvjezdice su korigirane vrijednosti. Prvo definiramo parametar  $\beta$  koji povezuje parametar visine  $\epsilon = h/R$ , gdje je  $h$  visina objekta od površine Sunca, a  $R$  polumjer Sunca, opažanu heliografsku širinu objekta  $\psi^*$  i pravu (korigiranu) širinu  $\psi$ :

$$\beta = (1 + \epsilon) \frac{\cos \psi}{\cos \psi^*}. \quad (3.38)$$

Za male vrijednosti heliografske širine središta Sunčeva diska ( $B_0 \approx 0$ ), izraz (3.38) se

### 3. Metode

---

može prikazati u obliku:

$$\beta = \frac{\sqrt{(1 + \epsilon)^2 - \sin^2 \psi^*}}{\cos \psi^*} = \text{const.} \quad (3.39)$$

Relativno odstupanje  $\beta$  od konstantne vrijednosti zbog vremenske promjene  $B_0$  u slučaju Sunca iznosi manje od 2% čak i kod ekstremnog slučaja kad  $B_0$  poprimi maksimalnu vrijednost, a objekt se nalazi blizu ruba Sunčevog diska (Roša et al., 1998). Postupak počinje računanjem slijedećih vrijednosti:

$$a = \sum_{i=1}^N \omega_i^{*2}, \quad (3.40)$$

$$b = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\cos^4 \lambda_i^*}, \quad (3.41)$$

$$c = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i^{*2}}{\cos^2 \lambda_i^*}, \quad (3.42)$$

$$d = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\cos^2 \lambda_i^*}, \quad (3.43)$$

$$e = \sum_{i=1}^N \frac{N}{\cos^4 \lambda_i^*}, \quad (3.44)$$

gdje sumiranje ide po binovima (obično se uzima bin širine  $10^\circ$ ),  $N$  je broj izmjerenih parova brzina  $\omega_i^*$  i srednjih udaljenosti od središnjeg meridijana  $\lambda_i^*$  u svakom pojedinačnom binu. Korigirana brzina  $\omega$  i parametar  $\beta$  po binovima se izračunavaju iz:

$$\omega = \sqrt{\frac{ab - cd}{e - d^2}}, \quad (3.45)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{b - d + c/\omega^2}{b}}. \quad (3.46)$$

Konačno, srednja visina objekata po binovima se dobije iz:

$$h = R \left( \sqrt{\beta^2 \cos^2 \psi^* + \sin^2 \psi^*} - 1 \right), \quad (3.47)$$

gdje je  $\psi^*$  srednja heliografska širina objekata u danom binu:

$$\psi^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \psi_i^*. \quad (3.48)$$

Korigirana heliografska širina se može odrediti iz:

$$\cos \psi = \frac{\beta \cos \psi^*}{\sqrt{\beta^2 \cos^2 \psi^* + \sin^2 \psi^*}}, \quad (3.49)$$

a srednja kutna brzina rotacije u binu iz

$$\omega^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i^*. \quad (3.50)$$

### 3.7. Srednji profil rotacije

Iz izmjerenih i korigiranih parova vrijednosti  $(\psi_i, \omega_i)$  izračunava se srednji profil diferencijalne rotacije prilagodbom krivulje oblika (3.7) metodom najmanjih kvadrata. Za Sunčeve pjege koje se rijetko pojavljuju na višim heliografskim širinama obično se zanemaruje zadnji član u izrazu (3.7) ( $C = 0$ ) koji poprima oblik (uz  $x = \sin^2 \psi$ ):

$$\omega(\psi) = A + Bx, \quad (3.51)$$

koji se lako riješi linearnom metodom najmanjih kvadrata prilagodbom pravca na izmjerene veličine. Za koronine svijetle točke se koristio puni izraz (3.7):

$$\omega(\psi) = A + Bx + Cx^2, \quad (3.52)$$

za koji je potrebno upotrijebiti polinom drugog reda tj. parabolu. Konačno, uzet je u obzir i slučaj kada je  $B = C$  radi smanjenja međusobnog utjecaja koeficijenata (eng. cross-talk) koji se također svede na jednadžbu pravca:

$$\omega(\psi) = A + B(x + x^2) = A + Bx', \quad (3.53)$$

gdje je  $x' = x + x^2$ .

### 3.8. Linearne brzine i Reynoldsova napetost

Od pojedinačnih izmjerenih kutnih brzina  $\omega_i$  oduzima se srednji profil rotacije  $\omega(\psi)$  kako bi se dobile rezidualne rotacijske kutne brzine  $\Delta\omega_{rot,i}$ :

$$\Delta\omega_{rot,i} = \omega_i - \omega(\psi_i). \quad (3.54)$$

Kutne brzine su zatim pretvorene u linearne brzine preko izraza:

$$v_{mer} = (R_{\odot} + h)\omega_{mer}, \quad (3.55)$$

$$\Delta v_{rot} = (R_{\odot} + h)\Delta\omega_{rot} \cos \psi, \quad (3.56)$$

gdje je  $h$  visina objekta iznad površine Sunca. Da bi meridijanske brzine bile pozitivne prema polovima, a negativne prema ekvatoru na obje polutke (simetrične s obzirom na ekvator), svim meridijanskim brzinama na južnoj polutci je okrenut predznak ( $v_{mer}(\psi < 0) = -v_{mer}(\psi > 0)$ ). U takvoj konvenciji, negativni iznos Reynoldsove napetosti označava prijenos momenta količine gibanja prema ekvatoru.

Iz linearnih brzina moguće je izračunati njihovu međusobnu korelaciju i Reynoldsovu napetost:

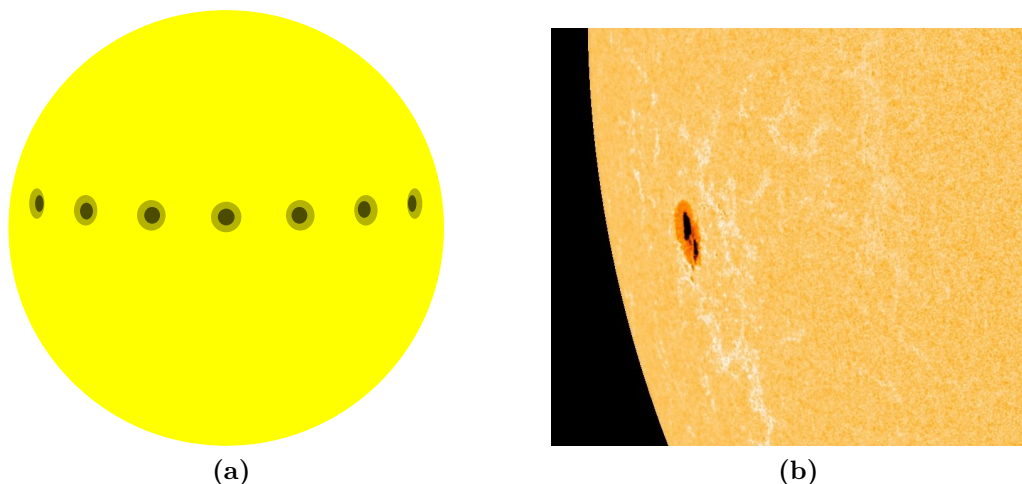
$$Q_{\theta\phi} = \langle \Delta v_{rot} v_{mer} \rangle, \quad (3.57)$$

gdje zagrade, kao i dosad, označavaju usrednjavanje po longitudi.

## 3.9. Pogreške radi strukture objekata i rubnih efekata

Pjege, kao i koronine svijetle točke, često imaju složenu strukturu koja se mijenja u vremenu. Time je precizno određivanje središta objekta otežano i javlja se pogreška mjerenja položaja koja utječe na konačne brzine. Katalozi s koordinatama opaženih pjega obično daju srednje koordinate cijele grupe pjega koje mogu biti čista aritmetička sredina položaja svih pjega u grupi, aritmetička sredina korigirana s težinskim faktorom površine pojedinačnih pjega u grupi ili samo koordinate najveće pjege. Osim toga, Joyev zakon također doprinosi tako da se mogu javiti prividna gibanja u meridijanskom smjeru, ali ona se lako mogu provjeriti uzimanjem u obzir samo pojedinačnih pjega. Vjerojatno najbolji način da se vidi utjecaj i moguće otklanjanje ovih efekata bi bilo modeliranje i simulacija raznih varijanti. Ipak, ti efekti ne bi trebali biti značajni i velik broj podataka bi trebao izgladiti moguće pogreške.

Efekti ruba diska su pogreške mjerenja položaja objekata uzrokovane projekcijskim efektima kad se opažani objekt nalazi blizu ruba. Najprecizniji položaji se dobivaju u središtu diska, a kako se približavamo rubu, mala nepouzdanost u mjerenju položaja na slici odgovara sve većoj nepouzdanosti u izračunatim heliografskim koordinatama. Kod pjega postoji i još jedan rubni efekt koji je opazio A. Wilson 1769. godine, tzv. *Wilsonov efekt*, prividni pomak sjene prema polusjeni kako se pjega približava rubu (slika 3.7). To se objašnjava time da je sjena blago uleknuta te da je plazma unutar sjene transparentnija od plazme fotosfere.



**Slika 3.7.:** (a) Shematski prikaz Wilsonovog efekta. (b) Wilsonov efekt na grupi pjega snimljenoj 25. veljače 2014. HMI instrumentom satelita SDO (ljubaznošću V. Ivanov/Wikimedia Commons i NASA/SDO).

Efekti ruba se uglavnom rješavaju filtriranjem podataka na najčešće  $0.85R_{\odot}$  što otprilike odgovara  $\pm 58^{\circ}$  udaljenosti od središnjeg meridijana. Filtriranjem preko udaljenosti od središnjeg meridijana neće se maknuti objekti blizu polova, zato je preporučljivo koristiti filtriranje preko polumjera.

### 3.10. Pogreške orijentacije osi

Pogreška u kutu inklinacije Sunčeve osi rotacije može dovesti do pojave prividnog meridijanskog toka u rezultatima. Ako pogrešku u kutu inklinacije označimo s  $\Delta i$ , tada je amplituda prividnog meridijanskog toka približno jednaka

$$v'_m \approx v_{rot} \tan \Delta i. \quad (3.58)$$

Uz pogrešku od  $\Delta i = 0.1^{\circ}$  i ekvatorsku brzinu rotacije  $\approx 2 \text{ km s}^{-1}$ , dobijemo amplitudu prividnog toka od  $3.5 \text{ m s}^{-1}$ . Taj iznos se periodički mijenja tijekom godine, ovisno o orijentaciji rotacijske osi Sunca prema Zemlji, a najveći je u lipnju i prosincu (Stix, 2004).

Ove pogreške se mogu otkriti kao periodička promjena brzine s periodom od godinu dana ili kao tok preko ekvatora koji mijenja smjer u godišnjem ritmu. U slučaju razmatranja gibanja usrednjenih preko dužih perioda npr. prema ciklusu aktivnosti Sunca, doprinos od ove pogreške je neznatan.

Moguće su i pogreške gdje os instrumenta (teleskopa, kamere) nije u očekivanoj ravni, npr. u pravcu sjever-jug, ili da je središte Sunčevog diska pomaknuto par piksela od



specificiranog. Tada će izmjerene koordinate objekata imati sistematsku pogrešku koja će utjecati na sve daljnje rezultate. Poznat je slučaj sa satelitom SOHO čije su originalne vrijednosti imale sistematsku pogrešku u vrijednostima polumjera Sunčevog diska i pozicije njegova središta na slici koja se očitovala kao trend u prividnoj veličini diska i nasumičnim gibanjima središta (Brajša et al., 2001), što je ispravljeno preračunavanjem vrijednosti novim, dorađenijim algoritmima detekcije ruba Sunčeva diska (Auchere et al., 1998).

## 3.11. Pogreške zbog neravnomjerne distribucije objekata praćenja

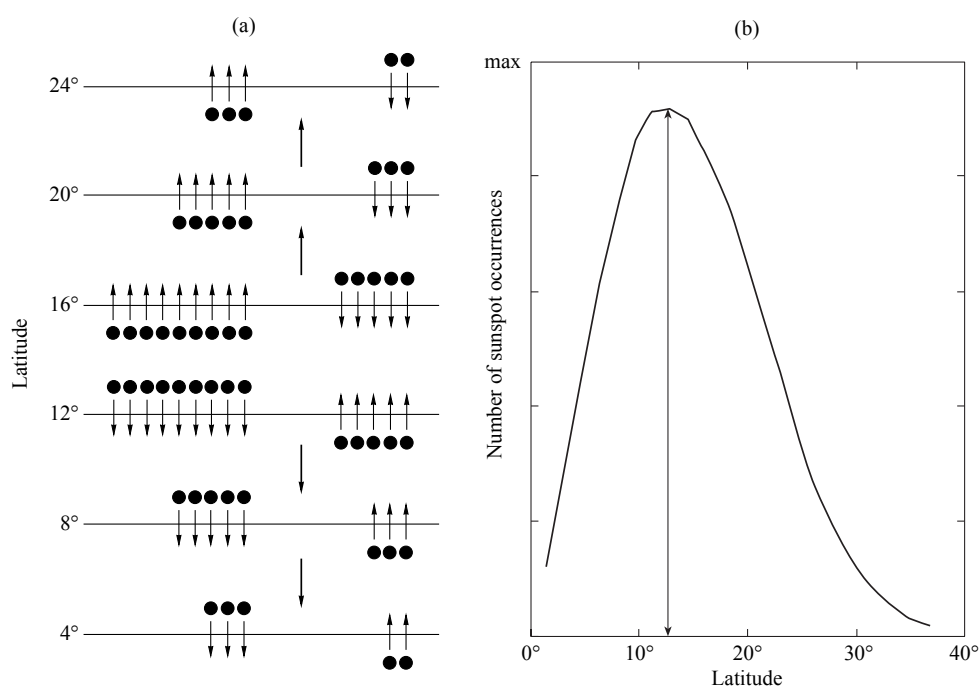
Objekti čija se gibanja prate u pravilu nisu ravnomjerno raspoređeni po površini Sunca (npr. leptir-dijagram kod Sunčevih pjega). Globalni tokovi određuju se iz vremenske promjene položaja objekata tj. iz njihovih srednjih brzina koje se dalje usrednjavaju po određenom skupu objekata, obično unutar zadanog bina. Usrednjavanje je potrebno radi minimiziranja nasumičnih gibanja objekata i određivanja zajedničkih tokova. Međutim, upravo nasumične komponente u gibanju objekata u kombinaciji s njihovom neravnomjernom raspodjelom po širini unose pogrešku u mjerenja meridijanskih tokova (Olemskoy i Kitchatinov, 2005).

Uzmimo za primjer pjege gdje se brzina određuje iz razlike konačnog i početnog položaja. Pjege su u konačnom položaju nešto starije, nego što su bile u početnom položaju. Raspodjela pjega po širini ima maksimum na heliografskoj širini aktivnosti te opada prema drugim širinama. Nasumična gibanja pjega uzrokuju proširivanje profila distribucije i što su pjege starije, distribucija je difuznija i nešto ravnomjernija. Izmjerena brzina pjege se treba pripisati nekoj heliografskoj širini, a kako se pjega pomakla, obično se uzima srednja širina početnog i konačnog položaja. Međutim, upravo u tom slučaju, zbog razlike u distribuciji javlja se gradijent koji unosi pogrešku u mjerenje toka (slika 3.8).

Olemskoy i Kitchatinov (2005) su pokazali da se brzina ovog prividnog toka može procijeniti iz

$$v \sim \frac{\nu_T}{L} \sim 1 - 10 \text{ m s}^{-1}, \quad (3.59)$$

gdje je  $\nu_T \sim 10^9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  koeficijent turbulentne difuzije, a  $L$  prosječna duljina na kojoj se nejednolika raspodjela opaža. Taj iznos je reda veličine samih meridijanskih gibanja, a prema autorima može biti uzrok neslaganja mjerenja meridijanskih tokova preko praćenja položaja objekata i drugih metoda. Također su pokazali da se pogreška lako ukloni ako se brzine pripišu prvoj tj. početnoj širini te da su tada rezultati u skladu s drugim metodama.



**Slika 3.8.:** Pogreške u izmjerenim meridijanskim brzinama kao posljedica neravnomjerne raspodjele objekata na Suncu. (a) Utjecaj graničnih efekata na određivanje ukupnog toka. Točke predstavljaju pjege na granici latitudnih pojaseva, a strelice označavaju njihovo gibanje. Deblje strelice predstavljaju predominantno gibanje zbog graničnih efekata. (b) Karakteristična raspodjela pjega po heliografskoj širini (preuzeto iz Olem-skoy i Kitchatinov, 2005).

## 3.12. Ostale pogreške

Pri identifikaciji istih objekata na uzastopnim slikama također može doći do pogreške zbog nesavršenosti algoritama automatskog prepoznavanja ili ljudskog faktora. Međutim, one se u analizi obično lako primijecuju kao točke koje jako odstupaju od ostalih (eng. outlier). Tu su i pogreške radi defekata i deformacije optičkog sustava, atmosferskih (ne)prilika te raznih drugih nepredvidivih uzroka. Sveobuhvatan prikaz pogrešaka kod mjerenja rotacije Sunca iz Dopplerovskih brzina i pomaka objekata dao je Schröter (1985).

Da bi se smanjio utjecaj pogrešaka na konačni rezultat, ulazni podaci se filtriraju po nekim fizikalnim principima ili zakonitostima za koje se zna da ih promatrani objekt mora zadovoljavati. Primjerice, ako u podacima imamo pjegu koja rotira duplo većom brzinom od ostalih, najvjerojatnije se radi o pogreški. Zato se uvode filtriranja po brzini, za kutnu brzinu sideričke rotacije Sunca se obično uzimaju granice  $8-19^\circ \text{ dan}^{-1}$  dok za meridijanska gibanja one obično iznose  $\pm 4^\circ \text{ dan}^{-1}$ . Treba imati na umu da previše restriktivan filter može uzrokovati kontra-efekt, tj. da nam promakne neki novi značajan rezultat te je potrebno dosta iskustva za pronalaženje idealne ravnoteže.

## 4. Podaci i rezultati

Mnogi opservatoriji imaju vlastite programe opažanja Sunca s dostupnim bazama slika i/ili položaja Sunčevih pjega i grupa pjega (npr. Debrecen, Kanzelhöhe, Kodaikanal), a najopsežniji i najdugotrajniji je Greenwich Photoheliographic Results. U zadnje vrijeme je također postala praksa da podaci sa satelita budu javno dostupni pa tako imamo on-line baze podataka sa satelita SOHO, SDO i mnogih drugih. Projektom Virtual Observatory želi se omogućiti jednostavan objedinjeni pristup raznim arhivima i alatima za obradu svim znanstvenicima kako bi nesmetano mogli analizirati i kombinirati raznovrsne podatke.

U ovom radu su korišteni podaci o Sunčevim pjegama iz baza GPR i Solar Observing Optical Network/United States Air Force/National Oceanic and Atmospheric Administration (SOON/USAF/NOAA). Za koronine svijetle točke korišteni su podaci dobiveni analizom snimaka s EIT instrumenta satelita SOHO te AIA instrumenta satelita SDO.

### 4.1. Extended Greenwich Photoheliographic Results

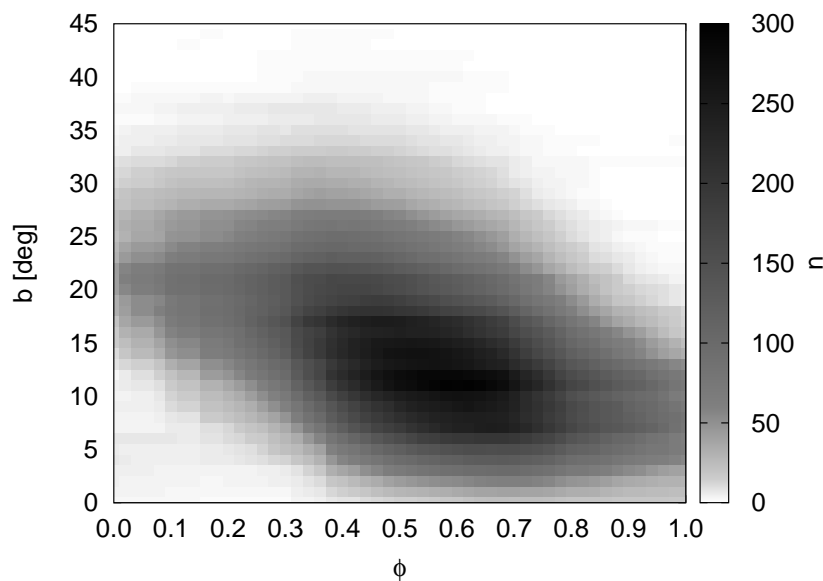
#### 4.1.1. Podaci

GPR baza pokriva razdoblje 1874. - 1976. godine što je više od bilo koje druge baze. Sadrži dnevna mjerenja položaja pjega te površine pjega i baklji prikupljenih s više svjetskih opservatorija, objavljenih od strane Kraljevskog Opservatorija Greenwich. GPR podaci u ovom radu su digitalizirani u sklopu nekoliko projekata i ponešto se razlikuju od on-line verzije<sup>1</sup>. Nedavno je započet opsežan projekt revizije GPR baze (Willis et al., 2013a,b; Erwin et al., 2013) kako bi se ispravile tipografske i mjerne pogreške, što govori o važnosti ovog skupa podataka.

SOON je nastavak GPR baze od 1976. godine kada USAF/NOAA preuzima sakupljanje podataka o Sunčevim pjegama, ali u nešto drukčijem formatu. Kombinirani skup podataka SOON+GPR, čija pokrivenost ide 1878.-2011., u nastavku ćemo zvati Extended GPR (EGR). Nakon filtriranja na  $\pm 58^\circ$  od središnjeg meridijana, ukupan broj parova podataka o položajima grupa pjega je 135674, 92091 iz GPR skupa, a preostalih 43583

---

<sup>1</sup><http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>



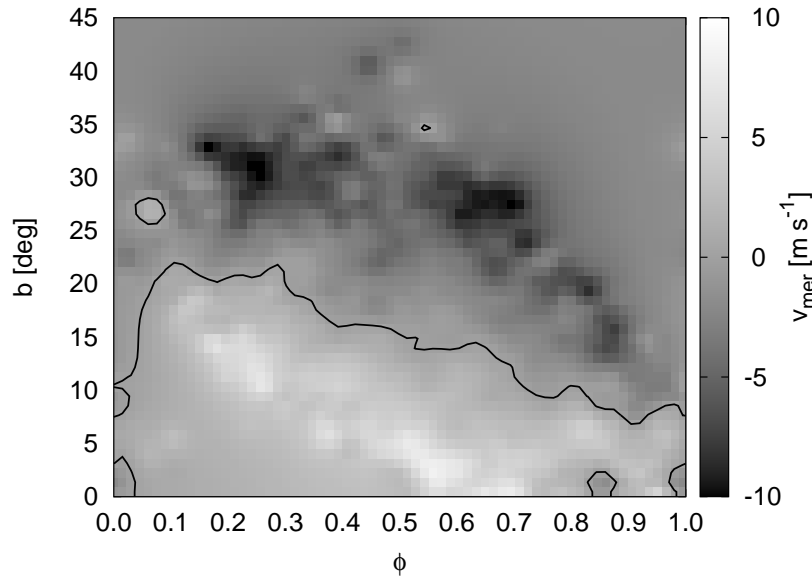
Slika 4.1.: Raspodjela položaja grupa pjega iz skupa podataka EGR.

iz SOON. Točnost heliografskih koordinata grupa pjega u GPR-u iznosi oko  $0.1^\circ$ , a u SOON-u je oko  $1^\circ$  (Poljančić et al., 2010). Uzastopna mjerenja su većinom perioda od jednog dana.

#### 4.1.2. Diferencijalna rotacija

Kako se radi o analizi gibanja iz položaja grupa pjega čija je rasprostranjenost ograničena na niže heliografske širine, za profil diferencijalne rotacije korišten je izraz (3.51). Prilagodбом te funkcije na brzine izračunate metodom dnevnog pomaka iz EGR podataka uz primjenu sinodičko-sideričke korekcije, dobili su se koeficijenti srednjeg profila sideričke rotacije  $A = 14.499 \pm 0.005^\circ \text{ dan}^{-1}$  i  $B = -2.64 \pm 0.05^\circ \text{ dan}^{-1}$ . Potom su izračunate rezidualne rotacijske brzine oduzimanjem izmjerenih brzina od srednjeg profila i preračunavanjem kutnih u linearne brzine uz polumjer Sunca od  $R_\odot = 696.26 \times 10^3 \text{ km}$ . Izmjerene kutne brzine rotacije su filtrirane u opseg  $8 - 19^\circ \text{ dan}^{-1}$  kako bi se eliminirale tipografske pogreške i pogreške krive identifikacije pjega. Kutne meridijanske brzine su također preračunate u obodne brzine, ali bez filtriranja. Korekcija visine nije rađena jer se pjege nalaze na fotosferi Sunca.

Analiza EGR skupa podataka je provedena prema fazi ciklusa aktivnosti Sunca, tj. rezultati su usrednjeni po svim ciklusima aktivnosti i prikazani u ovisnosti o njegovoj fazi  $\phi$ , a obje polutke su preklapljene u jednu, simetrično s obzirom na ekvator. Raspodjela podataka prema heliografskoj širini  $b$  i fazi ciklusa aktivnosti prikazana je na slici 4.1. Radi smanjenja efekta prividnih meridijanskih gibanja zbog neravnomjerne raspodjele,



**Slika 4.2.:** Meridijanske brzine u ovisnosti o fazi ciklusa Sunčeve aktivnosti i heliografske širine za skup podataka EGR. Konture označavaju mjesto gdje je  $v_{mer} = 0$ .

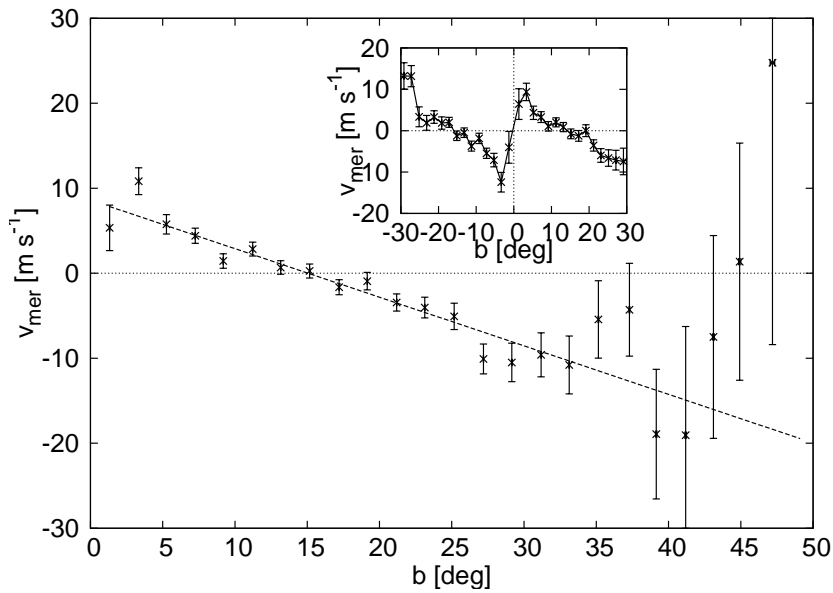
brzinama su pripisane početne heliografske širine. Za izračunavanje faze ciklusa aktivnosti korištena su vremena minimuma i maksimuma aktivnosti prema tablici 1 iz Brajša et al. (2009b). Točke nakon minimuma Sunčeve aktivnosti, a prije maksimuma su mapirane u interval  $[0, 0.5]$ . Točke nakon maksimuma, a prije idućeg minimuma su mapirane u interval  $[0.5, 1]$ . Faza ciklusa je izračunata pomoću izraza:

$$\phi_i = \frac{t_i - t_{min/max}}{t_{max/min} - t_{min/max}}. \quad (4.1)$$

### 4.1.3. Meridijanska gibanja

Na slici 4.2 prikazana je ovisnost meridijanske brzine grupa pjega o fazi ciklusa aktivnosti i heliografskoj širini. Prikaz je napravljen usrednjavanjem podataka po područjima visine  $1^\circ$  po latitudi i širine 0.1 faze ciklusa aktivnosti. Prvo je za svako područje koje sadrži više od 10 mjerenja izračunata srednja brzina, a potom su sva područja usrednjena s težinskim faktorom  $w(d) = 1/(1+d^2)$  gdje je  $d$  udaljenost svake točke od točke koordinatne mreže. Svjetlije nijanse označavaju brzine prema polovima ( $v_{mer} > 0$ ), a tamnije prema ekvatoru. Prikazane su i konture gdje je meridijanska brzina jednaka nuli. Jasno se vide dva područja, u onima bliže ekvatoru grupe pjega se gibaju prema polovima, a na višim širinama gibanje je prema ekvatoru.

Takvo ponašanje se vidi i na slici 4.3 gdje su meridijanske brzine usrednjene po podru-



**Slika 4.3.:** Meridijanska gibanja usrednjena po područjima širine  $2^\circ$  po latitudi. Rezultat linearne regresije prikazan je crtkanom linijom. Na manjoj slici su srednje meridijanske brzine prikazane za svaku polutku posebno.

čjima širine  $2^\circ$  po latitudi. Na istoj slici je prikazan i rezultat linearne regresije:

$$v_{mer} = (-0.571 \pm 0.038) \text{ m s}^{-1} (\text{ }^\circ)^{-1} \cdot b + (8.61 \pm 0.64) \text{ m s}^{-1}, \quad (4.2)$$

iz čega se dobije sjecište s  $x$ -osi,  $v_{mer}(b) = 0$ , za  $b \approx 15^\circ$ . Na manjoj slici je prikazana srednja meridijanska brzina za obje polutke. Vidi se da brzina na vrlo niskim širinama pada u nulu, a zatim na ekvatoru okreće smjer.

Podaci su također podijeljeni na 10 područja po fazi  $\phi$  širine  $0.1$ , a potom je izračunat pravac metodom najmanjih kvadrata za svako područje pojedinačno. Koeficijenti tako dobivenih pravaca su dani izrazom:

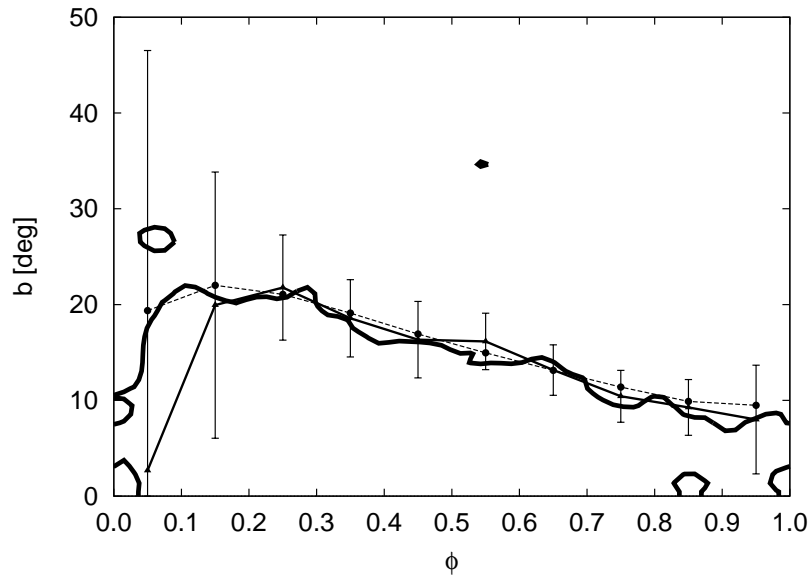
$$v_{mer} = c_1 b + c_2, \quad (4.3)$$

a izlistani su u tablici 4.1 i prikazani na slici 4.4. Vrlo je interesantno da je kontura koja predstavlja  $v_{mer} = 0$  (slika 4.2) vrlo blizu središtu aktivnosti tijekom cijele faze. Središte aktivnosti je srednja širina pjega kao funkcija faze, a izračunata je izrazom  $\overline{b(\phi)} = \sum b_i/n(\phi)$ .

Dobiveni rezultat gdje je meridijanski tok usmjeren prema središtu aktivnosti je u suprotnosti s većinom ostalih rezultata mjerenjem pomaka objekata u atmosferi Sunca (Howard, 1991a, 1996; Snodgrass i Dailey, 1996; Vršnak et al., 2003). Kod većine njih je tok obrnut, od središta aktivnosti prema ekvatoru i polovima. Iako niti jedan od

**Tablica 4.1.:** Vrijednosti koeficijenata linearne regresije, sjecišta s  $x$ -osi,  $b_{v_{mer}=0}$ , te srednje heliografske širine grupa pjega,  $\overline{b(\phi)}$ .

$\phi$	$c_1$ [ $\text{m s}^{-1} (\text{°})^{-1}$ ]	$c_2$ [ $\text{m s}^{-1}$ ]	$b_{v_{mer}=0}$ [ $\text{°}$ ]	$\overline{b(\phi)}$ [ $\text{°}$ ]
0.05	$-0.11 \pm 0.22$	$0.3 \pm 4.8$	$2.7 \pm 43.8$	19.3
0.15	$-0.51 \pm 0.23$	$10.3 \pm 5.5$	$19.9 \pm 13.9$	22.0
0.25	$-0.94 \pm 0.17$	$20.5 \pm 3.7$	$21.8 \pm 5.5$	21.1
0.35	$-0.83 \pm 0.12$	$15.4 \pm 2.5$	$18.6 \pm 4.0$	19.1
0.45	$-0.65 \pm 0.11$	$10.6 \pm 1.9$	$16.3 \pm 4.0$	16.9
0.55	$-0.63 \pm 0.09$	$10.2 \pm 1.3$	$16.1 \pm 2.9$	15.0
0.65	$-0.73 \pm 0.10$	$9.6 \pm 1.4$	$13.2 \pm 2.6$	13.1
0.75	$-0.88 \pm 0.15$	$9.2 \pm 1.8$	$10.4 \pm 2.7$	11.4
0.85	$-1.20 \pm 0.24$	$11.1 \pm 2.7$	$9.3 \pm 2.9$	9.9
0.95	$-0.73 \pm 0.30$	$5.8 \pm 3.4$	$8.0 \pm 5.6$	9.5



**Slika 4.4.:** Vrijednosti  $b_0 = c_2/c_1$  s pogreškama su prikazani punom linijom,  $\overline{b(\phi)}$  sa crtkanom linijom te kontura  $v_{mer} = 0$ .



tih članaka ne spominje da li su uzeli u obzir raspodjelu objekata i koju latitudu su pripisali pojedinim mjerenjima, pretpostavljamo da je uzrok neslaganja upravo u tome da ostali autori nisu tretirali neravnomjernu raspodjelu objekata. Naime, ako za EGR podatke također izostavimo tretiranje neravnomjerne raspodjele, tada dobivamo rezultate podudarne s navedenim člancima.

S druge strane, helioseizmološka mjerenja u pravilu detektiraju meridijanski tok od ekvatora prema polovima preko svih latituda (Zhao i Kosovichev, 2004; González Hernández et al., 2008, 2010). Međutim, postoji upadljiva sličnost rezultata meridijanskih gibanja (slike 4.2 i 4.3) i *rezidualnog* meridijanskog toka izmjenenog heliosizmologijom (Zhao i Kosovichev, 2004; González Hernández et al., 2008, 2010). Zhao i Kosovichev (2004) ističu da je rezidualni meridijanski tok usmjeren prema zonama aktivnosti.

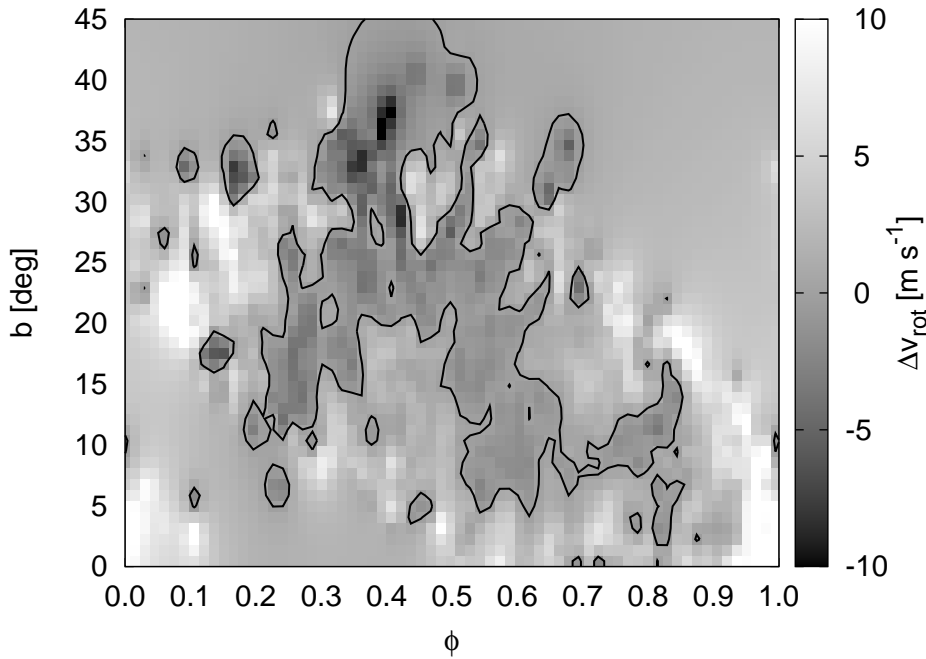
Ovi rezultati postavljaju pitanje zašto u gibanjima pjega ne opažamo dominantni tok prema polovima prisutan u Dopplerovskim i helioseizmološkim mjerenjima. Jedna od mogućnosti jest da je taj tok promjenljiv s vremenom, a ovi rezultati pokazuju samo srednje vrijednosti. Ruždjak et al. (2004) je sugerirao da su pjege usidrene na sloj  $r = 0.93R_{\odot}$ . S obzirom da postoje indikacije o promjeni smjera meridijanskog toka s dubinom (Hathaway, 2012), može biti da opažamo upravo sloj gdje se događa promjena smjera.

Također postoji mogućnost da je meridijanski tok drugačiji oko pjega, nego na ostatku površine Sunca. Metode koje prate pomak pjega su tada ograničene na ta područja, dok helioseizmološke metode nisu što bi moglo objasniti navedeno neslaganje.

### 4.1.4. Torzione oscilacije

Slika 4.5 prikazuje ovisnost rezidualnih rotacijskih brzina,  $\Delta v_{rot}$ , kao funkcija faze ciklusa aktivnosti i latituda. Konture predstavljaju područja gdje je  $\Delta v_{rot} = 0$ , svjetlija područja označavaju rotaciju bržu od srednje rotacije ( $\Delta v_{rot} > 0$ ), a tamnija sporiju. Vidi se dosta složen uzorak koji ne odgovara tipičnom uzorku torzionih oscilacija. Kako bi se istražilo da li su torzione oscilacije prisutne samo u novijim vremenima, podaci su podijeljeni u tri epohe: ranu (ciklusi 12–15), srednju (ciklusi 16–19) i kasnu (ciklusi 20–24) te prikazani na slici 4.6. Rezultati za pojedine epohe također ne odgovaraju torzionim oscilacijama, a čak nisu niti međusobno konzistentni i ne primjećuje se nikakva osobita pravilnost. Korišteni skup podataka nije moguće podijeliti u još kraće epohe jer se već u ranoj epohi vidi da imamo nedostatak dovoljnog broja mjerenja za latituda iznad  $30^{\circ}$ .

Iz rezultata ne možemo mnogo reći o postojanju torzionih oscilacija, osim opće napomene da je sporiji tok od rotacije dobiven oko maksimuma, a brži u vrijeme minimuma ciklusa aktivnosti Sunca. Slično ponašanje su primijetili i Brajša et al. (2006) te Brajša et al. (2007). Rezidualne rotacijske brzine ne pokazuju nikakvu pouzdanu ovisnost o la-



**Slika 4.5.:** Rezidualne rotacijske brzine,  $\Delta v_{rot}$ , kao funkcija faze ciklusa aktivnosti  $\phi$  i latitide  $b$ .

titudi. Zhao i Kosovichev (2004) su prikazali zonalni tok u periodu 1996.-2002. (solarni ciklus 23) koji kvalitativno sliči rezultatima na slici (4.5), ali iz EGR podataka ne možemo potvrditi postojanje torzionih oscilacija.

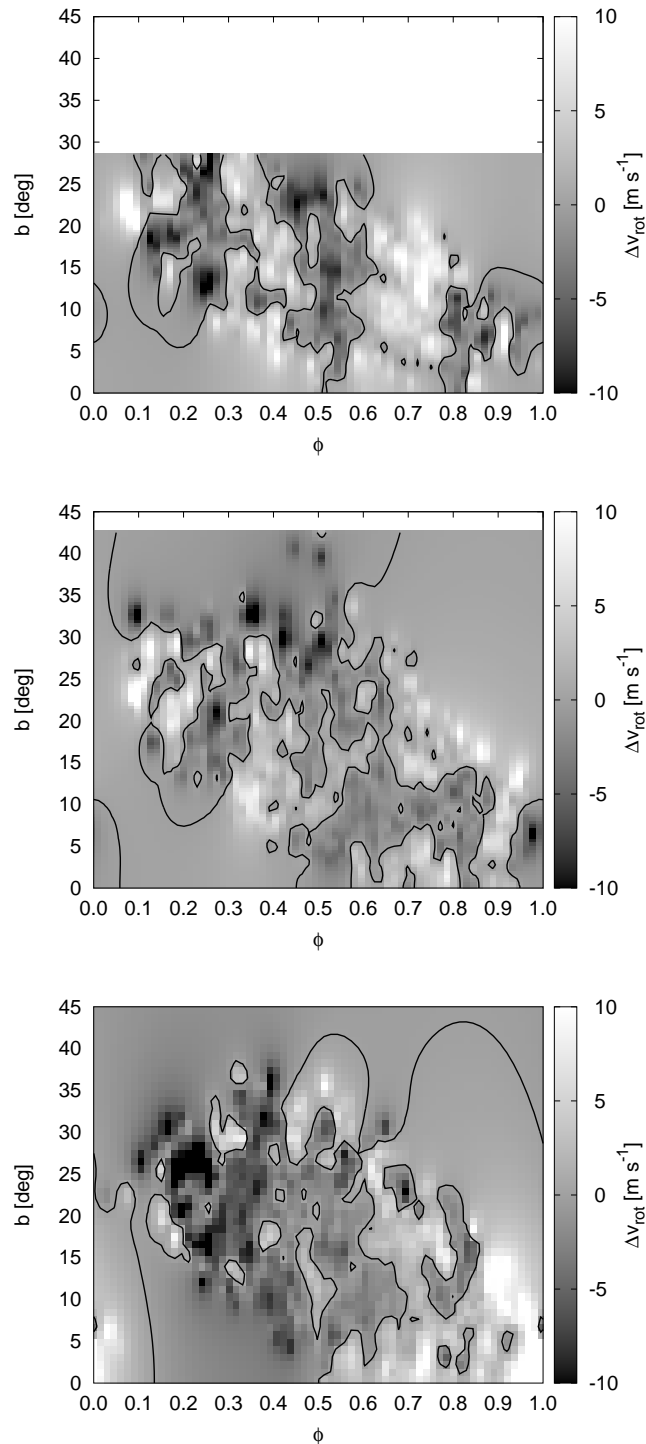
#### 4.1.5. Korelacije brzina i Reynoldsova napetost

Korelacije i kovarijance rezidualnih rotacijskih i meridijanskih brzina trebale bi ukazivati na postojanje Reynoldsove napetosti. U našoj konvenciji gdje su pozitivne brzine prema polu, a negativne prema ekvatoru za obje polutke, negativna vrijednost kovarijance  $q$  odgovara prijenosu momenta količine gibanja prema ekvatoru.

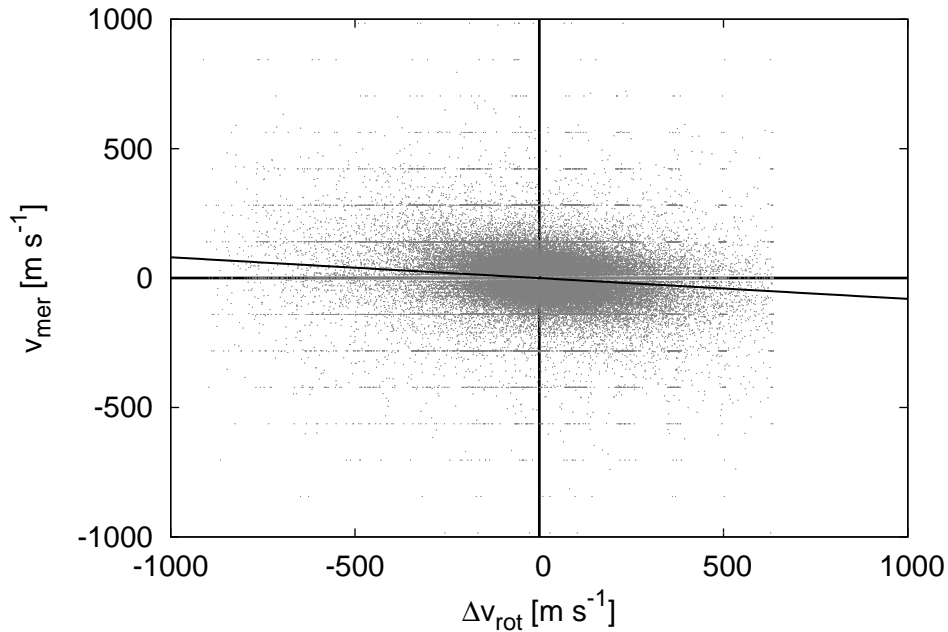
Na slici 4.7 prikazana je ovisnost meridijanskih brzina o rotacijskim rezidualnim brzinama. Metoda najmanjih kvadrata daje koeficijente pravca:

$$v_{mer} = (-0.0804 \pm 0.0017) \cdot \Delta v_{rot} + (-0.12 \pm 0.27) \text{ m s}^{-1}. \quad (4.4)$$

Howard (1984) je kritizirao upotrebu grupa pjega za mjerenje korelacije brzina. Zbog srednjeg nagiba grupe pjega od oko  $4^\circ$  prema ekvatoru (Howard, 1991b), izmjerena pozicija grupe bi mogla imati sustavan pomak prema liniji nagiba kako grupa evoluira. Taj pomak bi uzrokovao pojavu korelacije upravo onog tipa kao i od Reynoldsove napetosti. Teško je pouzdano odrediti koliki je zapravo utjecaj tog efekta na stvarne korelacije, međutim



**Slika 4.6.:** Rezidualne rotacijske brzine za tri epohe. Odozgo prema dolje prikazane su rana (ciklusi 12 – 15), srednja (ciklusi 16 – 19) i kasna (ciklusi 20 – 24) epoha. U ranoj epohi je nedovoljan broj podataka za latitute iznad  $\sim 30^\circ$ .



**Slika 4.7.:** Korelacija između meridijanskih,  $v_{mer}$ , i rezidualnih rotacijskih brzina,  $\Delta v_{rot}$ , za grupe pjega iz baze EGR. Pravac koji aproksimira podatke u smislu najmanjih kvadrata je prikazan punom linijom.

kod koroninih svijetlih točaka tog nagiba nema pa tako ne bi smjelo biti niti njegova utjecaja. Vršnak et al. (2003) su dobili sličan iznos korelacije upravo mjerenjem položaja koroninih svijetlih točaka. Također, GPR katalog sadrži informacije o morfološkom tipu grupe pjega, a velik broj ih je označen kao pojedinačne pjege. Nagib nema smisla za pojedinačne pjege pa je iznos korelacije izračunat i na tom podskupu podataka, a dobivena je vrijednost:

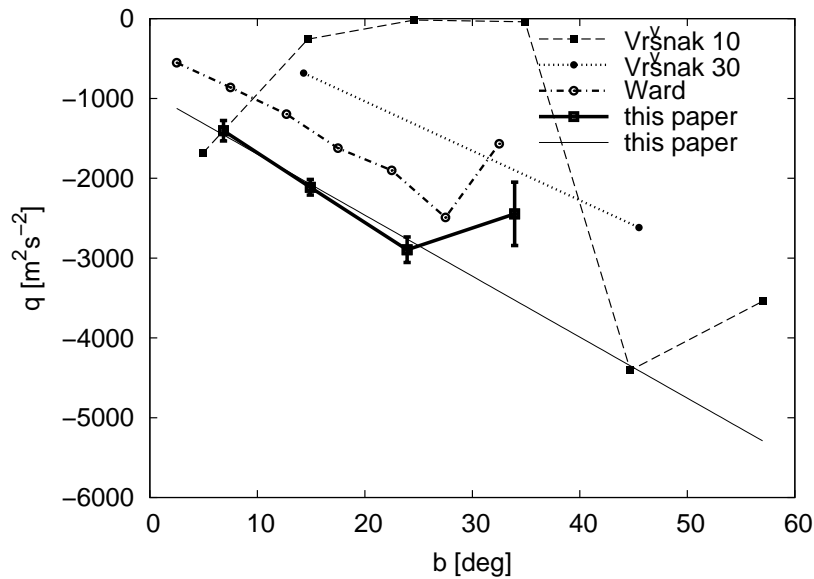
$$v_{mer} = (-0.0803 \pm 0.0036) \cdot \Delta v_{rot} + (-1.40 \pm 0.46) \text{ m s}^{-1}. \quad (4.5)$$

Ta je vrijednost gotovo jednaka korelaciji na cijelom skupu podataka pa možemo zaključiti kako nagib grupe pjega ne igra značajnu ulogu u izmjerenoj korelaciji. Na slici 4.7 postoje artefakti u obliku vodoravnih linija koje odgovaraju pomaku od  $1^\circ \text{ dan}^{-1}$ . One su posljedica male preciznosti podataka u SOON dijelu EGR-a, gdje su položaji u pravilu dani s pogreškom od  $1^\circ$ . Međutim, niti ta mala preciznost ne utječe značajnije na rezultate jer je cijeli SOON dio kataloga izbačen iz prethodnog računanja korelacije.

U tablici 4.2 istražena je ovisnost kovarijance s heliografskom širinom. Podaci su grupirani u skupine po latitudi od  $0^\circ$  do  $10^\circ$ ,  $10^\circ$  do  $20^\circ$ ,  $20^\circ$  do  $30^\circ$  i preko  $30^\circ$  te je izračunata srednja vrijednost umnoška  $\Delta v_{rot} v_{mer}$  za svaku skupinu da bi se dobile vrijednosti  $q(b)$ . Rezultati su prikazani i na slici 4.8 te uspoređeni s mjerenjima drugih autora. Ucertan je

**Tablica 4.2.:** Srednje vrijednosti kovarijance  $q$  za nekoliko različitih područja heliografske širine  $b$ .

$b$	$q$ [ $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ]	$\bar{b}$ [ $^\circ$ ]	$n$
$0^\circ < b < 10^\circ$	$-1404 \pm 128$	6.85	35836
$10^\circ < b < 20^\circ$	$-2113 \pm 98$	14.93	67156
$20^\circ < b < 30^\circ$	$-2896 \pm 160$	23.93	28518
$b > 30^\circ$	$-2446 \pm 397$	33.95	4164

**Slika 4.8.:** Ovisnost kovarijance  $q$  o latitudi usrednjene po binovima različitih širina (označeno s eng. „this paper“ - ovaj rad) te usporedba s mjerenjima drugih autora. Rezultat Ward (1965) je označen s Ward, a Vršnak et al. (2003) s Vršnak 10 i 30, ovisno o upotrebljenoj širini bina od  $10^\circ$  i  $30^\circ$ . Tankom punom linijom je označen pravac dobiven linearnom regresijom.

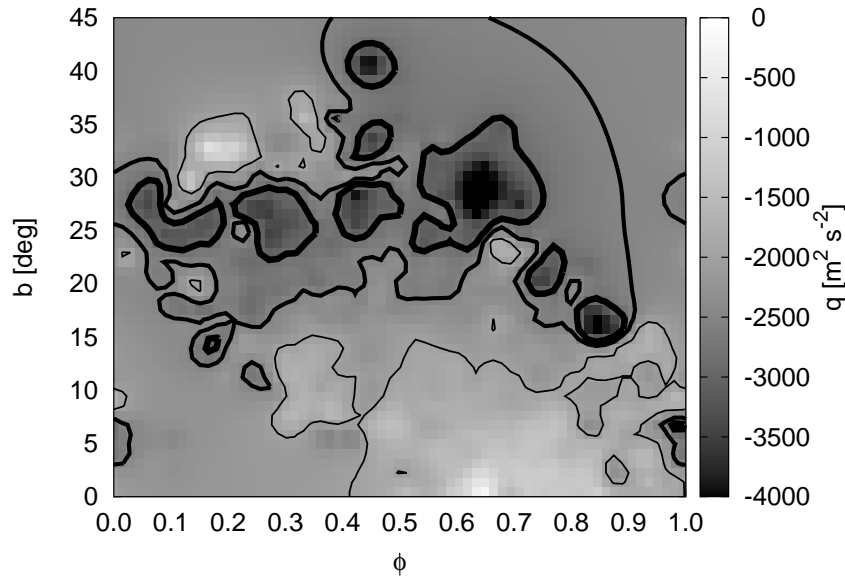
i pravac linearne regresije oblika:

$$q = (-76.4 \pm 9.5) \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} (\text{ }^\circ)^{-1} \cdot b + (-933 \pm 161) \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}, \quad (4.6)$$

koji je izračunat preko svih podataka EGR skupa.

Na slici 4.9 prikazana je ovisnost kovarijance o fazi ciklusa i latitudi. Iz obje slike je vidljivo da iznos korelacije raste s latitudom do maksimalne vrijednosti od oko  $-3000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  na  $b \approx 30^\circ$ , a na višim latitudama ponovno opada.

Iz slike 4.8, tablice 4.2 i izraza (4.6) jasno se vidi da je transport momenta količine gibanja prema ekvatoru dominantan na svim latitudama koje pokrivaju mjerenja grupa pjega. Taj rezultat je u suglasnosti s drugim analizama koje su koristile različite metode i/ili podatke (Ward, 1965; Gilman i Howard, 1984b; Vršnak et al., 2003). Srednje vrijed-



**Slika 4.9.:** Ovisnost kovarijance  $q$  o latitudi i fazi ciklusa aktivnosti. Vrijednosti  $q$  od  $-2000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ,  $-2500 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  i  $-2900 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  označene su punim linijama, od tanke prema debljoj.

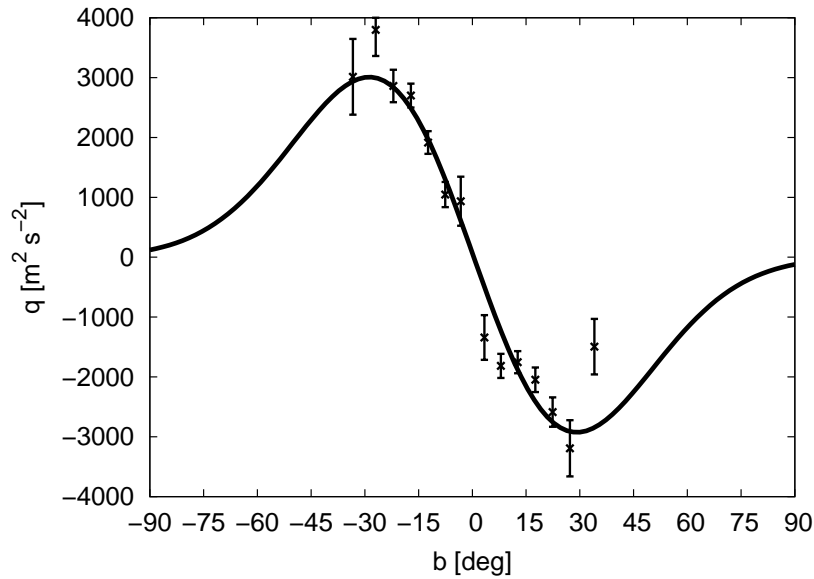
nosti  $q$  u skupinama po  $10^\circ$  u latitudi izlistane u tablici 4.2 pokazuju vrlo slično ponašanje kao i rezultati iz Ward (1965), kvalitativno i kvantitativno, kao i prema rezultatima srednjih vrijednosti u skupinama po  $30^\circ$  iz Vršnak et al. (2003). Međutim, njihovi rezultati za skupine po  $10^\circ$  se značajno razlikuju, što možemo pripisati velikoj nepouzdanosti tih mjerenja, što i sami autori priznaju.

Zanimljivo je da slika 4.8 ukazuje na mogući minimum kovarijance na latitudi oko  $25 - 30^\circ$ . Sličan minimum je prisutan i u numeričkim simulacijama (Pulkkinen et al., 1993), kao i rezultatima teorijskog modeliranja (Canuto et al., 1994). Kako bi dalje istražili pouzdanost opaženog minimuma, na slici 4.10 su prikazane srednje vrijednosti kovarijance za obje polutke Sunca. U tom prikazu, negativne vrijednosti na sjevernoj i pozitivne vrijednosti kovarijance na južnoj polutki označavaju transport momenta količine gibanja prema ekvatoru. Na istoj slici je prikazan i rezultat aproksimacije izmjerenih podataka eksponencijalnim modelom oblika:

$$q(b) = (e_1 b + e_2) \cdot e^{-e_3 b^2}, \quad (4.7)$$

gdje su  $e_1$ ,  $e_2$  i  $e_3$  podesivi parametri modela. Oblik te funkcije ovisi o parametrima te može imati minimum na određenoj latitudi, ili „eksplodirati“ u  $q = \pm\infty$ , ako je  $e_3$  negativan. Određivanjem parametara nelinearnom metodom najmanjih kvadrata iz izmjerenih vrijednosti dobiju se rezultati u tablici 4.3 te slici 4.10 (puna linija).

Oblik dobivene krivulje je vrlo sličan rezultatu u Canuto et al. (1994), uključujući



**Slika 4.10.:** Srednje vrijednosti  $q$  za obje polutke Sunca iz EGR podataka aproksimirane eksponencijalnim modelom (puna linija).

**Tablica 4.3.:** Koeficijenti eksponencijalnog modela dobiveni nelinearnom metodom najmanjih kvadrata.

Koeficijent	Vrijednost
$e_1$ [ $\text{m } (^\circ)^{-1} \text{ s}^{-2}$ ]	$-169.0 \pm 9.7$
$e_2$ [ $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$ ]	$69 \pm 80$
$e_3$ [ $(^\circ)^{-2}$ ]	$0.00060 \pm 0.00012$

ponašanje da funkcija opada u nulu približavanjem polovima. Oblik modela iz izraza (4.7) ne garantira takvo ponašanje jer je izbor parametara potpuno slobodan i nije ograničen uvjetom da vrijednost kovarijance bude nula za  $b = \pm 90^\circ$ . Međutim, iako se oblik modela podudara s Canuto et al. (1994) i njegovi parametri imaju male pogreške (tablica 4.3), zastupljenost pjega na višim latitudama je vrlo mala te su rezultati za širine preko  $35^\circ$  nepouzdan. Čak niti položaj minimuma nije sasvim pouzdan iz istog razloga. Stoga je od velike važnosti narednim mjerenjima potvrditi ili opovrgnuti ovo ponašanje kovarijance o latitudi. Dubina minimuma je također u skladu s Canuto et al. (1994) ako uzmemo da je  $q \approx -3000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \approx -0.15 (\text{ }^\circ \text{ dan}^{-1})^2$ .

## 4.2. Solar and Heliospheric Observatory

### 4.2.1. Podaci

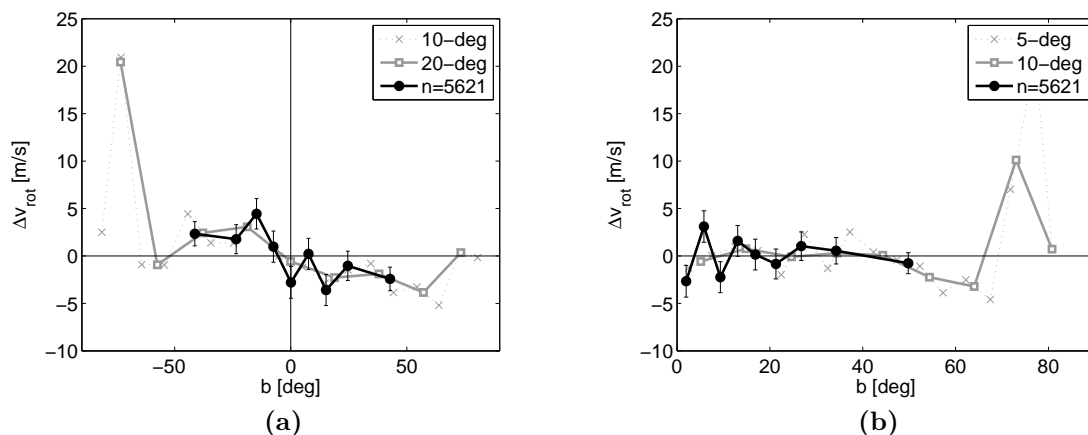
Podaci sa satelita SOHO se sastoje od snimaka cijelog diska Sunca, načinjenih instrumentom EIT u spektralnoj liniji Fe XV valne duljine 28.4 nm (Delaboudinière et al., 1995). Snimci su u pravilu rađeni svakih 6 sati, tj. s ritmom od 4 slike po danu, iako ponekad ima prekida od 12 ili više sati između uzastopnih slika. Kanal od 28.4 nm je izabran jer odgovara najvišoj temperaturi od 4 dostupna EIT kanala, i čini se da daje najbolji kontrast za detekciju malih koronalnih struktura. Sve slike su korigirane radi uklanjanja defekata i CCD pomaka prije nego su korištene za analizu.

Dvije metode su primjenjene za detekciju i praćenje koroninih svijetlih točaka na uzastopnim slikama: interaktivna i automatska (Brajša et al., 2001). Interaktivna metoda se temelji na vizualnom praćenju koroninih svijetlih točaka na uzastopnim snimkama od strane čovjeka, upotrebom programa pisanih u IDL-u (Interactive Data Language). Automatska metoda se oslanja na IDL funkciju „Regions Of Interest (ROI) segmentation“ koja se koristila za automatsku detekciju i praćenje svijetlih točaka na tripletima uzastopnih slika. Parametri poput intenziteta, opsega i oštine objekta su se mogli podešavati. Primjenom ovih dviju metoda na EIT slike, dobiveni su dva skupa podataka: interaktivni koji pokriva period lipanj, studeni i prosinac 1998. te ožujak, travanj i svibanj 1999. (Brajša et al., 2001), kasnije proširen na listopad i studeni 1999. (Mulec et al., 2007), te automatski koji pokriva razdoblje 1998.-2006.

Zbog potrebe iscrpljujućeg manualnog rada čovjeka u detekciji i praćenju koroninih svijetlih točaka, interaktivni skup sadrži puno manje podataka i pokriva znatno kraći vremenski period od automatskog, ali ipak ima i svojih prednosti. Jedna od njih je klasifikacija koroninih svijetlih točaka prema obliku u tri skupine: točkaste strukture (point-like structures, PLS), mala aktivna područja (small active regions, SAR) i male petlje (small loops, SL). Druga prednost je što se svijetle točke moglo pratiti na više od tri uzastopne slike, ako im je vrijeme života to dopuštalo, pa je interaktivni skup dalje podijeljen u dva podskupa: data set 1 - kraće živuće svijetle točke praćene do 11 slika, data set 2 - dugoživuće svijetle točke praćene do 24 slike (6 dana). Još jedna prednost interaktivne metode je bolja i pouzdanija identifikacija svijetlih točaka u odnosu na automatsku.

Na podacima je napravljena sinodičko-siderička korekcija i korekcija visine (Brajša et al., 2004). Izmjerena srednja visina svijetlih točaka je bila 8000-12000 km iznad fotosfere. U nastavku se koriste podaci dobiveni automatskom metodom za analizu Reynoldsove napetosti (za interaktivni skup to su uradili Vršnak et al., 2003) te podaci interaktivne metode za proučavanje karakteristika vlastitih gibanja i vremena života svijetlih koroninih





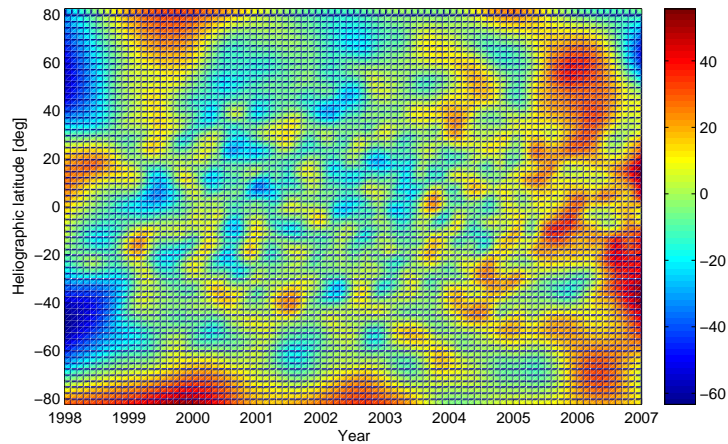
**Slika 4.11.:** Ovisnost rezidualnih rotacijskih brzina o heliografskoj širini za obje polutke Sunca uzete (a) posebno i (b) zajedno. Vrijednosti su usrednjene u skupinama od 5 do 20 stupnjeva po heliografskoj širini te po skupinama koje obuhvaćaju jednak broj mjerenja.

točaka (automatski skup sadrži samo po 3 položaja svijetlih točaka pa nije pogodan za mjerenje vremena života).

#### 4.2.2. Rezidualna rotacijska gibanja

Podaci automatskog skupa su prvo filtrirani korištenjem dvostupanjskog filtera za brzine. U prvom koraku se sideričke rotacijske brzine ograničavaju na raspon od  $8^\circ < \omega_{rot} < 18^\circ$  dan<sup>-1</sup>, a u drugom koraku se odbacuju sva mjerenja koja od srednjeg profila rotacije odstupaju za više od  $2^\circ$  dan<sup>-1</sup>. Tim načinom je dobiven skup podataka od 50595 svijetlih točaka iz kojih su izračunati parametri profila rotacije Sunca,  $A = 14.499 \pm 0.006^\circ$  dan<sup>-1</sup>,  $B = -2.54 \pm 0.06^\circ$  dan<sup>-1</sup> i  $C = -0.77 \pm 0.09^\circ$  dan<sup>-1</sup> (Wöhl et al., 2010). Od pojedinačnih mjerenja oduzet je ovaj srednji profil rotacije kako bi se dobile rezidualne rotacijske brzine. Kutne brzine su preračunate u linearne koristeći vrijednost polumjera Sunca od 701500 km.

Na slici 4.11 prikazane su rezidualne rotacijske brzine u ovisnosti o heliografskoj širini, usrednjene za cijeli period 1998.-2006. Može se primijetiti da su iznosi brzina mali te praktički unutar pogreški mjerenja. To će se pokazati najvjerojatnije kao posljedica pre-restriktivnog filtriranja objekata kod identifikacije na uzastopnim snimcima Sunca. Ako se pogledaju sjeverna i južna polutka uzete zasebno, primjećuje se nešto brža rotacija južne polutke, što je u skladu s rezultatom da je kod neparnih ciklusa južna polutka brža (Gigolashvili, 2001). Kad se obje polutke pogledaju zajedno, tada se sporije (sjeverna polutka) i brže (južna polutka) brzine međusobno poništavaju te nema značajnijeg



**Slika 4.12.:** Rezidualne rotacijske brzine za automatski skup podataka (SOHO/EIT). Brzine su izražene u  $\text{m s}^{-1}$ .

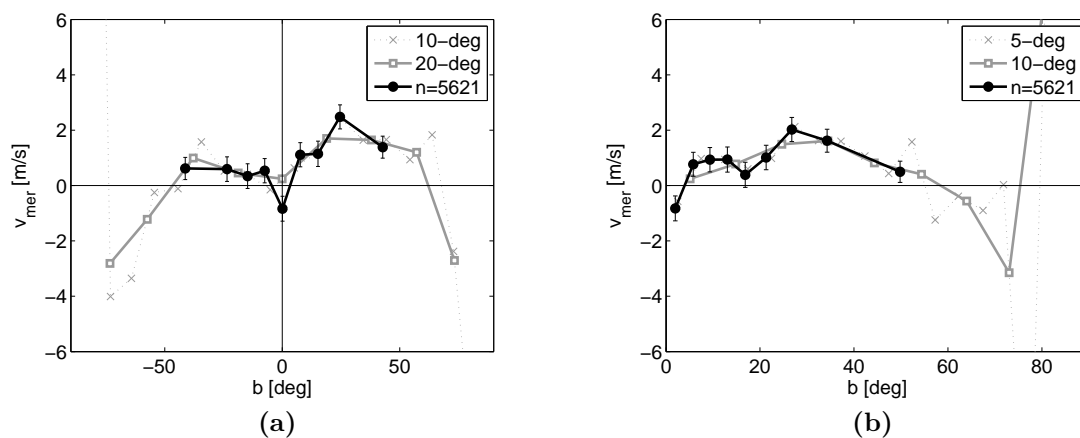
odstupanja od srednjeg profila rotacije.

Slika 4.12 prikazuje rezidualne rotacijske brzine u ovisnosti o vremenu i heliografskoj širini. Pojedinačna mjerenja su aproksimirana plohom čija se glatkoća može parametarski kontrolirati. Ne primjećuje se uzorak torzionih oscilacija niti bilo kakva druga pravilnost.

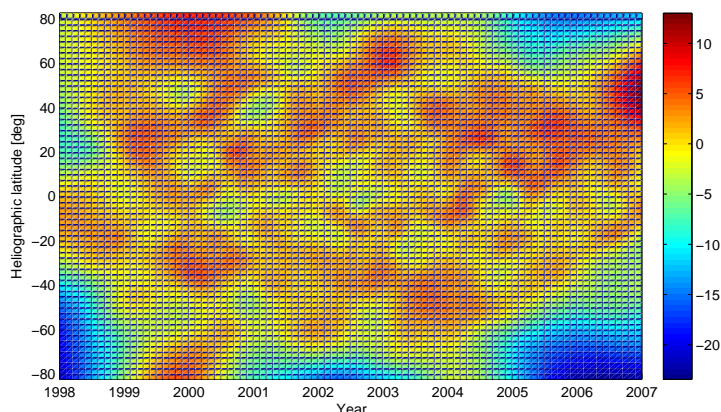
### 4.2.3. Meridijanska gibanja

Latitudinalni profil izmjerenih meridijanskih gibanja za automatski skup podataka prikazan je na slici 4.13.

Za razliku od rezultata mjerenja iz položaja pjega gdje je meridijanski tok usmjeren



**Slika 4.13.:** Ovisnost meridijanskih brzina o heliografskoj širini za obje polutke Sunca uzete (a) posebno i (b) zajedno. Vrijednosti su usrednjene u skupinama od 5 do 20 stupnjeva po heliografskoj širini te po skupinama koje obuhvaćaju jednak broj mjerenja.



**Slika 4.14.:** Meridijanske brzine za automatski skup podataka (SOHO/EIT). Brzine su izražene u  $\text{m s}^{-1}$ .

prema srednjoj latitudi aktivnosti, ovdje je tok usmjeren prema polovima na obje polutke s mogućim okretanjem smjera tek na vrlo visokim širinama. Također je zanimljivo moguće postojanje toka preko ekvatora, od sjevera prema jugu reda veličine  $1 \text{ m s}^{-1}$ , ali teško je to pouzdano reći s obzirom da su pogreške pojedinačnih mjerenja nekoliko puta veće.

Ako se pogleda ovisnost meridijanskih brzina o vremenu i heliografskoj širini (slika 4.14), također se vidi dominantni tok prema polovima bez neke određene pravilnosti osim moguće blage latitudinalne varijacije područja najbržeg toka.

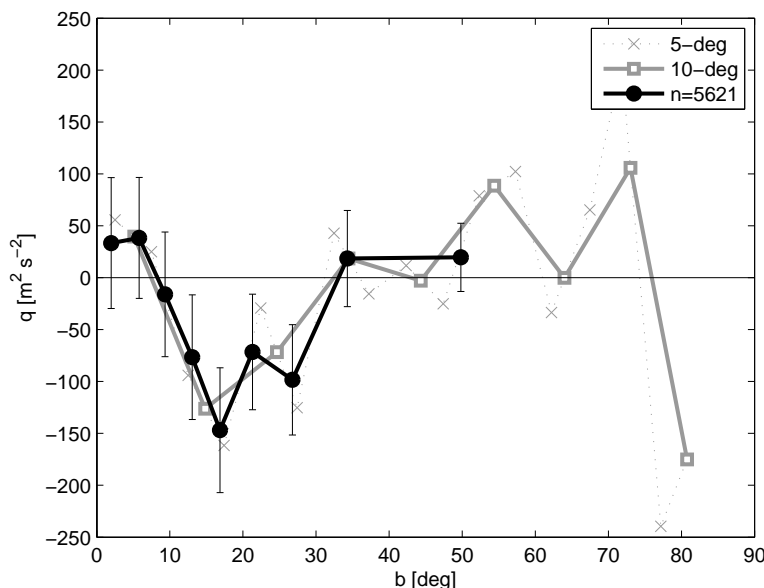
### 4.2.4. Korelacija brzina i Reynoldsova napetost

Koeficijent korelacije rezidualnih rotacijskih i meridijanskih brzina iznosi tek  $-0.0089$  što je za red veličine manji iznos od onog iz mjerenja položaja pjega, ali je također negativan što upućuje na prijenos momenta količine gibanja prema ekvatoru. Aproksimacija mjerenja pravcem daje:

$$v_{mer} = (-0.0025 \pm 0.0013) \cdot \Delta v_{rot} + (0.82 \pm 0.14) \text{ m s}^{-1}. \quad (4.8)$$

Koeficijent pravca je negativan uz  $1\sigma$  pouzdanost. Na slici 4.15 je prikazana latitudinalna ovisnost kovarijanci brzina tj. Reynoldsove napetosti. Iako su iznosi ponovo za red veličine manji od onih iz mjerenja položaja pjega ili iz podataka interaktivne metode (Vršnak et al., 2003), profil je vrlo sličan navedenima. Iznosi kovarijanci se kreću od  $\sim 0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  na ekvatoru, zatim opadaju s porastom heliografske širine dostižući minimum od  $-150 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  na oko  $20^\circ$  te se ponovno vraćaju prema nuli na višim širinama.

Ovako mali iznos kovarijanci i korelacije je najvjerojatnije posljedica prerestriktivnog filtriranja kod automatske metode kako bi se izbjegla pogrešna identifikacija objekata.



**Slika 4.15.:** Ovisnost kovarijanci brzina o heliografskoj širini za obje polutke zajedno. Mjerenja su usrednjena po skupinama podataka 5 i 10° širine u latitudi (sive linije) te po skupinama s jednakim brojem mjerenja (crna linija).

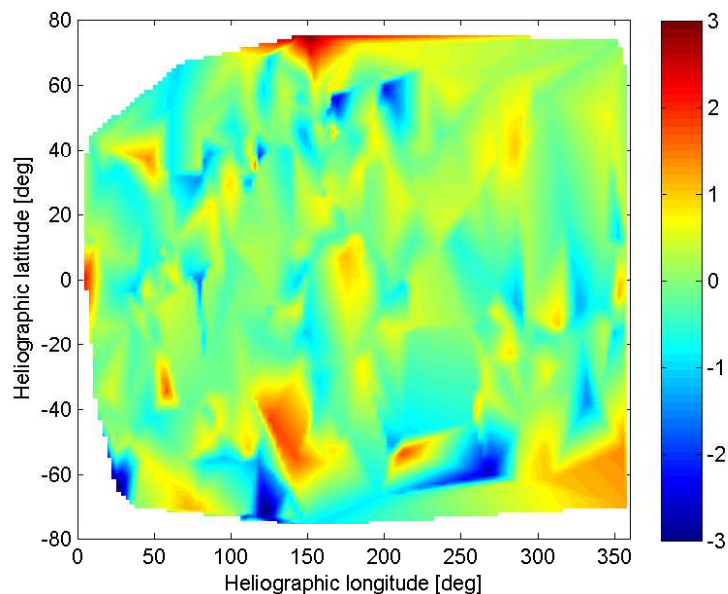
Naime, rotacijske brzine su ograničene unutar samog algoritma automatske metode, a zatim su još i naknadno filtrirane s obzirom na srednji profil rotacije. To se odrazilo i na iznose rezidualnih rotacijskih brzina. Za meridijanske brzine je korišten samo jedan manje restriktivan filter. Sve to je konačno utjecalo na iznose Reynoldsove napetosti, ali ne i na latitudinalni profil. Dakle, rezultati automatske metode za rezidualna rotacijska i meridijanska gibanja, kao i iznosi Reynoldsove napetosti kvalitativno odgovaraju ostalim rezultatima, ali ne i kvantitativno.

#### 4.2.5. Osno-nesimetrična meridijanska gibanja

Iz interaktivnog skupa podataka SOHO/EIT moguće je analizirati osno-nesimetrična meridijanska gibanja. Za period od jedne rotacije Sunca promatra se ovisnost meridijanskih brzina o heliografskoj širini i dužini. Jedan takav rezultat prikazan je na slici 4.16.

Podaci su usrednjeni za dva mjeseca, listopad i studeni 1999., kako bi se dobio veći broj mjerenja (ukupan broj praćenih koroninih svijetlih točaka je bio 370), a kako bi slika što vjernije odražavala trenutno stanje brzina na Suncu, nije se išlo na usrednjavanje podataka iz više mjeseci.

Primjećuje se da meridijanska gibanja ne pokazuju pravilnost s heliografskom dužinom niti širinom, već postoje nejednoliko raspoređena lokalna područja s gibanjima suprotnih smjerova, koja najvjerojatnije odražavaju raspored divoskih ćelija, aktivnih područja i



**Slika 4.16.:** Osno-nesimetrična meridijanska gibanja za period listopad-studeni 1999. (SOHO/EIT, interaktivna metoda). Iznosi brzina su u  $\text{m s}^{-1}$ , pozitivne brzine su prema polovima, a negativne prema ekvatoru na obje polutke.

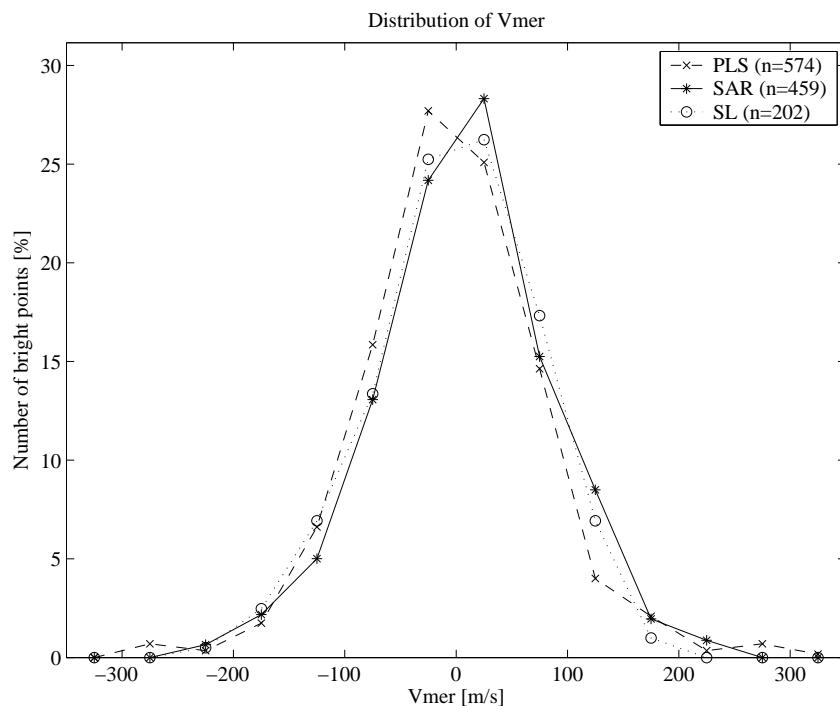
koronarnih šupljine. Samim time uzorak gibanja se mijenja iz mjeseca u mjesec, nestajanjem jednih aktivnih područja i pojavljivanjem drugih. Također je evidentna asimetrija sjeverne i južne polutke. Takva promjenjiva meridijanska gibanja su od važnosti kod detekcije planeta oko drugih zvijezda jer, ako se ne uzmu u obzir, mogla bi dovesti do lažnih detekcija (Beckers, 2007).

## 4.2.6. Vlastita gibanja koroninih svijetlih točaka

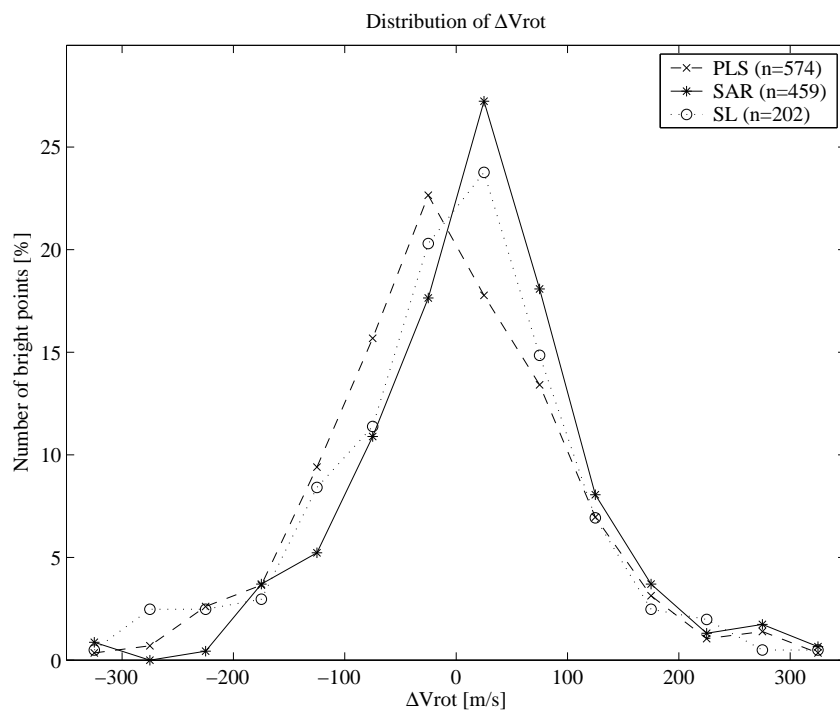
### 4.2.6.1. Raspodjele brzina

Na slikama 4.17-4.20 prikazane su raspodjele brzina koroninih svijetlih točaka (data set 1, interaktivna metoda). Na slici 4.17 je prikaz raspodjele meridijanskih brzina za tri tipa svijetlih točaka (PLS, SL i SAR). Pozitivne brzine označavaju gibanje prema polovima, a negativne prema ekvatoru. Raspodjela je vrlo slična za sva tri tipa svijetlih točaka s tek malom razlikom u položaju vrhova - PLS tip je na negativnoj strani brzina, a SAR na pozitivnoj.

Slika 4.18 također prikazuje raspodjelu brzina za sva tri tipa svijetlih točaka, ali ovaj put za rezidualne rotacijske brzine, izračunate oduzimanjem srednjeg profila rotacije od izmjerenih rotacijskih brzina. Pozitivne vrijednosti predstavljaju gibanja brža od srednje brzine rotacije, a negativne sporija. Ponovno su raspodjele za sva tri tipa svijetlih točaka podjednake, ali ovaj put PLS tip ima nešto naglašenije pomaknut profil prema negativnim

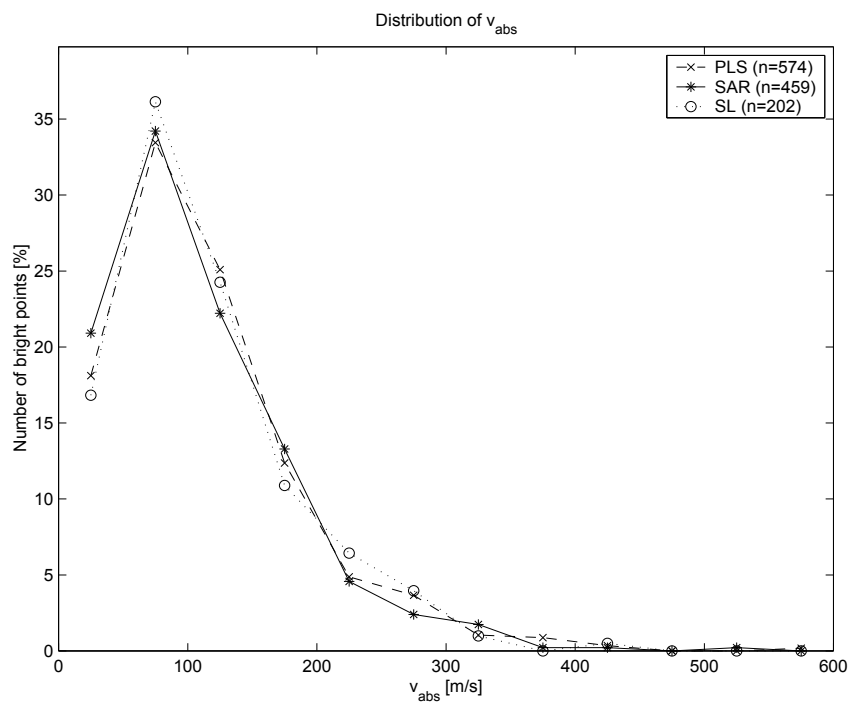


**Slika 4.17.:** Raspodjela meridijanskih brzina za tri tipa koroninih svijetlih točaka interaktivnog skupa podataka (data set 1). Pozitivne brzine su prema polovima.

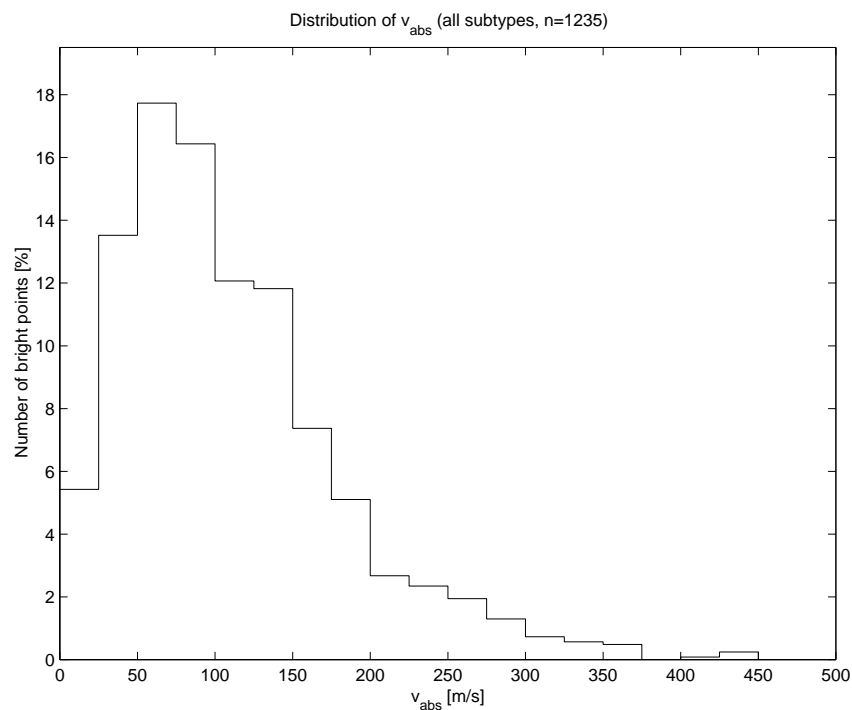


**Slika 4.18.:** Raspodjela rezidualnih rotacijskih brzina za tri tipa koroninih svijetlih točaka interaktivnog skupa podataka (data set 1). Pozitivne brzine označavaju gibanja brža od prosječne brzine rotacije.

#### 4. Podaci i rezultati



Slika 4.19.: Raspodjela apsolutnih brzina za tri tipa koroninih svijetlih točaka interaktivnog skupa podataka (data set 1).



Slika 4.20.: Raspodjela apsolutnih brzina za sve tipove koroninih svijetlih točaka uzete zajedno (interaktivni skup, data set 1).

**Tablica 4.4.:** Srednje vrijednosti brzina, standardne devijacije ( $\sigma$ ) i standardne pogreške ( $M = \sigma/\sqrt{n}$ ) prema tipu svijetlih točkaca.  $n$  je broj svijetlih točkaca. Pozitivne meridijanske brzine su prema polovima, a pozitivne rezidualne rotacijske brzine označavaju gibanja brža od srednje brzine rotacije.

	$v_{mer}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$n$	$\sigma$ [m s <sup>-1</sup> ]	$M$ [m s <sup>-1</sup> ]
Točkaste strukture (PLS)	-3.86	574	79.39	3.31
Mala aktivna područja (SAR)	6.80	459	76.99	3.59
Male petlje (SL)	-0.15	202	73.69	5.18
Svi skupa	0.71	1235	77.68	2.21
	$\Delta v_{rot}$	$n$	$\sigma$	$M$
Točkaste strukture (PLS)	-9.82	574	110.36	4.61
Mala aktivna područja (SAR)	17.48	459	102.40	4.78
Male petlje (SL)	-9.70	202	108.37	7.63
Svi skupa	0.35	1235	107.86	3.07
	$v_{abs}$	$n$	$\sigma$	$M$
Točkaste strukture (PLS)	113.20	574	75.22	3.14
Mala aktivna područja (SAR)	108.09	459	71.11	3.32
Male petlje (SL)	110.91	202	70.05	4.93
Svi skupa	110.93	1235	72.86	2.07

brzinama. SAR i SL pokazuju gotovo međusobno identičan profil. Također se vidi da je raspodjela nešto šira i niža od one za meridijanska gibanja, što govori o većem raspršenju izmjerenih iznosa rezidualnih rotacijskih brzina u odnosu na meridijanske.

Konačno, obje komponente gibanja svijetlih točkaca su kombinirane u apsolutnu brzinu:

$$v_{abs} = \sqrt{v_{mer}^2 + \Delta v_{rot}^2}. \quad (4.9)$$

Raspodjela apsolutnih brzina svijetlih točkaca prikazana je prema tipu na slici 4.19 te skupno za sva tri tipa i sa finijim korakom usrednjavanja na slici 4.20. Obje raspodjele pokazuju da tipične apsolutne brzine iznose oko 100 m s<sup>-1</sup> za sva tri tipa svijetlih točkaca, ali da ima i mali broj detektiranih točkaca s brzinama većim od 400 m s<sup>-1</sup>. Razlike u raspodjeli apsolutnih brzina prema tipu svijetlih točkaca praktički nema.

Tipične pogreške pojedinačnih izmjerenih brzina su u rasponu 0.0005 – 1.0° dan<sup>-1</sup> za rotacijske brzine (uz tek nekoliko slučajeva pogreški većih od u 1.0° dan<sup>-1</sup>), te u 0.0005 – 0.5° dan<sup>-1</sup> za meridijanske (što odgovara 0.0072 – 72.0 m s<sup>-1</sup>) uz rijetke slučajeve s pogreškama u rasponu 0.5 – 2.0° dan<sup>-1</sup>.

U tablici 4.4 izlistane su srednje vrijednosti meridijanske brzine, rezidualne rotacijske brzine i apsolutne brzine, te broj svijetlih točkaca, standardne devijacije i standardne pogreške za raspodjelu brzina koroninih svijetlih točkaca. Može se primijetiti da su razlike između tipova svijetlih točkaca izraženije kod meridijanskih i rotacijskih brzina, nego kod



apsolutnih brzina.

### 4.2.6.2. Vrijeme života

Vrijeme života koroninih svijetlih točaka je procijenjeno iz ukupnog broja uzastopnih snimaka na kojima su one identificirane. Broj snimaka na kojima se pratio objekt je namjerno ograničen u data setu 1, dok je u data setu 2 objekt praćen do svog nestanka. Na slici 4.21 prikazana je raspodjela vremena života svijetlih točaka za data set 2. Vrijeme života je izračunato prema:

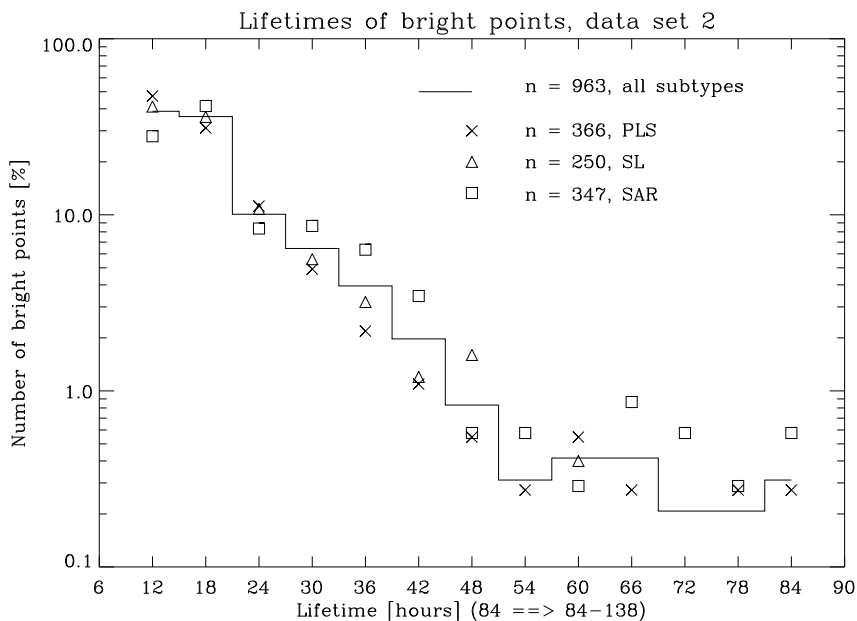
$$\tau = (m - 1) \times 6 \text{ [sati]}, \quad (4.10)$$

gdje je  $m$  broj uzastopnih snimaka na kojima je objekt praćen. Snimci su većinom rađeni u razmaku od 6 sati, u oko 5% slučajeva je taj period bio oko 12 sati (i samo rijetko duži), tako da je vrijeme života vjerojatno ponešto podcijenjeno.

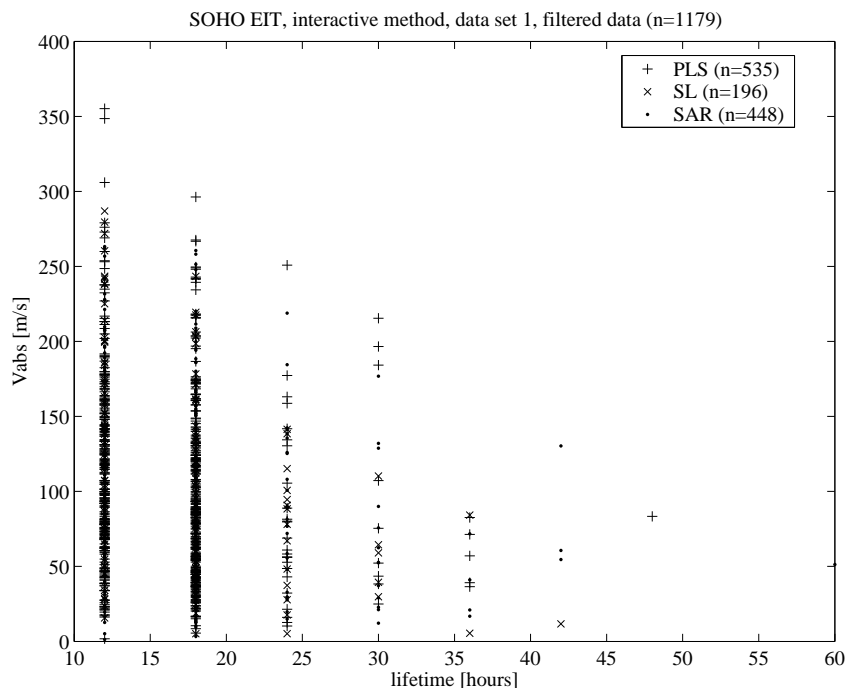
Histogram na slici 4.21 pokazuje eksponencijalni pad broja svijetlih točaka s vremenom života od 12 sati pa prema 54 sata, praćen s „repom“ dugoživućih točaka sve do 138 sati. Malo prije početka „repa“ postoji indikacija sekundarnog maksimuma s vremenima života između 60 i 66 sati. Opaženo eksponencijalno ponašanje raspodjele vremena života su također priopćili McIntosh i Gurman (2005).

Otpriblike 98% svijetlih točaka ima vremena života između 12 i 54 sata. Iako je broj podataka s vremenom života većim od 54 sata relativno mali, može se primjetiti da mala aktivna područja (SAR) imaju dulji „rep“ i u prosjeku duža vremena života od PLS i SL tipova. Treba istaći da poneke male strukture s dimenzijama manjim od 4 Mm žive puno kraće, s eksponencijalnom raspodjelom vremena života do 12 sati (J.-F. Hochedez, privatna komunikacija; McIntosh i Gurman, 2005).

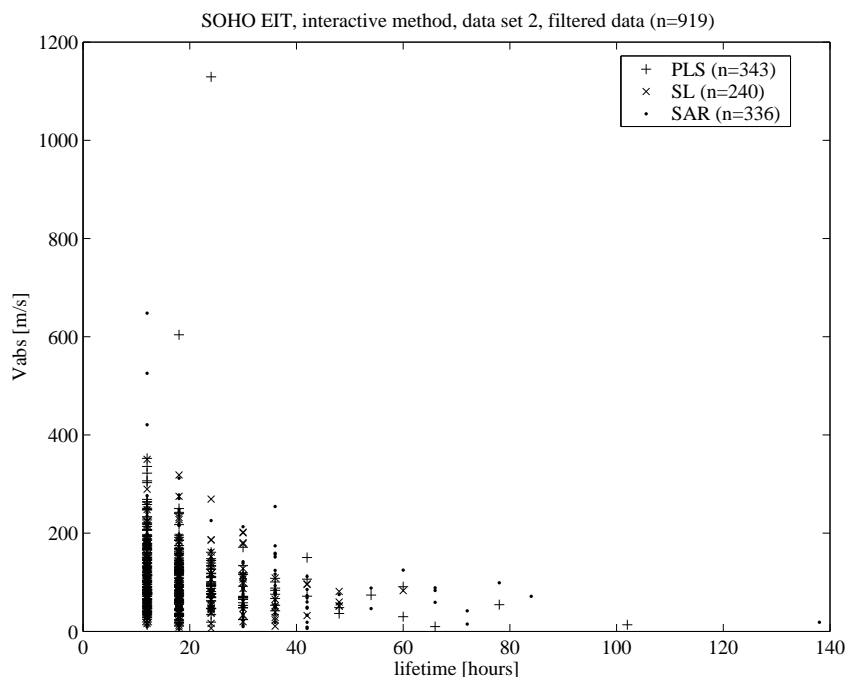
Donja granica raspodjele na slici 4.21 određena je mjernom procedurom u kojoj su svijetle točke praćene na najmanje 3 uzastopna snimka. Koronine svijetle točke opažane u mekom rentgenskom dijelu spektra zračenja u misiji Skylab, imale su vrijeme života između 2 i 45 sati s maksimumom raspodjele na 8 sati (Golub et al., 1974, 1976; Golub i Pasachoff, 1997), dok su točke opažane na 19.5 nm s instrumentom EIT (SOHO) imale vremena života između 5 i 40 sati, s maksimumom broja na 20 sati (Zhang et al., 2001). Profili tih distribucija su se međusobno razlikovali. Zhang et al. (2001) su pretpostavili da su duža vremena EIT svijetlih pjega u odnosu na Skylab zbog višeg temperaturnog praga za vidljivost struktura u mekom rentgenskom zračenju. Niži prag temperature u EUV području omogućava dužu vidljivost svijetlih točaka. Također je zanimljivo primijetiti da sva tri histograma vremena života svijetlih točaka (Golub et al., 1974; Zhang et al., 2001; slika 4.21) imaju mali sekundarni maksimum u području dugoživućih struktura. Ipak, pozicije tih maksimuma se razlikuju: na 35 – 45 sati (Golub et al., 1974), na 40 sati



**Slika 4.21.:** Vrijeme života koroninih svijetlih točaka interaktivnog skupa podataka (data set 2). Puna linija predstavlja raspodjelu svijetlih točaka za sva tri tipa zajedno. Raspodjele za pojedinačne tipove svijetlih točaka su prikazane različitim simbolima (kako je naznačeno u legendi). Vrijeme života je dato u satima, a broj točaka u postocima ukupnog broja. Zadnji unos (84 sata) se odnosi na sva duža vremena života, od 84 do 138 sati, koliko iznosi najduže vrijeme.



**Slika 4.22.:** Korelacija apsolutne brzine koroninih svijetlih točaka i njihovog vremena života za sva tri tipa pojedinačno (data set 1) .



**Slika 4.23.:** Korelacija apsolutne brzine koroninih svijetlih točaka i njihovog vremena života za sva tri tipa pojedinačno (data set 2) .

(Zhang et al., 2001) i na oko 60 sati (slika 4.21). Također se u McIntosh i Gurman (2005) može zamijetiti fina struktura u dijelu raspodjele s vremenima života sjajnih točaka većim od 50 sati.

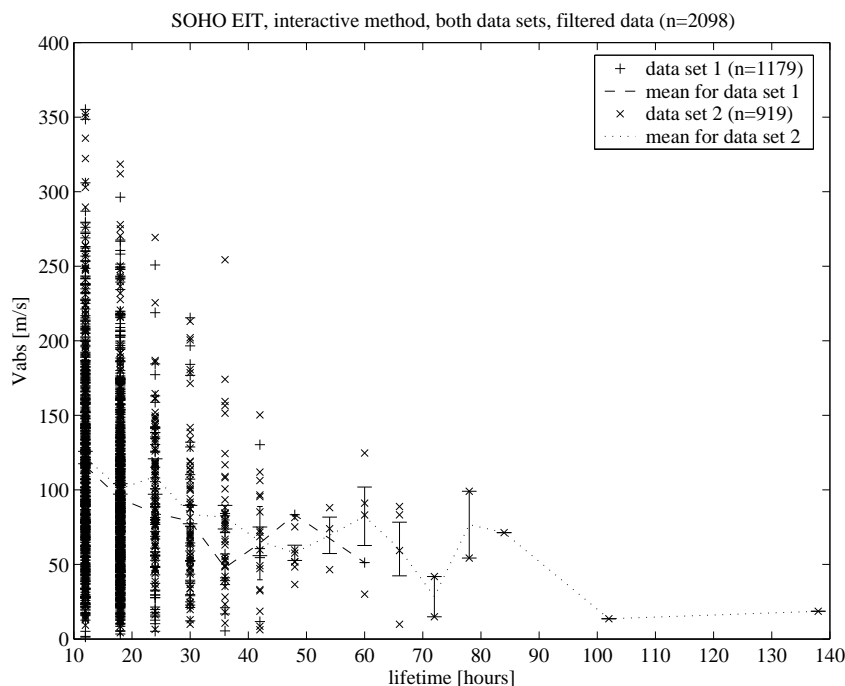
SAR tip sjajnih točaka očito ima duže vrijeme života od ostala dva tipa, PLS i SL. Pošto SAR tip ima i veće površine, to je u skladu s proporcionalnosti između vremena života i površina magnetskih kompleksa (Harvey-Angle, 1993).

#### 4.2.6.3. Srednji slobodni put

U nastavku se analizira kretanje koroninih svijetlih točaka uz pretpostavku nasumičnog (slučajnog) hoda gdje se magnetski elementi tretiraju kao „atomi“ (Leighton, 1964). Srednji slobodni put  $l$  se obično opisuje kao srednja udaljenost koju molekula prijeđe između dva sudara (Feynman, 1963). Definiran je umnoškom srednjeg vremena između sudara,  $\tau$ , i srednjom brzinom,  $v$ :

$$l = \tau \times v. \quad (4.11)$$

Ovaj koncept je generaliziran na čestice u polju sile, npr. nabijene čestice u magnetskom polju (Wibberenz, 1973). U ovom radu se taj koncept primjenjuje na koronine svijetle točke gdje je srednji slobodni put umnožak tipičnog vremena života i tipične apsolutne brzine svijetle točke, koje se u tom slučaju promatraju kao „čestice“, u smislu kako je navedeno u Leighton (1964). Koncept nasumičnog hoda uspješno je primijenjen na različite



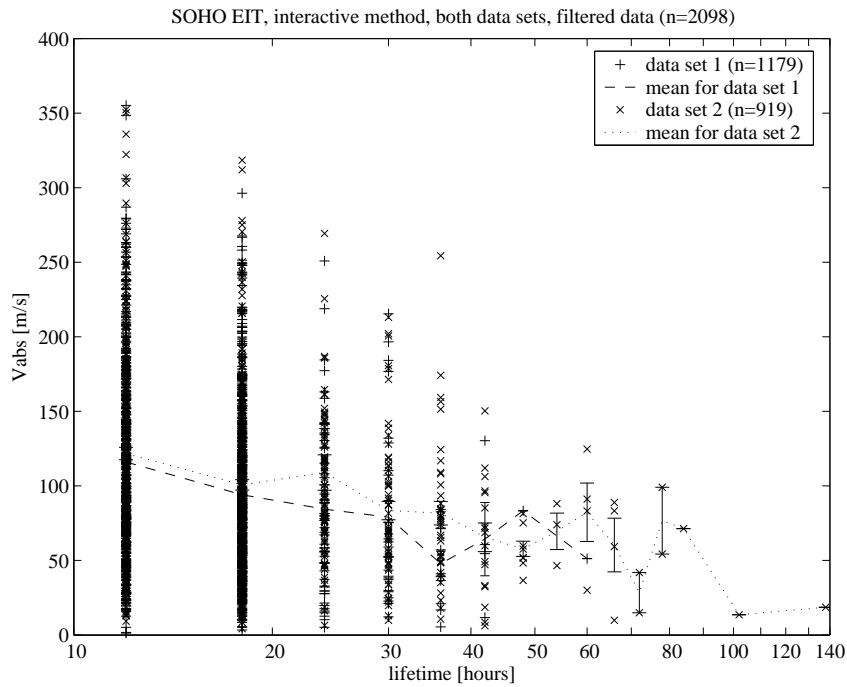
**Slika 4.24.:** Ovisnost apsolutne brzine koroninih svijetlih točaka o njihovom vremenu života za data set 1 i 2. Crtkana linija označava srednju vrijednost podataka za data set 1, a točkasta linija za data set 2.

probleme fizike Sunca (Sheeley et al., 1987; Wang i Sheeley, 1994; Hagenaar et al., 1999; Hathaway, 2005).

Iz slika 4.20 i 4.21 može se očitati tipično vrijeme života,  $\tau = 12 - 18$  sati i tipična apsolutna brzina,  $v_{abs} = 50 - 70 \text{ m s}^{-1}$ , što daje vrijednost srednjeg slobodnog puta,  $l \approx 3000 \text{ km}$ . U oba slučaja se uzela maksimalna vrijednost iz raspodjela. Međutim, može se postaviti pitanje da li duže živuće svijetle točke postignu veće brzine, što nas navodi na istraživanje ovisnosti  $v_{abs}(\tau)$ . Ova ovisnost je prikazana na slici 4.22 za data set 1 i na slici 4.23 za data set 2. Također, podaci oba skupa podataka (data set 1 i 2) su kombinirani i prikazani na slikama 4.24 i 4.25. Raspršenost točaka na slikama nam govori da dugoživuće sjajne točke nemaju velike iznose apsolutnih brzina. To je dijelom i zbog smanjenih pogreški kad se brzina određivala iz više položaja sjajnih točaka s dužim vremenom života.

Iz slike 4.24 se ponovno mogu procijeniti srednje apsolutne brzine za zadano vrijeme života:  $v_{abs} = 120 \text{ m s}^{-1}$ ,  $\tau = 12 \text{ h}$  što daje  $l \approx 5200 \text{ km}$ ;  $v_{abs} = 80 \text{ m s}^{-1}$ ,  $\tau = 30 \text{ h}$  što daje  $l \approx 8600 \text{ km}$ ;  $v_{abs} = 70 \text{ m s}^{-1}$ ,  $\tau = 60 \text{ h}$  što daje  $l \approx 15100 \text{ km}$ . Interesantno je primijetiti da svijetle točke s većim apsolutnim brzinama imaju u prosjeku kraće srednje slobodne puteve zbog kraćeg vremena života.

Dakle, srednji slobodni put koroninih svijetlih točaka je između 3000 km i 15000 km.



**Slika 4.25.:** Ovisnost apsolutne brzine koroninih svijetlih točaka o njihovom vremenu života za data set 1 i 2. Crtkana linija označava srednju vrijednost podataka za data set 1, a točkasta linija za data set 2. Slika je jednaka slici 4.24, samo je ovdje prikazana u log-normal obliku.

Donja granica je vjerojatno podcijenjena kako je prije spomenuto, stoga se može uzeti raspon od 5000 – 15000 km, uz vremena života od 12 i 60 sati. To je prilično iznad vrijednosti veličine piksela EIT instrumenta od 2.629 kutnih sekundi, što odgovara udaljenosti od oko 1800 km, nedaleko središta diska Sunca.

#### 4.2.6.4. Koeficijent difuzije nasumičnog hoda

Kombinacijom srednjeg slobodnog puta,  $l$ , i odgovarajućeg vremena života,  $\tau$ , određenih u prošlim potpoglavljima, može se odrediti koeficijent difuzije nasumičnog hoda,  $D$ , uzrokovan supergranularnim gibanjima. Koeficijent difuzije nasumičnog hoda definiran je izrazom (Wang i Sheeley, 1994; Hagenaar et al., 1999):

$$D = \frac{\langle l^2 \rangle}{4\tau}. \quad (4.12)$$

U tablici 4.5 su uspoređene vrijednosti ovog koeficijenta izračunatog iz SOHO/EIT podataka s drugim izvorima. Zanimljivo je da vrijednosti u rasponu  $\approx 150 - 250 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$  iz ovog rada vrlo dobro odgovaraju vrijednostima dobivenim iz praćenja koncentracija magnetskog toka na snimcima SOHO/MDI u duljem vremenskom periodu ( $\tau > 8$

**Tablica 4.5.:** Srednji slobodni put ( $l$ ), odgovarajuće vrijeme života ( $\tau$ ) i koeficijent difuzije nasumičnog hoda ( $D$ ). U gornjem dijelu tablice su rezultati mjerenja koroninih svijetlih točaka iz ovog rada, u sredini su rezultati mjerenja koncentracija magnetskih tokova na fotosferi, a u donjem dijelu rezultati različitih modela.

Izvor	$l$ [km]	$\tau$ [h]	$D$ [km <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
Ovaj rad	5200	12	160
Ovaj rad	8600	30	170
Ovaj rad	15100	60	260
Hagenaar et al. (1999)		< 3	70-90
Hagenaar et al. (1999)		> 8	200-250
DeVore et al. (1985)			200-400
Wang (2004)			500-600

sati) (Hagenaar et al., 1999). Ipak, dobiveni koeficijent je znatno niži od pretpostavljene vrijednosti supergranularnih gibanja (Wang, 2004).

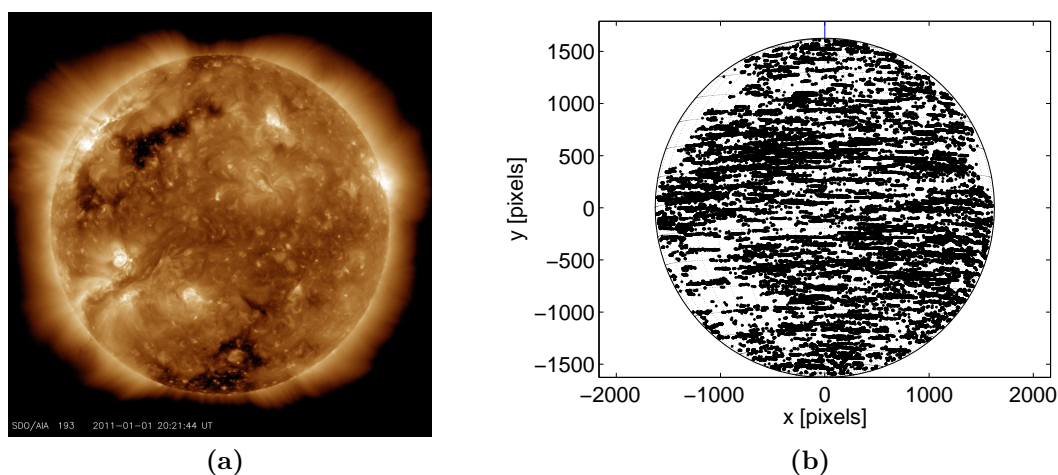
Koronine svijetle točke predstavljaju magnetske elemente usidrene u fotosferi koji se lako opažaju i prate. Iz tog razloga svijetle točke su pogodne za istraživanje magnetske difuzije iako postoje i alternativne interpretacije gibanja svijetlih točaka koja se razlikuju od pretpostavke difuzije (Longcope et al., 2001).

## 4.3. Solar Dynamics Observatory

### 4.3.1. Podaci

Ljubaznošću dr. Stevena H. Saara s Harvard-Smithsonian Centra za Astrofiziku, dobiveni su preliminarni podaci koji su rezultat automatske segmentacije snimaka s instrumenta AIA satelita SDO (Lemen et al., 2012). Algoritam segmentacije koristi sve dostupne kanale AIA instrumenta u potrazi za lokalnim pojačanjima intenziteta u dalekom ultraljubičastom (EUV) i rentgenskom dijelu spektra u odnosu na lokalnu pozadinu, uz zadani prag i kriterije veličine. Zatim se izračunavaju razni parametri poput  $x$  i  $y$  centroida, površine, intenziteta u raznim kanalima/filtrima, opsega, itd. Algoritam je opisan u Martens et al. (2012), a pojedini dijelovi algoritma se i dalje dotjeruju (S. Saar, privatna komunikacija).

Konačni skup preliminarnih podataka se sastoji od 66842 mjerenja 13646 koroninih svijetlih točaka s kalibriranih slika instrumenta AIA, pokrivajući dva uzastopna dana 01. i 02. siječnja 2011., s kadencom od 10 minuta. Slika 4.26 prikazuje sliku Sunca snimljenu u kanalu 193 nm instrumentom AIA te raspodjelu detektiranih svijetlih točaka s ucrtanim diskom Sunca kako bi to izgledalo na detektoru i svim mjerenjima unutar ta dva dana.



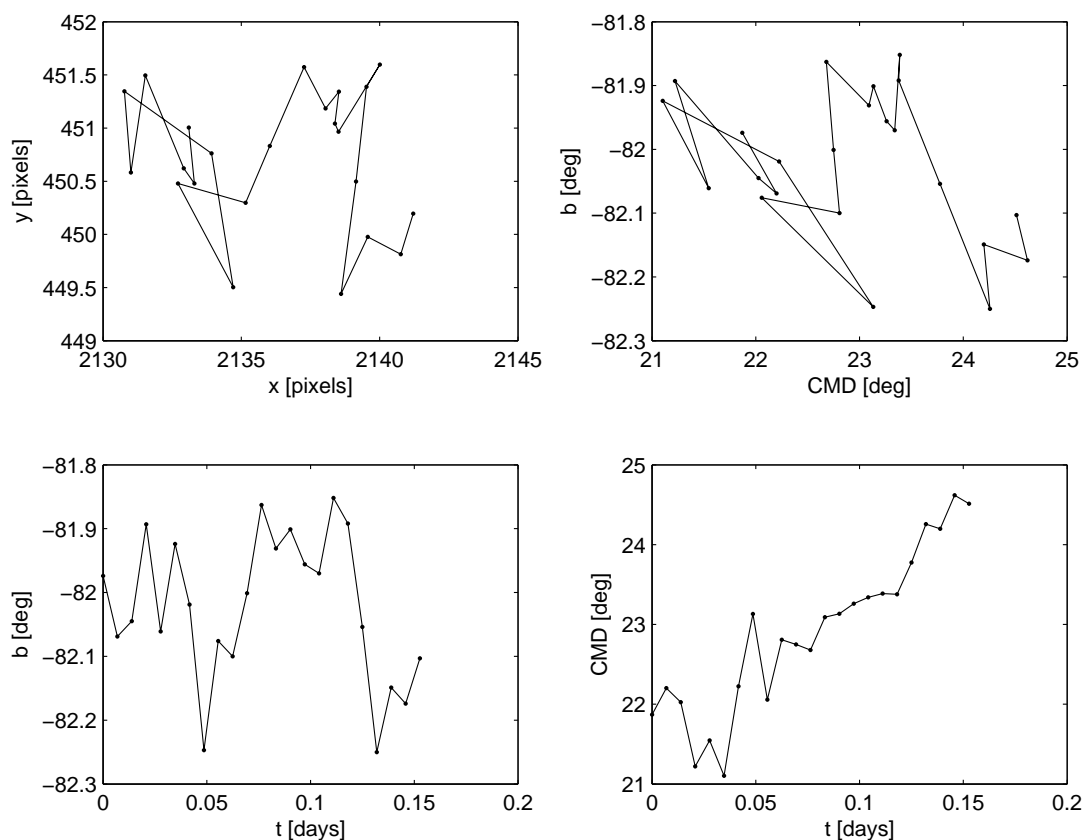
**Slika 4.26.:** Usporedba slike Sunca (a) snimljene u kanalu 193 nm 1. siječnja 2011. oko 20h UT i (b) prikaza diska Sunca s označenim mjerenjima detektiranih koroninih svijetlih točaka u periodu 1.-2. siječnja 2011. Ljubaznošću NASA/SDO/AIA.

Primijećuju se područja slabije nastanjenosti svijetlim točkama koja odgovaraju aktivnim područjima gdje zaista ima manje svijetlih točaka, a dijelom i zato jer ih algoritam nije uspio detektirati zbog prevelikog intenziteta aktivnih područja.

### 4.3.2. Profil diferencijalne rotacije

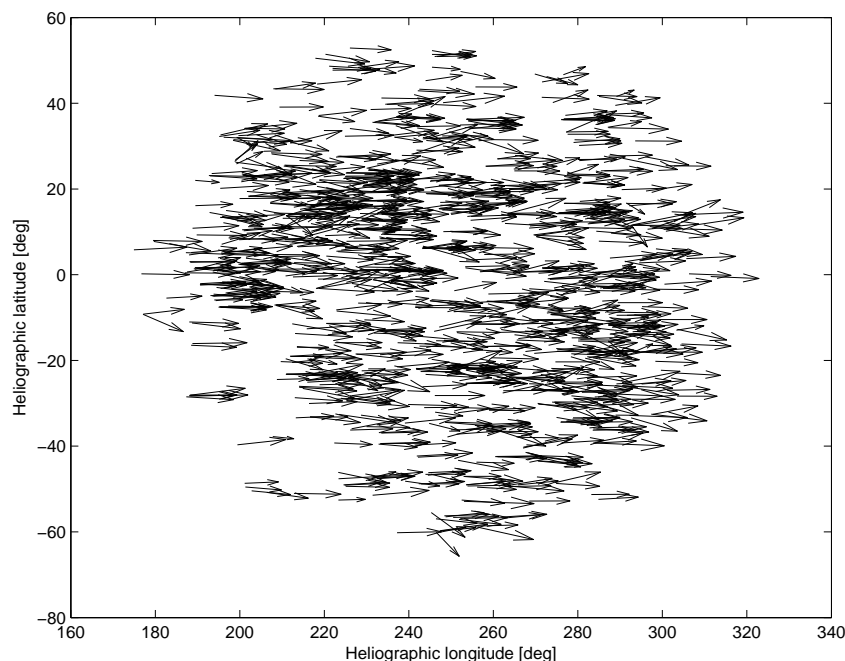
Iz podataka o položajima koroninih svijetlih točaka ( $x$ ,  $y$  centroidi u pikselima) izračunate su heliografske korodinate transformacijom iz helioprojektivnog sustava koristeći udaljenost Sunca specificiranu u zaglavlju slika (ključne riječi u FITS zaglavlju, vidi Dodatak A). Na slici 4.27 prikazan je niz mjerenja položaja za jednu svijetlu točku detektiranu navedenim algoritmom. Gornja lijeva slika prikazuje kretanje centroida svijetle točke u piksel koordinatama u periodu od oko 3.5 sata. Primjećuje se dosta nepravilno kretanje koje je rezultat varijacije u sjaju i strukturi svijetle točke što utječe na izračunavanje centroida. Na gornjoj desnoj slici, isto kretanje je prikazano u heliografskom sustavu.

Međutim, ako se pogleda promjena heliografske širine i udaljenosti od središnjeg meridijana svijetle točke u vremenu (pod slike dolje lijevo i dolje desno na slici 4.27), vidi se da ipak ima neke pravilnosti, osobito u azimutalnom gibanju. Iz razloga što se kretanje svijetlih točaka prati s vrlo kratkim intervalom od 10 minuta, pomaci su vrlo mali i varijacija sjaja i strukture značajno utječe na pojedinačna mjerenja, ali ako se uzme dovoljan broj mjerenja koji se aproksimiraju pravcem, mogu se odrediti srednje brzine gibanja. Zato se koristio filter kojim su se iz ulaznog skupa podataka izbacile sve svijetle točke s brojem mjerenja manjim od 10, što otprilike odgovara pomaku od  $1^\circ$  na ekvatoru. Pretpostavlja



**Slika 4.27.:** Kretanje detektirane koronine svijetle točke na snimkama SDO/AIA. Gore lijevo: piksel koordinate; gore desno: heliografske koordinate (CMD je udaljenost od središnjeg meridijana); dolje lijevo: ovisnost heliografske širine o vremenu; dolje desno: ovisnost udaljenosti od središnjeg meridijana o vremenu. Heliografske koordinate su u stupnjevima, a vrijeme je izraženo u danima.



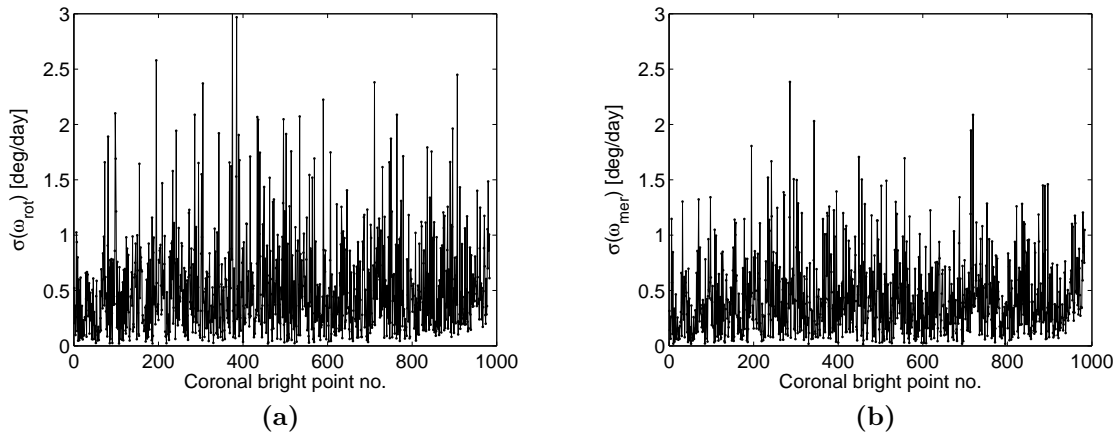


**Slika 4.28.:** Raspodjela koroninih svijetlih točaka s vektorima brzina, nakon filtriranja na udaljenost od središta diska i minimalni broj mjerenja. Većina točaka pokazuje dominantnu azimutalnu brzinu zbog rotacije Sunca.

se da je raspon od 100 minuta (koliko je potrebno za 10 mjerenja) dovoljan da se pokaže pravi trend kretanja svijetle točke.

Prije filtriranja po broju mjerenja, napravljeno je filtriranje s obzirom na udaljenost od središta Sunčeva diska ( $< 0.85$  polumjera diska) da bi se smanjili rubni efekti. Nakon ovih početnih filtriranja, broj koroninih svijetlih točaka je opao na 983 točke s 27044 mjerenja. Slika 4.28 prikazuje raspodjelu preostalih svijetlih točaka na površini Sunca s vektorima brzina. Većina svijetlih točaka ima dominantnu brzinu u azimutalnom smjeru koja je posljedica rotacije Sunca.

Kutne rotacijske i meridijanske brzine su izračunate linearnom regresijom izmjerenih položaja, a na brzine rotacije je primjenjena sinodičko-siderička korekcija. Podaci su zatim filtrirani po sideričkoj kutnoj brzini rotacije na  $8^\circ < \omega_{rot} < 19^\circ \text{ dan}^{-1}$  te po meridijanskoj kutnoj brzini na  $-4^\circ < \omega_{mer} < 4^\circ \text{ dan}^{-1}$  što je rezultiralo daljnjim smanjenjem broja koroninih svijetlih točaka na 906. Slika 4.29 prikazuje standardne pogreške izmjerenih kutnih rotacijskih i meridijanskih brzina, a uglavnom su iznosa manjeg od  $1^\circ \text{ dan}^{-1}$ , a ponegdje idu čak do  $3^\circ \text{ dan}^{-1}$ . Na slici 4.30 su te iste pogreške prikazane u ovisnosti o heliografskim koordinatama, tj. o položaju na površini Sunca. Ako se ta slika usporedi sa snimkom Sunca (slika 4.26) primjećuje se da veće pogreške (svjetlija područja) ugrubo odgovaraju aktivnim područjima što je vjerojatno posljedica dizajna algoritma detekcije svijetlih točaka. U aktivnim područjima imamo velike petlje i složene strukture koje



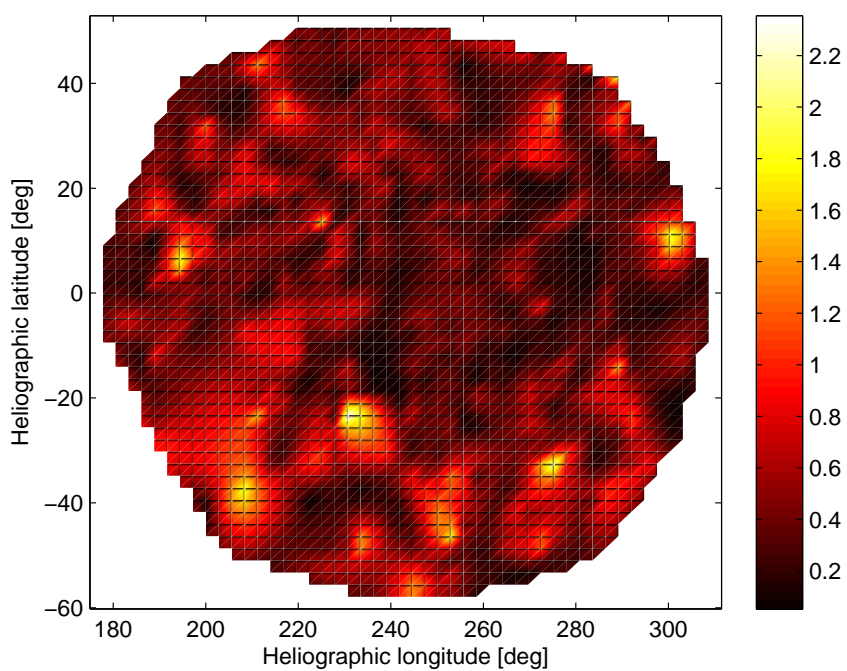
**Slika 4.29.:** Pogreške u kutnim rotacijskim (a) i meridijanskim (b) brzinama za pojedinačne svijetle točke.

ometaju rad algoritma.

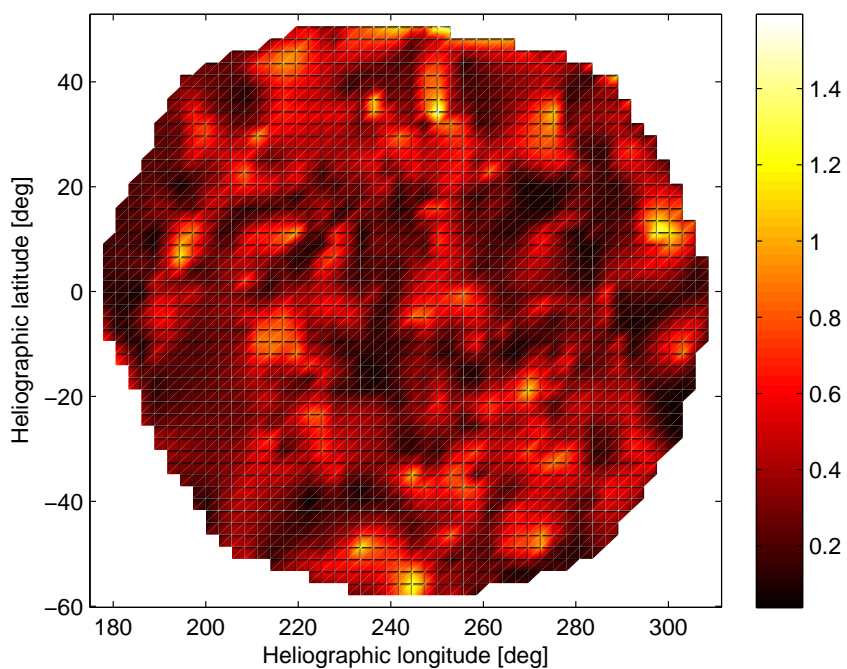
Srednji profil diferencijalne rotacije je izračunat iz izmjerenih kutnih rotacijskih brzina metodom najmanjih kvadrata. Dobiveni parametri rotacije izlistani u tablici 4.6. Parametri su izračunati za obje polutke zajedno i pojedinačno, s primjenom različitih kriterija na parametre da bi se izbjegao cross-talk. Čini se da je rotacija južne polutke nešto brža i diferencijalnija od sjeverne, ali su rezultati unutar  $1\sigma$  intervala pa se asimetrija ne može pouzdano potvrditi. Izmjerene brzine rotacije aproksimirane standardnim profilom ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) prikazane su na slici 4.31, a na slici 4.32 su uspoređeni profili rotacije uz razne

**Tablica 4.6.:** Parametri srednjeg profila diferencijalne rotacije Sunca dobiveni iz mjerenja gibanja koroninih svijetlih točaka sa SDO/AIA snimaka, za obje polutke zajedno i pojedinačno.

Kriterij	$A$ [ $^{\circ}$ dan $^{-1}$ ]	$B$ [ $^{\circ}$ dan $^{-1}$ ]	$C$ [ $^{\circ}$ dan $^{-1}$ ]	$n$
Obje polutke				
$A, B, C$	$14.47 \pm 0.10$	$0.6 \pm 1.0$	$-4.7 \pm 1.7$	906
$A, B = C$	$14.59 \pm 0.07$	$-1.35 \pm 0.21$	$-1.35 \pm 0.21$	906
$A, B, C = 0$	$14.62 \pm 0.08$	$-2.02 \pm 0.33$	0	906
Sjeverna polutka				
$A, B, C$	$14.43 \pm 0.13$	$0.8 \pm 1.5$	$-5.6 \pm 3.0$	461
$A, B = C$	$14.55 \pm 0.10$	$-1.35 \pm 0.35$	$-1.35 \pm 0.35$	461
$A, B, C = 0$	$14.57 \pm 0.10$	$-1.92 \pm 0.52$	0	461
Južna polutka				
$A, B, C$	$14.50 \pm 0.15$	$0.7 \pm 1.4$	$-4.8 \pm 2.3$	445
$A, B = C$	$14.65 \pm 0.11$	$-1.39 \pm 0.28$	$-1.39 \pm 0.28$	445
$A, B, C = 0$	$14.69 \pm 0.12$	$-2.14 \pm 0.45$	0	445

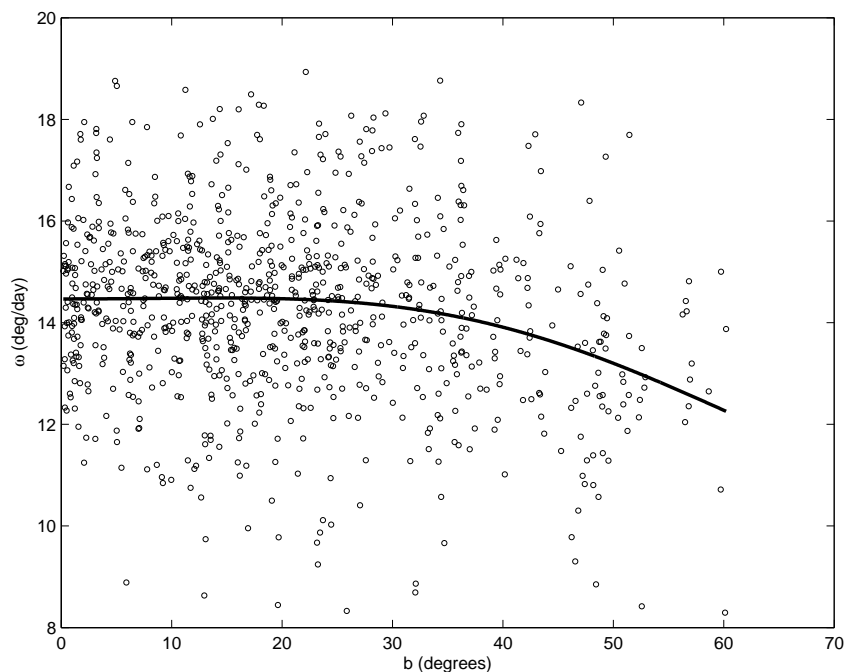


(a)

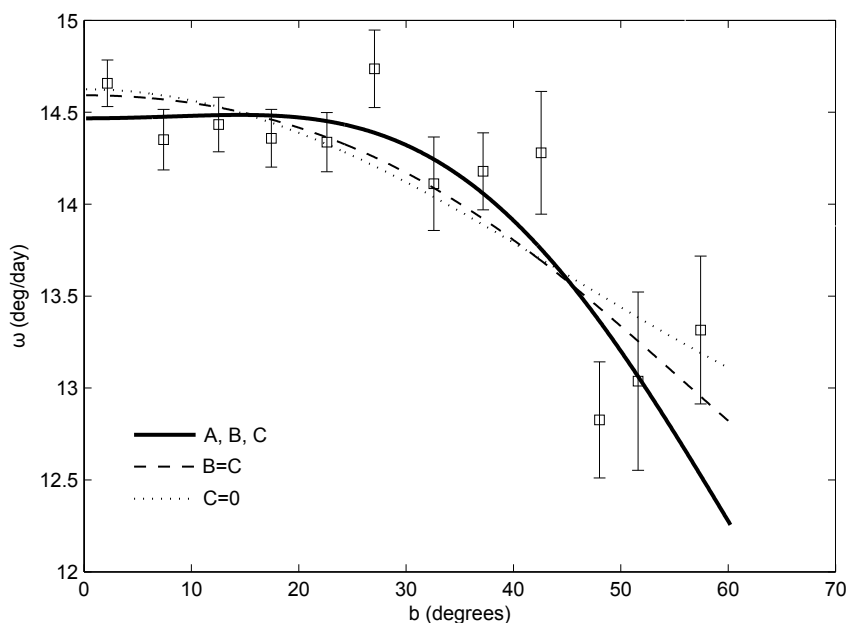


(b)

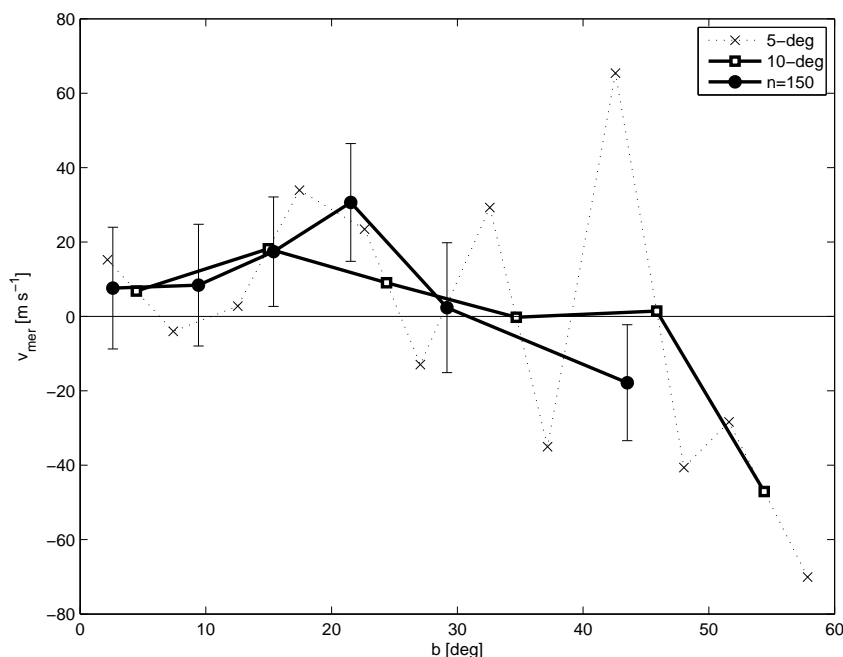
**Slika 4.30.:** Pogreške izmjerenih kutnih meridijanskih brzina (a) i rotacijskih brzina (b) u ovisnosti o položaju na Suncu. Iznosi brzina su u  $^{\circ} \text{ dan}^{-1}$ . Veće pogreške (svjetlija područja) ugrubo odgovaraju aktivnim područjima na Suncu (usporedi sa slikom 4.26).



**Slika 4.31.:** Profil diferencijalne rotacije Sunca iz podataka SDO/AIA. Kružićima su prikazani izmjereni podaci, a linija predstavlja aproksimaciju u smislu najmanjih kvadrata standardnim oblikom profila rotacije.



**Slika 4.32.:** Diferencijalna rotacija Sunca iz podataka SDO/AIA. Punom linijom je prikazana aproksimacija profilom uz sva tri parametra, crtkanom linijom je prikazana aproksimacija uz  $B = C$  te točkastom linijom uz  $C = 0$ . Također su prikazane srednje vrijednosti za područja širine po  $5^\circ$  u latitudi uz standardne pogreške.



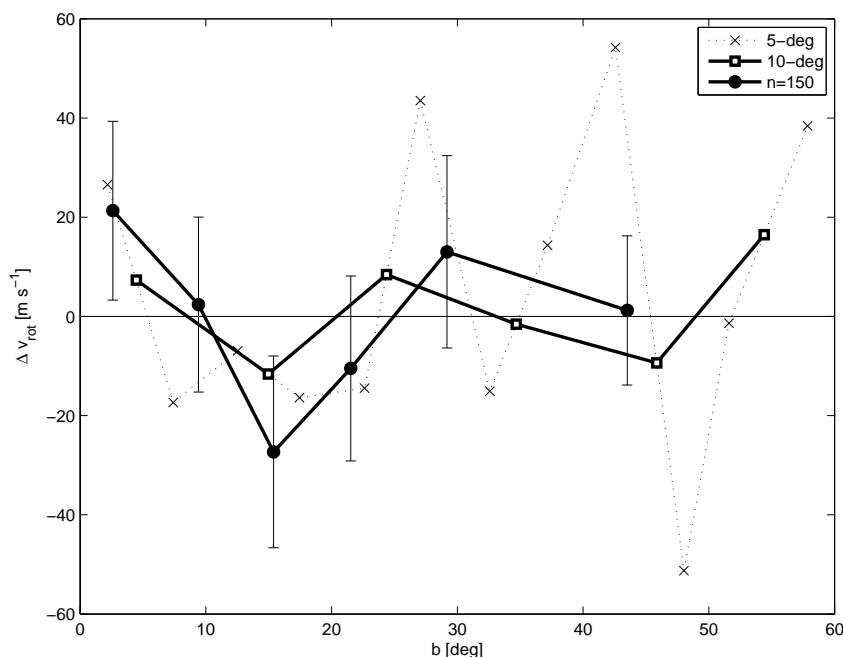
**Slika 4.33.:** Ovisnost meridijanskih brzina o heliografskoj širini. Izmjerene brzine su grupirane u područja po latitudi uz širine od  $5^\circ$  (crtkana linija),  $10^\circ$  (puna linija s kvadratićima) i područja s jednakim brojem podataka (puna linija kružićima).

kriterije na parametre.

### 4.3.3. Meridijanske i rezidualne rotacijske brzine

Oduzimanjem azimutalnih brzina od srednjeg profila rotacije (slika 4.31), određene su rezidualne rotacijske brzine. Korekcija visine nije dala smislene rezultate, vjerojatno zbog manjeg broja mjerenja i prevelike osjetljivosti metode na outliere. Stoga su kutne brzine preračunate u linearne meridijanske ( $v_{mer}$ ) i rezidualne rotacijske ( $\Delta v_{rot}$ ) brzine, uz uporebu polumjera Sunca,  $R_\odot$ . Meridijanskim brzinama na južnoj polutki je okrenut predznak kako bi pozitivne brzine bile prema polovima, a negativne prema ekvatoru.

Ovisnosti brzina o heliografskoj širini prikazane su na slici 4.33 za meridijanske te na slici 4.34 za rezidualne rotacijske brzine. Iako su pogreške dosta velike i zapravo se ne može isključiti mogućnost da su brzine jednake nuli, ipak neki trendovi postoje. Meridijanske brzine su prema polovima uz iznose oko  $10 \text{ m s}^{-1}$  na širinama blizu ekvatora, iznosi zatim rastu preko  $20 \text{ m s}^{-1}$  oko  $20^\circ$  širine da bi naglo opadale i promijenile smjer prema ekvatoru na  $30^\circ$  i nastavile rasti u iznosu na višim širinama. To bi značilo da su brzine prema središtu aktivnosti, budući da se početak 2011. podudara s ranom fazom ciklusa aktivnosti gdje se pjege pojavljuju na višim širinama. Ovaj rezultat se podudara s rezultatom analize Sunčevih pjega iz EGR kataloga.



**Slika 4.34.:** Ovisnost rezidualnih rotacijskih brzina o heliografskoj širini. Izmjerene brzine su grupirane u područja po latitudi uz širine od 5° (crtkana linija), 10° (puna linija s kvadratićima) i područja s jednakim brojem podataka (puna linija kružićima).

Rezidualne rotacijske brzine pokazuju bržu rotaciju od srednjeg profila na ekvatorskim područjima iznosa oko  $20 \text{ m s}^{-1}$ , zatim opadaju i na oko  $15 - 20^\circ$  širine dostižu minimum od  $20 \text{ m s}^{-1}$ , da bi na srednjim i višim širinama bile oko nule. Takva ovisnost rezidualnih rotacijskih brzina o heliografskoj širini je u skladu s drugim mjerenjima torzionih oscilacija (usporedi sa slikom 1.4), uzevši u obzir da se radi o ranoj fazi ciklusa aktivnosti.

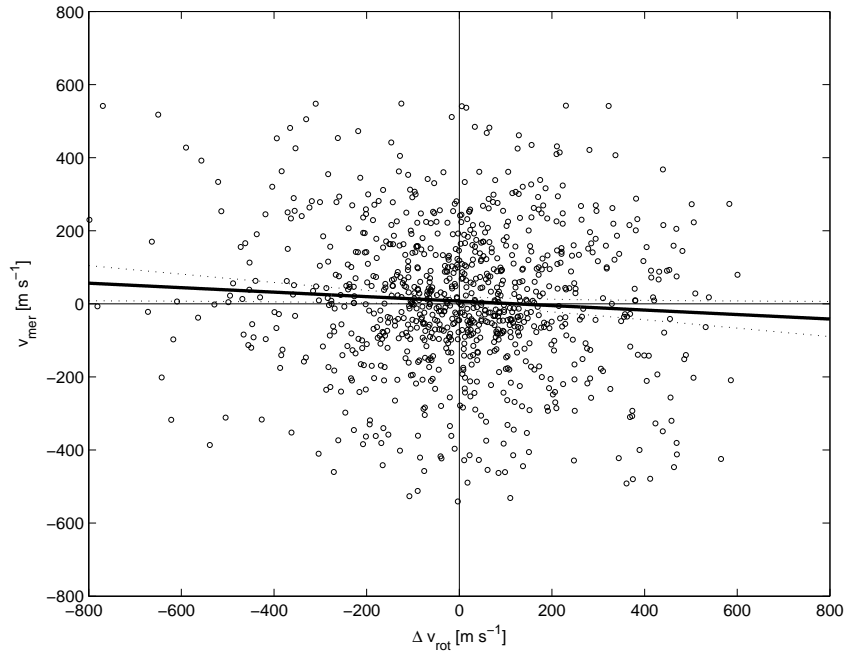
#### 4.3.4. Korelacije brzina i Reynoldsova napetost

Korelacija među brzinama ukazuje na postojanje Reynoldsove napetosti pa je idući korak izračunavanje koeficijenta korelacije između rezidualnih rotacijskih i meridijanskih brzina. Koeficijent korelacije iznosi  $-0.069$  uz vjerojatnost da je korelacija slučajna od 3.8% što znači da se pouzdano može reći da korelacija postoji. Da bi detaljnije istražili izmjerenu korelaciju, podaci su aproksimirani pravcem uz dobivene koeficijente:

$$v_{mer} = (-0.061 \pm 0.030) \cdot \Delta v_{rot} + (7.5 \pm 6.5) \text{ m s}^{-1}. \quad (4.13)$$

Na slici 4.35 je prikazan dobiveni pravac u odnosu na izmjerene podatke. Može se zaključiti da je korelacija značajna s  $2\sigma$  pouzdanošću. Negativna korelacija znači da koronine svijetle točke koje su brže od srednje rotacije zakreću prema ekvatoru, a sporije prema polovima, što se i očekuje kod prijenosa momenta količine gibanja prema ekvatoru

#### 4. Podaci i rezultati



**Slika 4.35.:** Korelacija između meridijanskih i rezidualnih rotacijskih brzina. Puna linija je pravac dobiven linearnom regresijom, a točkastim linijama su označene granice predviđanja (prediction bounds) uz 95% vjerovatnosti.

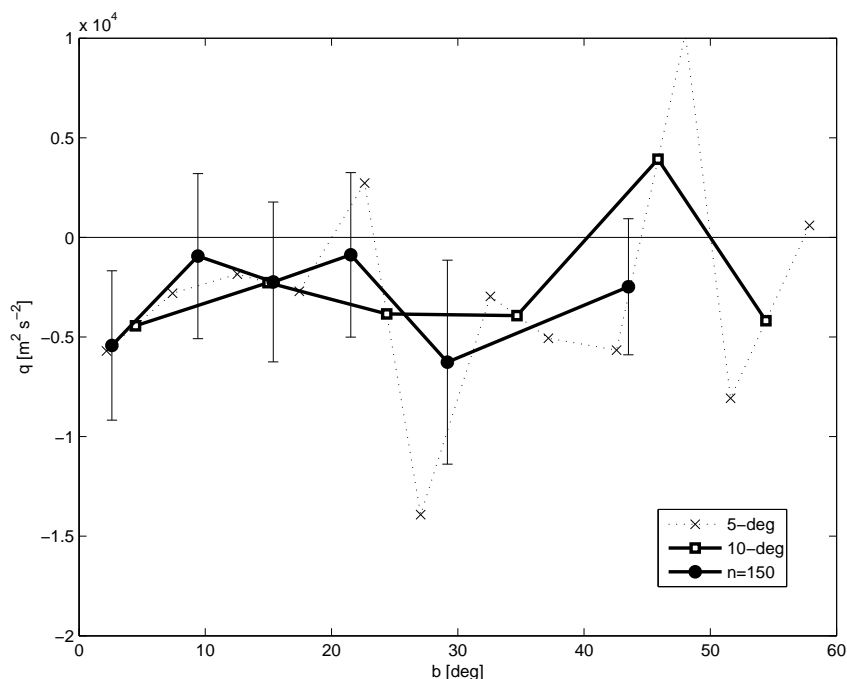
**Tablica 4.7.:** Srednje vrijednosti kovarijance  $q$  za nekoliko različitih područja heliografske širine  $b$ .

$b$	$q$ [ $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ]	$\bar{b}$ [ $^\circ$ ]	$n$
$0^\circ < b < 10^\circ$	$-4400 \pm 3000$	4.47	233
$10^\circ < b < 20^\circ$	$-2300 \pm 3300$	14.97	259
$20^\circ < b < 30^\circ$	$-3800 \pm 4100$	24.37	195
$b > 30^\circ$	$-1500 \pm 3000$	40.77	219

preko Reynoldsove napetosti.

Iznos Reynoldsove napetosti se može odrediti izračunavanjem kovarijance rezidualnih rotacijskih i meridijanskih brzina. Za cijeli skup podataka iznos kovarijance je  $q = -3000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  što ponovno sugerira ulogu Reynoldsove napetosti u održavanju diferencijalne rotacije Sunca transportom momenta količine gibanja prema ekvatoru. Ako se pogleda profil kovarijance s heliografskom širinom (slika 4.36), primjećuje se iznos od oko  $-5000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  u blizini ekvatora, što dosad nije primjećeno u drugim mjerenjima. Na nešto višim širinama kovarijanca poprima iznos od oko  $-2000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ , a onda ima ponovno ide do  $-5000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  na širini od  $30^\circ$ . Na višim heliografskim širinama iznos kovarijance se približava nuli.

U tablici 4.7 su dani iznosi kovarijance za nekoliko područja heliografske širine. Negativne vrijednosti i maksimum kovarijance na širini  $30^\circ$  odgovara mjerenju iz gibanja grupa pjega, ali tako veliki iznos u ekvatorskom području dosad nije uočen drugim mjerenjima.



**Slika 4.36.:** Ovisnost kovarijance između rezidualnih rotacijskih i meridijanskih brzina o heliografskoj širini. Kovarijance su izračunate za područja po latitudi uz širine od  $5^\circ$  (crtkana linija),  $10^\circ$  (puna linija s kvadratićima) i područja s jednakim brojem podataka (puna linija kružićima).

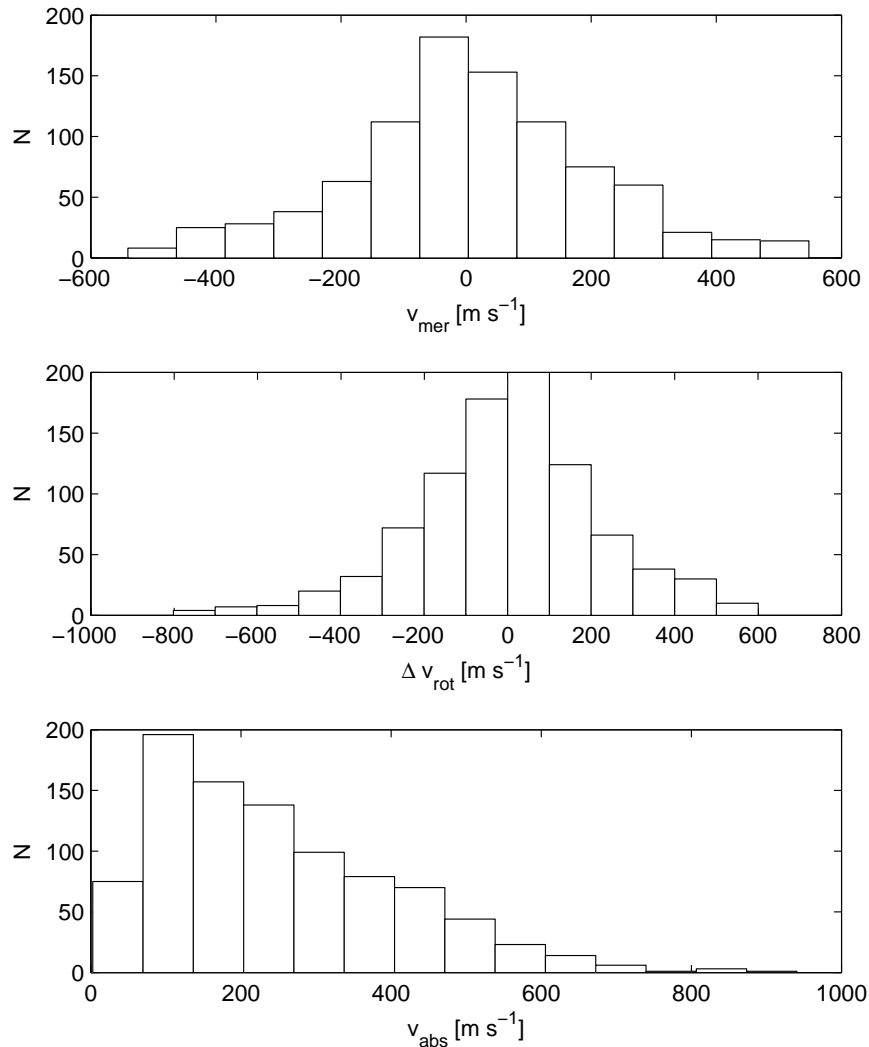
Pitanje o mogućim uzrocima takvog ponašanja zasad ostaje otvoreno.

### 4.3.5. Koeficijent difuzije nasumičnog hoda

Na slici 4.37 prikazane su raspodjele meridijanskih, rezidualnih rotacijskih i apsolutnih brzina koroninih svjetlih točaka iz podataka SDO/AIA. Apsolutne brzine su izračunate kao i u slučaju SOHO/EIT podataka. Sve tri raspodjele pokazuju manju ili veću asimetričnost. Srednja brzina meridijanskih gibanja iznosi oko  $7 - 8 \text{ m s}^{-1}$  i usmjerena je prema polovima (tablica 4.8). Srednja brzina rezidualnih rotacijskih gibanja je očekivano jednaka nuli jer su te brzine dobivene oduzimanjem izmjerenih brzina od srednjeg profila rotacije. Apsolutni iznosi brzina su  $250 \text{ m s}^{-1}$ , duplo veći nego kod koroninih svjetlih točaka iz SOHO/EIT podataka.

Vrijeme života koroninih svjetlih točaka izračunato je iz vremena koliko dugo je objekt praćen na uzastopnim snimkama. Filtriranjem s minimalno 10 mjerenja izbačene su moguće kratkoživuće svjetle točke, ali ti podaci su većinom predstavljali točke sa samo jednim mjerenjem iz kojeg se niti ne može išta zaključiti. S druge strane, praćenje svjetle točke ide sve dok je algoritam uspijeva identificirati na snimcima što ne mora značiti da ona više ne postoji, nego samo da je izašla van očekivanih parametara algoritma, npr.

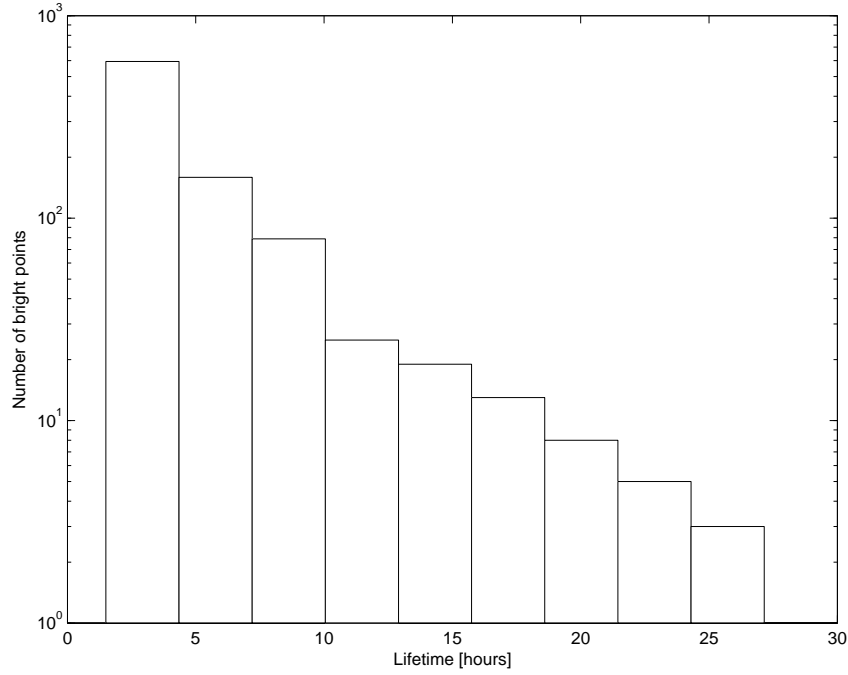




**Slika 4.37.:** Raspodjela meridijanskih (gornja slika), rezidualnih rotacijskih (sredina) i apsolutnih brzina (donja slika) za podatke dobivene mjerenjem na snimcima SDO/AIA.  $N$  je broj točaka u pojedinom području brzina (binu).

**Tablica 4.8.:** Srednje vrijednosti meridijanskih, rezidualnih rotacijskih i apsolutnih brzina iz SDO/AIA mjerenja.  $n$  je broj podataka,  $\bar{v}$  su srednji iznosi brzina,  $\sigma$  su standardne devijacije, a  $M = \sigma/\sqrt{n}$  standardne pogreške.

	$n$	$\bar{v}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$\sigma$ [m s <sup>-1</sup> ]	$M$ [m s <sup>-1</sup> ]
$v_{mer}$	906	7.46	197	6.54
$\Delta v_{rot}$	906	0.00	221	7.34
$v_{abs}$	906	249	159	5.27



**Slika 4.38.:** Vremena života koroninih svijetlih točkica iz podataka SDO/AIA. Vrijeme života je u satima, a broj svijetlih točkica je prikazan u logaritamskoj skali.

**Tablica 4.9.:** Srednje vrijednosti apsolutnih brzina, vremena života, srednjeg slobodnog puta i koeficijenta difuzije za nekoliko podskupa vremena života.

	$n$	$v_{abs}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$l$ [km]	$\tau$ [h]	$D$ [km <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$0 < \tau < 10$ h	831	261	3420	3.64	223
$10 < \tau < 20$ h	61	127	6310	13.8	200
$20 < \tau < 30$ h	13	98	7940	22.5	195
all	906	249	4150	4.63	258

minimalnog intenziteta iznad pozadine. Ponovno je primjećen eksponencijalni pad broja svijetlih točaka s povećanjem vremena života (slika 4.38).

Ako se za svaku pojedinačnu koroninu svijetlu točku izračuna srednji slobodni put iz vremena života i aposlutne brzine, dobije se vrijednost od  $3220 \pm 80$  km, što za koeficijent difuzije nasumičnog hoda daje  $235 \pm 8$  km<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>. U tablici 4.9 dan je proračun srednjeg slobodnog puta i koeficijenta difuzije za nekoliko podskupova podataka po vremenu života. Može se zaključiti da je vrijednost koeficijenta difuzije oko  $230 \pm 20$  km<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, u skladu s mjerenjima iz podataka SOHO/EIT.

## 5. Diskusija i zaključak

U ovom radu prikazani su teorijski temelji modela diferencijalne rotacije Sunca, metode mjerenja profila rotacije i polja brzina velikih razmjera uz tretiranje raznih izvora pogreški i potrebnih korekcija, te rezultati mjerenja pomoću dvije vrste objekata (grupe pjega i koronine svijetle točke) iz tri neovisna izvora podataka (Extended Greenwich Results, Solar and Heliospheric Observatory/Extreme ultraviolet Imaging Telescope, Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly). Rezultati su uspoređeni s dosadašnjim rezultatima drugih istraživača i nekolicinom teorijskih modela. Poboljšana je metoda obrade (nova metoda izračunavanja sinodičko-sideričke korekcije, uzimanje u obzir raspodjele objekata na površini), potvrđena su neka prethodna mjerenja, iznijete su hipoteze za opažena neslaganja, a otvorena su i neka nova pitanja.

### 5.1. Profil diferencijalne rotacije

Parametri profila diferencijalne rotacije Sunca u ovom radu su izračunati iz gibanja grupa pjega (EGR baza podataka) te koroninih svijetlih točaka (podaci sa SDO/AIA instrumenta). Dobiveni rezultati su uspoređeni s rezultatima drugih istraživača i prikazani u tablici 5.1. Dobiveni profil rotacije izmjeren iz EGR skupa podataka (Sudar et al., 2014) odlično se podudara sa sličnim mjerenjima u literaturi iako su korišteni drugačiji vremenski periodi i baze podataka o položajima pjega. Nešto manju brzinu pokazuju povratne stabilne grupe pjega (Brajša et al., 2002a) što se pripisuje kočenju gibanja grupa pjega kroz sporiju okolnu plazmu. Kako je vrijeme života povratnih grupa pjega puno duže od prosječnih grupa, kod njih kočenje kumulativno daje sve manju brzinu što je vrijeme života dulje. Da je plazma zaista sporija od gibanja pjega potvrđuju i rezultati Dopplerovskih mjerenja (tablica 5.1).

Ekvatorska brzina rotacije (parametar  $A$ ) izmjerena iz koroninih svijetlih točaka u ovom radu također se podudara s većinom drugih istraživanja, iako su se koristili podaci za samo dva dana dok su drugi istraživači koristili podatke iz puno dužih vremenskih perioda. S druge strane, dobiveni diferencijalni parametri ( $B$  i  $C$ ) za SDO/AIA podatke pokazuju dosta raznolike vrijednosti ovisno o primijenjenim kriterijima na same parametre ( $C \neq 0$ ,  $B = C$  i  $C = 0$ ) što upućuje na cross-talk između parametara. Fiksirajući  $C$  parametar u 0

## 5. Diskusija i zaključak

**Tablica 5.1.:** Usporedba mjerenja profila diferencijalne rotacije Sunca ovog rada s ostalim istraživanjima.

1. OSO-4, Mg X spektroheliogrami; 2. Skylab, meko rentgensko zračenje; 3. Yohkoh/SXT; 4. Yohkoh/SXT; 5. SOHO-EIT, 19.5 nm; 6. SOHO-EIT, interaktivna metoda, s korekcijom visine, 6 mj.; 7. SOHO-EIT, interaktivna, 8 mj.; 8. SOHO-EIT, automatska metoda, 8 mj.; 9. SOHO-EIT, automatska, 93 mj.; 10. SOHO-EIT, 19.5 nm; 11. Hinode/XRT; 12. SDO-AIA,  $C \neq 0$ ; 13.  $B = C$ ; 14.  $C = 0$ ; 15. Extended Greenwich, pjege i grupe; 16. Greenwich, grupe pjega; 17. GPR; 18. GPR+SOON/USAF/NOAA; 19. EGR; 20. GPR, stabilne povratne grupe pjega; 21. Mt. Wilson, pjege; 22. Mt. Wilson, grupe pjega; 23. SOON/USAF/NOAA; 24. Meudon; 25. Big Bear, s korekcijom visine; 26. Big Bear i Kanzelhöhe, s korekcijom visine; 27. Visokotemperaturna područja, 8 mm, Metsähovi; 28. Niskotemperaturna područja, 8 mm, Metsähovi; 29. Niskotemp. područja s korekcijom visine; 30. Mt. Wilson, fotosferska mag. polja; 31. Kitt Peak, fotosferska mag. polja; 32. SOHO-MDI, fotosferska mag. polja velikih razmjera; 33. Huairou/Beijing, fotosferska mag. polja na visokim širinama; 34. Mt. Wilson, fotosfera, spektroskopski; 35. Mt. Wilson, fotosfera, spektroskopski; 36. Locarno, fotosfera, spektroskopski; 37. Locarno; 38. Capri, fotosfera, spektroskopski.

Metoda/objekti praćenja	Period	$A$ [ $^{\circ}$ dan $^{-1}$ ]	$B$ [ $^{\circ}$ dan $^{-1}$ ]	$C$ [ $^{\circ}$ dan $^{-1}$ ]	Izvor	
koronine svijetle točke	1967.	$14.65 \pm 0.2$			Dupree i Henze (1972)	1
koronine svijetle točke	1973.	$14.6 \pm 0.3$			Golub et al. (1974)	2
koronine svijetle točke	1992.-2001.	$17.6 \pm 0.4$	$-4.5 \pm 1.1$		Kariyappa (2008)	3
koronine svijetle točke	1994.-1997.	$14.39 \pm 0.01$	$-1.91 \pm 0.10$	$-2.45 \pm 0.17$	Hara (2009)	4
koronine svijetle točke	1996.	$14.34 \pm 0.03$	$-1.3 \pm 0.3$	$-2.3 \pm 0.5$	Karachik et al. (2006)	5
koronine svijetle točke	1998.-1999.	$14.454 \pm 0.027$	$-2.22 \pm 0.07$	$-2.22 \pm 0.07$	Brajša et al. (2004)	6
koronine svijetle točke	1998.-1999.	$14.54 \pm 0.04$	$-2.31 \pm 0.30$	$-1.53 \pm 0.41$	Wöhl et al. (2010)	7
koronine svijetle točke	1998.-1999.	$14.49 \pm 0.03$	$-2.53 \pm 0.22$	$-0.73 \pm 0.33$	Wöhl et al. (2010)	8
koronine svijetle točke	1998.-2006.	$14.499 \pm 0.006$	$-2.54 \pm 0.06$	$-0.77 \pm 0.09$	Wöhl et al. (2010)	9
koronine svijetle točke	2005.	$16.0 \pm 0.1$	$-0.7 \pm 1.3$	$-4.9 \pm 1.9$	Karachik et al. (2006)	10
koronine svijetle točke	2007.	$14.19 \pm 0.17$	$-4.2 \pm 0.8$		Kariyappa (2008)	11
koronine svijetle točke	1.-2.1.2011.	$14.47 \pm 0.10$	$0.6 \pm 1.0$	$-4.7 \pm 1.7$	ovaj rad	12
koronine svijetle točke	1.-2.1.2011.	$14.59 \pm 0.07$	$-1.35 \pm 0.21$	$-1.35 \pm 0.21$	ovaj rad	13
koronine svijetle točke	1.-2.1.2011.	$14.62 \pm 0.08$	$-2.02 \pm 0.33$		ovaj rad	14
Sunčeve pjege	1853.-1996.	$14.531 \pm 0.003$	$-2.75 \pm 0.05$		Pulkkinen i Tuominen (1998b)	15
Sunčeve pjege	1874.-1976.	$14.551 \pm 0.006$	$-2.87 \pm 0.06$		Balthasar et al. (1986b)	16
Sunčeve pjege	1874.-1976.	$14.528 \pm 0.006$	$-2.77 \pm 0.05$		Ruždjak et al. (u pripremi)	17
Sunčeve pjege	1874.-2008.	$14.500 \pm 0.005$	$-2.71 \pm 0.05$		Ruždjak et al. (u pripremi)	18
Sunčeve pjege	1878.-2011.	$14.499 \pm 0.005$	$-2.64 \pm 0.05$		ovaj rad	19
Sunčeve pjege	1880.-1976.	$14.37 \pm 0.01$	$-2.59 \pm 0.16$		Brajša et al. (2002a)	20
Sunčeve pjege	1921.-1982.	$14.522 \pm 0.004$	$-2.84 \pm 0.04$		Howard et al. (1984)	21
Sunčeve pjege	1921.-1982.	$14.393 \pm 0.010$	$-2.95 \pm 0.09$		Howard et al. (1984)	22
Sunčeve pjege	1977.-2008.	$14.43 \pm 0.01$	$-2.51 \pm 0.09$		Ruždjak et al. (u pripremi)	23
H $\alpha$ filamenti	1919.-1929.	14.48	-2.16		d'Azambuja i d'Azambuja (1948)	24
H $\alpha$ filamenti	1972.-1973.	14.45	-1.43		Adams i Tang (1977)	25
H $\alpha$ filamenti	1972.-1987.	$14.45 \pm 0.15$	$-0.11 \pm 0.90$	$-3.69 \pm 0.90$	Brajša et al. (1991)	26
HTR	1979.-1991.	$14.91 \pm 0.10$	$-2.56 \pm 0.84$		Brajša et al. (2009a)	27
LTR	1979.-1991.	$14.44 \pm 0.06$	$-1.91 \pm 0.26$		Brajša et al. (2009a)	28
LTR	1979.-1991.	$13.92 \pm 0.06$	$-4.09 \pm 0.34$		Brajša et al. (2009a)	29
magnetsko polje	1967.-1980.	$14.307 \pm 0.005$	$-1.98 \pm 0.06$	$-2.15 \pm 0.11$	Snodgrass (1983)	30
magnetsko polje	1975.-1991.	$14.42 \pm 0.02$	$-2.00 \pm 0.13$	$-2.09 \pm 0.15$	Komm et al. (1993b)	31
magnetsko polje	1996.-1997.	$14.50 \pm 0.03$	$-1.72 \pm 0.22$	$-2.31 \pm 0.30$	Pevtsov i Latushko (2000)	32
magnetsko polje	1997.	$14.00 \pm 0.54$	$-2.24 \pm 1.22$	$-1.78 \pm 0.79$	Deng et al. (1999)	33
Doppler	1966.-1968.	13.76	-1.74	-2.19	Howard i Harvey (1970)	34
Doppler	1967.-1984.	14.05	-1.49	-2.61	Snodgrass (1984)	35
Doppler	1978.	$13.96 \pm 0.10$			Pérez Garde et al. (1981)	36
Doppler	1981.-1982.	$13.99 \pm 0.06$			Küveler i Wöhl (1983)	37
Doppler	1983.-1986.	$13.92 \pm 0.12$			Lustig i Wöhl (1989)	38

da bi se izbjegao cross-talk daje vrijednost  $B$  parametra u skladu s drugim istraživanjima.

Uspoređujući brzine rotacije koroninih svijetlih točaka i grupa pjega iz ovog rada može se primijetiti da su praktički istog iznosa od oko  $14.5^\circ \text{ dan}^{-1}$ . Isto vrijedi i za većinu rezultata ostalih istraživača što je u skladu s pretpostavkom da su koronine svijetle točke poput pjega usidrene dublje u atmosferi Sunca te da zbog toga rotiraju jednakom kutnom brzinom kao i pjege.

Razlike u izmjerenim vrijednostima parametara diferencijalne rotacije Sunca, osim pogreškama mjerenja, mogu se objasniti i ovisnošću brzine rotacije o fazi ciklusa Sunčeve aktivnosti. Jurdana-Šepić et al. (2011) su istraživali ovisnost parametara  $A$  i  $B$  o raznim indikatorima Sunčeve aktivnosti poput Wolfvog relativnog broja i jakosti međuplanetarnog magnetskog polja. Dok za  $B$  parametar nisu pronašli značajniju korelaciju s ciklusom aktivnosti, za parametar  $A$  su dobili da opada s povećanjem aktivnosti, tj. da je rotacija sporija u maksimumu aktivnosti, nego u ostalim fazama ciklusa. Pretpostavka da magnetsko polje usporava rotaciju može objasniti opaženu korelaciju. Jedna od posljedica korelacije brzine rotacije i aktivnosti Sunca je brža rotacija u periodu Maunderovog minimuma, što istraživanja crteža pjega iz 17. stoljeća i pokazuju (Eddy et al., 1976).

Postojanje Maunderovog minimuma postavlja pitanje periodičnosti ciklusa Sunčeve aktivnosti te mogućnosti predikcije nadolazećih ciklusa. Varijacije ciklusa aktivnosti u prošlosti mogu se dokučiti mjerenjem koncentracije kozmogenih izotopa poput ugljika-14 i berilija-10. Analiza varijacije berilija-10 u uzorcima leda iz polarnih područja, čime se rekonstruirala aktivnost Sunca za proteklih 9300 godina, ukazuje na kompleksnost Sunčevog ciklusa koji se čini da je na rubu kaotičnog ponašanja (Hanslmeier et al., 2013), a pronađene su i kvaziperiodičnosti na drugim vremenskim skalama, puno duljim od osnovnog jedanaestogodišnjeg ciklusa. Moguća objašnjenja uključuju nelinearnu interakciju magnetskog polja i gibanja plazme što se vidi u modulaciji brzine rotacije, kao i stohastičke fluktuacije  $\alpha$ -efekta te varijacije meridijanskih brzina (Hanslmeier et al., 2013).

Predikcije ciklusa aktivnosti baziraju se na prekursorima, tj. izmjerenim fizikalnim veličinama prethodnog ciklusa koje sadrže informaciju o jakosti idućeg ciklusa, te na ekstrapolacijskim metodama i statističkim karakteristikama prethodnih ciklusa (Petrovay, 2010). Primjenom kombinacije takvih metoda, moguće je dati prognozu jakosti i trenutke maksimuma i minimuma narednog ciklusa aktivnosti Sunca (Brajša et al., u pripremi).

## 5.2. Meridijanska gibanja

Jedan od zanimljivijih rezultata ovog rada su meridijanska gibanja koja su u suprotnosti s većinom ostalih mjerenja. Izmjereni konvergirajući tok u rasponu  $10\text{-}20 \text{ m s}^{-1}$  prema središtu aktivnosti odgovara helioseizmološkim mjerenjima rezidualnog toka (Zhao i Ko-

sovichev, 2004; González Hernández et al., 2008, 2010), ali je točno suprotan od rezultata dobivenih praćenjem objekata (Howard, 1991a, 1996; Snodgrass i Dailey, 1996; Vršnak et al., 2003) gdje dobiveni meridijanski tok izvire iz područja aktivnosti, te Dopplerovskim mjerenjima (Hathaway i Rightmire, 2010) koja pokazuju dominantni tok prema polovima.

Razliku s rezultatima ostalih mjerenja preko praćenja objekata može se objasniti ako se pretpostavi da ostali istraživači nisu uzeli u obzir neravnomjernu raspodjelu objekata što može rezultirati prividnim meridijanskim tokom (Olemskoy i Kitchatinov, 2005). Dapače, kad je raspodjela zanemarena u slučaju pjega, dobiven je tok iz središta aktivnosti. Postoje i druga moguća objašnjenja poput različitih brzina u okolini aktivnih područja od ostatka fotosfere ili usidrenosti objekata u dubljim slojevima, te bi ovo neslaganje u budućnosti trebalo podrobnije istražiti. Također ostaje pitanje točnog utjecaja meridijanskih gibanja na ciklus Sunčeve aktivnosti.

Zanimljiva posljedica promjenjivih meridijanskih brzina je da se kod istraživanja ekstrasolarnih planeta mogu dobiti lažne detekcije (Beckers, 2007). Kod Dopplerovskih tehnika detekcije ekstrasolarnih planeta, točnost mjerenja varijacija brzine je premašila  $1 \text{ m s}^{-1}$  te je moguć utjecaj promjenjivih i osno-nesimetričnih meridijanskih gibanja na takva mjerenja.

### 5.3. Rotacijska rezidualna gibanja i torzione oscilacije

Izmjerene rezidualne rotacijske brzine su iznosa oko  $\pm 10 \text{ m s}^{-1}$ , ali uzorak torzionih oscilacija nije potvrđen. Iako je karakter dobivenih rezidualnih gibanja u skladu s torzionim oscilacijama dobivenim helioseizmološkim i drugim metodama (Howard i Labonte, 1980; Howe, 2009), rezultati su nepouzdana. Jedno od objašnjenja može biti što su torzione oscilacije vrlo malih iznosa brzina od par  $\text{m s}^{-1}$  (efekt drugog reda u rotaciji), a pogreške izmjerenih rezidualnih rotacijskih brzina su nešto veće nego kod meridijanskih brzina i kreću se od nekoliko  $\text{m s}^{-1}$  pa sve do, u rijetkim slučajevima, par stotina  $\text{m s}^{-1}$ . Tu može igrati ulogu i faktor latitude,  $\cos \psi$ , koji ulazi u izračunavanje linearnih azimutalnih brzina, a kojeg nema kod meridijanskih.

Ovisnost rezidualnih rotacijskih gibanja u fazi ciklusa za različite epohe pokazuje različit uzorak koji se trenutno ne mogu objasniti. Moguće je da je dobiveni rezultat samo uzorak nasumičnih smetnji u mjerenjima.

## 5.4. Korelacije brzina i Reynoldsova napetost

Rezultati dobiveni iz grupa pjega i koroninih svijetlih točaka nedvojbeno pokazuju da postoji korelacija između meridijanskih i rezidualnih rotacijskih brzina i iznosi oko -0.07. Negativni predznak kaže da će objekti sa sporijim gibanjem od prosječne brzine rotacije biti zakrenuti prema polovima, a s bržim gibanjem prema ekvatoru, što je u skladu s prijenosom momenta količine gibanja prema ekvatoru. To je u suglasnosti s drugim sličnim mjerenjima (Ward, 1965; Gilman i Howard, 1984b; Pulkkinen i Tuominen, 1998a; Vršnak et al., 2003).

Kovarijanca rezidualnih rotacijskih i meridijanskih brzina, koja odgovara Reynoldsovoj napetosti, također je u skladu s prijenosom momenta količine gibanja prema ekvatoru i tipičnog iznosa  $-3000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ . Latitudinalna ovisnost pokazuje mogući minimum na oko  $30^\circ$  heliografske širine te opadanje iznosa prema ekvatoru i polovima. Opći profil latitudinalne ovisnosti odgovara dosadašnjim mjerenjima (Ward, 1965; Gilman i Howard, 1984b) i modelima (Pulkkinen et al., 1993; Canuto et al., 1994). SDO/AIA podaci sugeriraju na ponovni porast Reynoldsove napetosti u ekvatorskim područjima što dosad nije zabilježeno drugim mjerenjima niti modeliranjem. Taj rezultat trenutno nema suvislog objašnjenja, ali je moguće da je posljedica utjecaja aktivnih područja na izmjerene iznose brzina.

## 5.5. Vlastita gibanja koroninih svijetlih točaka

Izmjereni iznosi apsolutnih brzina vlastitih gibanja svijetlih točaka pokazuju široku raspodjelu s brzinama od  $0-800 \text{ m s}^{-1}$  te srednjom vrijednosti od oko  $100-250 \text{ m s}^{-1}$ . Rezultati SDO/AIA srednjih apsolutnih brzina svijetlih točaka su duplo veća nego u SOHO/EIT slučaju, što bi se moglo objasniti većom rezolucijom AIA instrumenta te naprednijim algoritmom detekcije svijetlih točaka čime dobivamo podatke o svijetlim točkama prosječno manjih dimenzija nego u SOHO/EIT slučaju. Kako je vrijeme života svijetlih točaka proporcionalno njihovoj veličini, a duže živuće točke imaju manje apsolutne brzine, njih će biti više u SOHO slučaju pa će srednje brzine biti niže. Da je takav zaključak opravdan upućuje i iznos srednjeg slobodnog puta gdje su u oba slučaja dobiveni iznosi od  $3000-15000 \text{ km}$ , te koeficijent difuzije nasumičnog hoda od  $200-250 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$  koji je u skladu s nekim drugim mjerenjima (Hagenaar et al., 1999). Konačno, ideja da se vlastito gibanje svijetlih točaka može prikazati kao nasumični hod je donekle opravdana, ali samo u slučaju apsolutnih brzina. Kada se gledaju azimutalne i meridijanske komponente posebno, tada postoji korelacija između njih i aproksimacija nasumičnim hodom više ne vrijedi.



### 5.6. Zaključak

Mjerenja polja brzina velikih razmjera pomoću pomaka objekata u atmosferi Sunca, prikazana u ovom radu, daju čvrste rezultate da Reynoldsova napetost prijenosom momenta količine gibanja prema ekvatoru održava opaženi profil diferencijalne rotacije Sunca. Rezultati također pokazuju da je taj mehanizam najjači na srednjim heliografskim širinama. Pronađeno je i da gibanja Sunčevih pjega i koroninih svijetlih točaka imaju slične karakteristike što upućuje na zajedničko magnetsko porijeklo te moguću usidrenost u dubljim slojevima konvekcijske zone.

Neovisne tehnike i mjerenja su temelj znanstvene metode za provjeru rezultata te su u skladu s tim za mjerenja u ovom radu korištene dvije vrste objekata u širokom rasponu različitih vremenskih skala. S obzirom da su se proučavala gibanja na skalama od stoljeća do nekoliko sati, rezultati su iznenađujuće podudarni. Poboľšana je metoda mjerenja polja brzina iz pomaka objekata s novim načinom računanja sinodičko-sideričke korekcije (Skokić et al., 2014) te uzimanja u obzir raspodjele objekata (Olemskoy i Kitchatinov, 2005). Raspodjela objekata se pokazala kao ključni efekt u mjerenju meridijanskih gibanja koji je u pravilu bio zanemaren u dosadašnjim istraživanjima, a također je ukazala na daljnju potrebu stalnog testiranja i unapređivanja postojećih metoda, kao i na razvoj i uvođenje novih tehnika koje će dati preciznije i pouzdanije rezultate. Naime, upravo mali efekti i odstupanja od opće prihvaćenih i provjerenih rezultata i modela nagovještavaju neke nove skrivene pravilnosti i zakonitosti. Iz tog razloga, u nastavku mojeg istraživanja gibanja na Suncu, u planu je novi pristup analize podataka preko metode optimizacije parametara modela (Kalman filtering) i korištenja sintetiziranih podataka za bolje modeliranje pogrešaka mjerenja i time smanjivanja njihovog utjecaja na rezultat (npr. uporeba Monte-Carlo metode za procjenu raznih vrsta pogreški te provjeru metode).

Zbog svoje blizine, Sunce nam također služi kao neprocjenjiv i jedinstveni uzorak, svojevrsni laboratorij za testiranje tehnika i hipoteza o karakteristikama udaljenih zvijezda. Jedan takav primjer je da promjenjiva meridijanska gibanja mogu utjecati na lažne detekcije ekstrasolarnih planeta (Beckers, 2007). Zbog ogromnog Sunčevog utjecaja na Zemlju, sve je veća potreba prognoziranja Sunčeve aktivnosti i erupcija kako bi se pravovremeno mogli zaštititi od štetnog zračenja, te analize aktivnosti kroz povijest kako bi se razjasnio dugoročan utjecaj na klimu Zemlje.

## A. Dodatak

U astronomiji i astrofizici se ustalio FITS (Flexible Image Transport System) digitalni format pohrane i razmjene podataka. Tako su i snimci Sunca sa satelita SOHO i SDO dostupni u FITS formatu. Format je osmišljen za znanstvenu upotrebu te može pohranjivati slike, tablice, spektre i podatke o raznoraznim mjerenjima. U svom zaglavlju FITS sadrži opsi podataka i sve bitne parametre. Postoje standardizirana polja zaglavlja, tzv. keywords (ključne riječi), ali mogu se koristiti i vlastite. Opis ključnih riječi za potrebe transformacija između koordinatnih sustava u upotrebi u solarnoj fizici je dan u Thompson (2006), a opći pregled s potrebnim izrazima za transformacije između raznih koordinatnih sustava i primjerima upotrebe u astronomiji je dan u Greisen i Calabretta (2002); Calabretta i Greisen (2002); Greisen et al. (2006).

Za potrebe mjerenja položaja objekata (kronininih svijetlih točaka) na snimkama Sunca satelita SOHO i SDO, koristile su se ključne riječi koje su davale parametre snimka (npr. veličinu, vrijeme ekspozicije, itd.) kao i poziciju satelita u odnosu na Zemlju i Sunce. Ispod je prikazano jedno tipično FITS zaglavlje za snimak sa SDO/AIA instrumenta s odabranim ključnim riječima.

```
SIMPLE = T / file does conform to FITS standard
BITPIX = 16 / number of bits per data pixel
NAXIS = 2 / number of data axes
NAXIS1 = 4096 / length of data axis 1
NAXIS2 = 4096 / length of data axis 2
EXTEND = T / FITS dataset may contain extensions
COMMENT FITS (Flexible Image Transport System) format is defined in 'Astronomy
COMMENT and Astrophysics', volume 376, page 359; bibcode: 2001A&A...376..359H
BLD_VERS= 'V5R12X'
LVL_NUM = 1.000000
T_REC = '2011-01-01T00:00:09Z'
TRECSTEP= 1.000000
TRECEPOC= '1977.01.01_00:00:00_TAI'
TRECROUN= 1
ORIGIN = 'SDO/JSOC-SDP'
```

## A. Dodatak

---

```
DATE      = '2011-07-02T13:53:37'  
TELESCOP= 'SDO/AIA'  
INSTRUME= 'AIA_2'  
DATE-OBS= '2011-01-01T00:00:07.84'  
T_OBS    = '2011-01-01T00:00:08.84Z'  
CTYPE1   = 'HPLN-TAN'  
CUNIT1   = 'arcsec'  
CRVAL1   = 0.000000  
CDELTA1  = 0.600299  
CRPIX1   = 2046.199951  
CTYPE2   = 'HPLT-TAN'  
CUNIT2   = 'arcsec'  
CRVAL2   = 0.000000  
CDELTA2  = 0.600299  
CRPIX2   = 2040.939941  
CROTA2   = 0.135868  
R_SUN    = 1625.749756  
DSUN_REF= 149597870691.0  
DSUN_OBS= 147100672587.96  
RSUN_REF= 696000000.0  
RSUN_OBS= 975.935992  
CRLN_OBS= 255.343811  
CRLT_OBS= -2.974562  
CAR_ROT  =                2105  
HGLN_OBS= 0.000000  
HGLT_OBS= -2.974562
```

Od ključnih riječi potrebnih za izračun heliografskih koordinata iz piksel koordinata koriste se slijedeće:

NAXIS1, NAXIS2 - veličina slike u pikselima

DATE-OBS, T\_OBS - trenutak snimanja

DSUN\_REF, DSUN\_OBS - referentna i trenutna udaljenost satelita od Sunca

RSUN\_REF, RSUN\_OBS - polumjer Sunca i opažani polumjer

HGLN\_OBS, HGLT\_OBS - Stonyhurst heliografske koordinate središta Sunčeva diska

CRLN\_OBS, CRLT\_OBS - Carrington heliografske koordinate središta Sunčeva diska

CRPIX1, CRPIX2 - piksel koordinate središta Sunčeva diska

CRDELTA1, CRDELTA2 - kutna veličina 1 piksela (plate scale)

CRVAL1, CRVAL2 - koordinate referentnog piksela

---

R\_SUN - veličina diska Sunca u pikselima

Iz navedenih ključnih riječi mogu se odrediti heliografske koordinate svake točke prema izrazima navedenim u poglavlju 3.



# Bibliografija

- W. M. Adams i F. Tang. Differential rotation of short-lived solar filaments. *Solar Phys.*, 55:499–504, December 1977. doi: 10.1007/BF00152590.
- H. Alfvén. Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves. *Nature*, 150:405–406, October 1942. doi: 10.1038/150405d0.
- M. J. Aschwanden. Solar Stereoscopy and Tomography. *Living Reviews in Solar Physics*, 8:5, October 2011. doi: 10.12942/lrsp-2011-5.
- F. Auchere, S. Boulade, S. Koutchmy, R. N. Smartt, J. P. Delaboudiniere, A. Georgakilas, J. B. Gurman, i G. E. Artzner. The prolate solar chromosphere. *Astron. Astrophys.*, 336:L57–L60, August 1998.
- H. W. Babcock. The Topology of the Sun's Magnetic Field and the 22-YEAR Cycle. *Astrophys. J.*, 133:572, March 1961. doi: 10.1086/147060.
- H. Balthasar, M. Schüssler, i H. Wöhl. On changes of the rotation velocities of stable, recurrent sunspots and their interpretation with a flux tube model. *Solar Phys.*, 76: 21–28, February 1982. doi: 10.1007/BF00214127.
- H. Balthasar, G. Lustig, H. Wöhl, i D. Stark. The solar rotation elements  $i$  and  $\omega$  derived from sunspot groups. *Astron. Astrophys.*, 160:277–279, May 1986a.
- H. Balthasar, M. Vazquez, i H. Wöhl. Differential rotation of sunspot groups in the period from 1874 through 1976 and changes of the rotation velocity within the solar cycle. *Astron. Astrophys.*, 155:87–98, January 1986b.
- H. Balthasar, H. Wöhl, i D. Stark. The solar rotation elements  $i$  and  $\Omega$  derived from recurrent single sunspots. *Astron. Astrophys.*, 174:359, March 1987.
- J. G. Beck i P. Giles. Helioseismic Determination of the Solar Rotation Axis. *Astrophys. J. Lett.*, 621:L153–L156, March 2005. doi: 10.1086/429224.
- J. G. Beck, T. L. Duvall, i P. H. Scherrer. Long-lived giant cells detected at the surface of the Sun. *Nature*, 394:653–655, August 1998. doi: 10.1038/29245.

- J. M. Beckers. Can variable meridional flows lead to false exoplanet detections? *Astronomische Nachrichten*, 328:1084, December 2007. doi: 10.1002/asna.200710830.
- G. Belvedere, G. Godoli, S. Motta, L. Paterno, i R. A. Zappala. Surface Reynolds stresses determined from the analysis of facular motions and the maintenance of the sun's differential rotation. *Solar Phys.*, 46:23–28, January 1976. doi: 10.1007/BF00157552.
- R. Brajša, B. Vršnak, V. Ruždjak, A. Schroll, i S. Pohjolainen. Solar differential rotation determined by polar crown filaments. *Solar Phys.*, 133:195–203, June 1991. doi: 10.1007/BF00149885.
- R. Brajša, H. Wöhl, B. Vršnak, V. Ruždjak, F. Clette, i J.-F. Hochedez. Solar differential rotation determined by tracing coronal bright points in SOHO-EIT images. I. Interactive and automatic methods of data reduction. *Astron. Astrophys.*, 374:309–315, July 2001. doi: 10.1051/0004-6361:20010694.
- R. Brajša, H. Wöhl, B. Vršnak, D. Ruždjak, D. Sudar, D. Roša, i D. Hržina. Differential Rotation of Stable Recurrent Sunspot Groups. *Solar Phys.*, 206:229–241, April 2002a.
- R. Brajša, H. Wöhl, B. Vršnak, V. Ruždjak, F. Clette, i J.-F. Hochedez. Solar differential rotation determined by tracing coronal bright points in SOHO-EIT images. II. Results for 1998/99 obtained with interactive and automatic methods. *Astron. Astrophys.*, 392:329–334, September 2002b. doi: 10.1051/0004-6361:20020945.
- R. Brajša, H. Wöhl, B. Vršnak, V. Ruždjak, F. Clette, J.-F. Hochedez, i D. Roša. Height correction in the measurement of solar differential rotation determined by coronal bright points. *Astron. Astrophys.*, 414:707–715, February 2004. doi: 10.1051/0004-6361:20034082.
- R. Brajša, D. Ruždjak, i H. Wöhl. Temporal Variations of the Solar Rotation Determined by Sunspot Groups. *Solar Phys.*, 237:365–382, September 2006. doi: 10.1007/s11207-006-0076-7.
- R. Brajša, H. Wöhl, D. Ruždjak, B. Vršnak, G. Verbanac, L. Svalgaard, i J.-F. Hochedez. On the solar rotation and activity. *Astronomische Nachrichten*, 328:1013, December 2007. doi: 10.1002/asna.200710867.
- R. Brajša, H. Wöhl, B. Vršnak, V. Ruždjak, F. Clette, J.-F. Hochedez, G. Verbanac, I. Skokić, i A. Hanslmeier. Proper Motions of Coronal Bright Points. *Central European Astrophysical Bulletin*, 32:165–190, 2008.

- R. Brajša, I. Romštajn, H. Wöhl, A. O. Benz, M. Temmer, i D. Roša. Heights of solar tracers observed at 8 mm and an interpretation of their radiation. *Astron. Astrophys.*, 493:613–621, January 2009a. doi: 10.1051/0004-6361:200810299.
- R. Brajša, H. Wöhl, A. Hanslmeier, G. Verbanac, D. Ruždjak, E. Cliver, L. Svalgaard, i M. Roth. On solar cycle predictions and reconstructions. *Astron. Astrophys.*, 496: 855–861, March 2009b. doi: 10.1051/0004-6361:200810862.
- A. S. Brun, M. S. Miesch, i J. Toomre. Global-Scale Turbulent Convection and Magnetic Dynamo Action in the Solar Envelope. *Astrophys. J.*, 614:1073–1098, October 2004. doi: 10.1086/423835.
- M. R. Calabretta i E. W. Greisen. Representations of celestial coordinates in FITS. *Astron. Astrophys.*, 395:1077–1122, December 2002. doi: 10.1051/0004-6361:20021327.
- V. M. Canuto, F. O. Minotti, i O. Schilling. Differential rotation and turbulent convection: A new Reynolds stress model and comparison with solar data. *Astrophys. J.*, 425:303–325, April 1994. doi: 10.1086/173986.
- R. C. Carrington. *Observations of the Spots on the Sun from November 9, 1853, to March 24, 1861, Made at Redhill*. Williams & Norgate, London, 1863.
- D. B. Chelton i M. G. Schlax. Global Observations of Oceanic Rossby Waves. *Science*, 272:234–238, April 1996. doi: 10.1126/science.272.5259.234.
- M. d’Azambuja i L. d’Azambuja. *Ann. Obs. Paris-Meudon, VI, VII*, 1948.
- J.-P. Delaboudinière, G. E. Artzner, J. Brunaud, A. H. Gabriel, J. F. Hochedez, F. Millier, X. Y. Song, B. Au, K. P. Dere, R. A. Howard, R. Kreplin, D. J. Michels, J. D. Moses, J. M. Defise, C. Jamar, P. Rochus, J. P. Chauvineau, J. P. Marioge, R. C. Catura, J. R. Lemen, L. Shing, R. A. Stern, J. B. Gurman, W. M. Neupert, A. Maucherat, F. Clette, P. Cugnon, i E. L. van Dessel. EIT: Extreme-Ultraviolet Imaging Telescope for the SOHO Mission. *Solar Phys.*, 162:291–312, December 1995. doi: 10.1007/BF00733432.
- Y. Deng, J. Wang, i J. Harvey. High-Latitude Solar Rotation Traced by Magnetic Elements. *Solar Phys.*, 186:13–23, May 1999. doi: 10.1023/A:1005186016971.
- C. R. DeVore, N. R. Sheeley, Jr., J. P. Boris, T. R. Young, Jr., i K. L. Harvey. Simulations of magnetic-flux transport in solar active regions. *Solar Phys.*, 102:41–49, December 1985. doi: 10.1007/BF00154036.



- M. Dikpati, P. A. Gilman, G. de Toma, i R. K. Ulrich. Impact of changes in the Sun's conveyor-belt on recent solar cycles. *Geophys. Res. Lett.*, 37:L14107, July 2010. doi: 10.1029/2010GL044143.
- A. K. Dupree i W. Henze, Jr. Solar Rotation as Determined from OSO-4 EUV Spectroheliograms. *Solar Phys.*, 27:271–279, December 1972. doi: 10.1007/BF00153097.
- B. R. Durney. On Theories of Solar Rotation. In V. Bumba i J. Kleczek, editors, *Basic Mechanisms of Solar Activity*, volume 71 of *IAU Symposium*, page 243, 1976.
- B. R. Durney. On the solar differential rotation - Meridional motions associated with a slowly varying angular velocity. *Astrophys. J.*, 407:367–379, April 1993. doi: 10.1086/172519.
- B. R. Durney. On The Torsional Oscillations In Babcock-Leighton Solar Dynamo Models. *Solar Phys.*, 196:1–18, September 2000. doi: 10.1023/A:1005266211666.
- T. L. Duvall, Jr. Large-scale solar velocity fields. *Sol. Phys.*, 63:3–15, August 1979. doi: 10.1007/BF00155690.
- T. L. Duvall, Jr., W. A. Dziembowski, P. R. Goode, D. O. Gough, J. W. Harvey, i J. W. Leibacher. Internal rotation of the sun. *Nature*, 310:22–25, July 1984. doi: 10.1038/310022a0.
- J. A. Eddy, P. A. Gilman, i D. E. Trotter. Solar rotation during the Maunder Minimum. *Solar Phys.*, 46:3–14, January 1976. doi: 10.1007/BF00157550.
- E. H. Erwin, H. E. Coffey, W. F. Denig, D. M. Willis, R. Henwood, i M. N. Wild. The Greenwich Photo-heliographic Results (1874 - 1976): Initial Corrections to the Printed Publications. *Solar Phys.*, 288:157–170, November 2013. doi: 10.1007/s11207-013-0310-z.
- R. P. Feynman. *Feynman lectures on physics - Volume 1*. 1963.
- M. Gigolashvili. About N-S Asymmetry of Differential Rotation of the Sun. In E. R. Schielicke, editor, *Astronomische Gesellschaft Meeting Abstracts*, volume 18 of *Astronomische Gesellschaft Meeting Abstracts*, page 249, 2001.
- P. A. Gilman i R. Howard. Variations in solar rotation with the sunspot cycle. *Astrophys. J.*, 283:385–391, August 1984a. doi: 10.1086/162316.
- P. A. Gilman i R. Howard. On the correlation of longitudinal and latitudinal motions of sunspots. *Solar Phys.*, 93:171–175, June 1984b. doi: 10.1007/BF00156661.

- J. D. Giorgini, D. K. Yeomans, A. B. Chamberlin, P. W. Chodas, R. A. Jacobson, M. S. Keesey, J. H. Lieske, S. J. Ostro, E. M. Standish, i R. N. Wimberly. JPL's On-Line Solar System Data Service. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #28*, volume 28 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 1158, September 1996.
- L. Golub i J. M. Pasachoff. *The Solar Corona*. September 1997.
- L. Golub, A. S. Krieger, J. K. Silk, A. F. Timothy, i G. S. Vaiana. Solar X-Ray Bright Points. *Astrophys. J. Lett.*, 189:L93, April 1974. doi: 10.1086/181472.
- L. Golub, A. S. Krieger, i G. S. Vaiana. Distribution of lifetimes for coronal soft X-ray bright points. *Solar Phys.*, 49:79–90, July 1976. doi: 10.1007/BF00221486.
- I. González Hernández, S. Kholikov, F. Hill, R. Howe, i R. Komm. Subsurface Meridional Circulation in the Active Belts. *Solar Phys.*, 252:235–245, November 2008. doi: 10.1007/s11207-008-9264-y.
- I. González Hernández, R. Howe, R. Komm, i F. Hill. Meridional Circulation During the Extended Solar Minimum: Another Component of the Torsional Oscillation? *Astrophys. J. Lett.*, 713:L16–L20, April 2010. doi: 10.1088/2041-8205/713/1/L16.
- W. Graf. Yearly Variation in the Synodic Rotation Period of the Sun. *Solar Phys.*, 37: 257–260, July 1974. doi: 10.1007/BF00157862.
- E. W. Greisen i M. R. Calabretta. Representations of world coordinates in FITS. *Astron. Astrophys.*, 395:1061–1075, December 2002. doi: 10.1051/0004-6361:20021326.
- E. W. Greisen, M. R. Calabretta, F. G. Valdes, i S. L. Allen. Representations of spectral coordinates in FITS. *Astron. Astrophys.*, 446:747–771, February 2006. doi: 10.1051/0004-6361:20053818.
- E. F. Guinan i S. G. Engle. The Sun in time: age, rotation, and magnetic activity of the Sun and solar-type stars and effects on hosted planets. In E. E. Mamajek, D. R. Soderblom, i R. F. G. Wyse, editors, *IAU Symposium*, volume 258 of *IAU Symposium*, pages 395–408, June 2009. doi: 10.1017/S1743921309032050.
- D. A. Haber, B. W. Hindman, J. Toomre, R. S. Bogart, R. M. Larsen, i F. Hill. Evolving Submerged Meridional Circulation Cells within the Upper Convection Zone Revealed by Ring-Diagram Analysis. *Astrophys. J.*, 570:855–864, May 2002. doi: 10.1086/339631.

- H. J. Hagenaar, C. J. Schrijver, A. M. Title, i R. A. Shine. Dispersal of Magnetic Flux in the Quiet Solar Photosphere. *Astrophys. J.*, 511:932–944, February 1999. doi: 10.1086/306691.
- G. E. Hale. On the Probable Existence of a Magnetic Field in Sun-Spots. *Astrophys. J.*, 28:315, November 1908. doi: 10.1086/141602.
- G. E. Hale, F. Ellerman, S. B. Nicholson, i A. H. Joy. The Magnetic Polarity of Sun-Spots. *Astrophys. J.*, 49:153, April 1919. doi: 10.1086/142452.
- A. Hanslmeier, R. Brajša, J. Čalogović, B. Vršnak, D. Ruždjak, F. Steinhilber, C. L. MacLeod, Ž. Ivezić, i I. Skokić. The chaotic solar cycle. II. Analysis of cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  data. *Astron. Astrophys.*, 550:A6, February 2013. doi: 10.1051/0004-6361/201015215.
- H. Hara. Differential Rotation Rate of X-ray Bright Points and Source Region of their Magnetic Fields. *Astrophys. J.*, 697:980–984, June 2009. doi: 10.1088/0004-637X/697/2/980.
- K. L. Harvey-Angle. *Magnetic Bipoles on the Sun*. PhD thesis, , Utrecht University, The Netherlands, (1993), 1993.
- D. H. Hathaway. Doppler Measurements of the Sun's Meridional Flow. *ApJ*, 460:1027, April 1996. doi: 10.1086/177029.
- D. H. Hathaway. How Large-scale Flows May Influence Solar Activity? In K. Sankarasubramanian, M. Penn, i A. Pevtsov, editors, *Large-scale Structures and their Role in Solar Activity*, volume 346 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 19, December 2005.
- D. H. Hathaway. Supergranules as Probes of the Sun's Meridional Circulation. *Astrophys. J.*, 760:84, November 2012. doi: 10.1088/0004-637X/760/1/84.
- D. H. Hathaway i L. Rightmire. Variations in the Sun's Meridional Flow over a Solar Cycle. *Science*, 327:1350, March 2010. doi: 10.1126/science.1181990.
- R. Howard. Evidence for large-scale velocity features on the sun. *ApJ*, 228:L45–L50, February 1979. doi: 10.1086/182900.
- R. Howard. Solar Rotation. *ARA&A*, 22:131–155, 1984. doi: 10.1146/annurev.aa.22.090184.001023.
- R. Howard i P. A. Gilman. Meridional motions of sunspots and sunspot groups. *ApJ*, 307:389–394, August 1986. doi: 10.1086/164425.

- R. Howard i J. Harvey. Spectroscopic Determinations of Solar Rotation. *Solar Phys.*, 12: 23–51, April 1970. doi: 10.1007/BF02276562.
- R. Howard i B. J. Labonte. The sun is observed to be a torsional oscillator with a period of 11 years. *Astrophys. J. Lett.*, 239:L33–L36, July 1980. doi: 10.1086/183286.
- R. Howard, P. I. Gilman, i P. A. Gilman. Rotation of the sun measured from Mount Wilson white-light images. *Astrophys. J.*, 283:373–384, August 1984. doi: 10.1086/162315.
- R. F. Howard. Cycle latitude effects for sunspot groups. *Sol. Phys.*, 135:327–337, October 1991a. doi: 10.1007/BF00147504.
- R. F. Howard. Axial tilt angles of sunspot groups. *Sol. Phys.*, 136:251–262, December 1991b. doi: 10.1007/BF00146534.
- R. F. Howard. Solar Active Regions As Diagnostics of Subsurface Conditions. *ARA&A*, 34:75–110, 1996. doi: 10.1146/annurev.astro.34.1.75.
- R. Howe. Solar Interior Rotation and its Variation. *Living Reviews in Solar Physics*, 6:1, February 2009. doi: 10.12942/lrsp-2009-1.
- R. Howe, J. Christensen-Dalsgaard, F. Hill, R. W. Komm, R. M. Larsen, J. Schou, M. J. Thompson, i J. Toomre. Deeply Penetrating Banded Zonal Flows in the Solar Convection Zone. *Astrophys. J. Lett.*, 533:L163–L166, April 2000a. doi: 10.1086/312623.
- R. Howe, J. Christensen-Dalsgaard, F. Hill, R. W. Komm, R. M. Larsen, J. Schou, M. J. Thompson, i J. Toomre. Dynamic Variations at the Base of the Solar Convection Zone. *Science*, 287:2456–2460, March 2000b. doi: 10.1126/science.287.5462.2456.
- J. Javaraiah. Long-Term Variations in the Solar Differential Rotation. *Solar Phys.*, 212: 23–49, January 2003. doi: 10.1023/A:1022912430585.
- R. Jurdana-Šepić, R. Brajša, H. Wöhl, A. Hanslmeier, I. Poljančić, L. Svalgaard, i S. F. Gissot. A relationship between the solar rotation and activity in the period 1998–2006 analysed by tracing small bright coronal structures in SOHO-EIT images. *Astron. Astrophys.*, 534:A17, October 2011. doi: 10.1051/0004-6361/201014357.
- M. A. Kambry, J. Nishikawa, T. Sakurai, K. Ichimoto, i E. Hiei. Solar meridional motions derived from sunspot observations. *Sol. Phys.*, 132:41–48, March 1991. doi: 10.1007/BF00159128.
- N. Karachik, A. A. Pevtsov, i I. Sattarov. Rotation of Solar Corona from Tracking of Coronal Bright Points. *Astrophys. J.*, 642:562–567, May 2006. doi: 10.1086/500820.

- R. Kariyappa. Solar coronal rotation determined by X-ray bright points in Hinode/XRT and Yohkoh/SXT full-disc images. *Astron. Astrophys.*, 488:297–301, September 2008. doi: 10.1051/0004-6361:200809598.
- R. W. Komm, R. F. Howard, i J. W. Harvey. Meridional Flow of Small Photospheric Magnetic Features. *Sol. Phys.*, 147:207–223, October 1993a. doi: 10.1007/BF00690713.
- R. W. Komm, R. F. Howard, i J. W. Harvey. Rotation rates of small magnetic features from two- and one-dimensional cross-correlation analyses. *Solar Phys.*, 145:1–10, May 1993b. doi: 10.1007/BF00627979.
- R. W. Komm, R. F. Howard, i J. W. Harvey. Torsional oscillation patterns in photospheric magnetic features. *Solar Phys.*, 143:19–39, January 1993c. doi: 10.1007/BF00619094.
- A. G. Kosovichev, J. Schou, P. H. Scherrer, R. S. Bogart, R. I. Bush, J. T. Hoeksema, J. Aloise, L. Bacon, A. Burnette, C. de Forest, P. M. Giles, K. Leibrand, R. Nigam, M. Rubin, K. Scott, S. D. Williams, S. Basu, J. Christensen-Dalsgaard, W. Dappen, E. J. Rhodes, Jr., T. L. Duvall, Jr., R. Howe, M. J. Thompson, D. O. Gough, T. Sekii, J. Toomre, T. D. Tarbell, A. M. Title, D. Mathur, M. Morrison, J. L. R. Saba, C. J. Wolfson, I. Zayer, i P. N. Milford. Structure and Rotation of the Solar Interior: Initial Results from the MDI Medium-L Program. *Solar Phys.*, 170:43–61, 1997. doi: 10.1023/A:1004949311268.
- J. R. Kuhn, J. D. Armstrong, R. I. Bush, i P. Scherrer. Rossby waves on the Sun as revealed by solar 'hills'. *Nature*, 405:544–546, June 2000.
- G. Küveler i H. Wöhl. Daily variations of the photospheric equatorial rotation velocity of the sun and its absolute values in 1981 and 1982 as determined from measurements using a two-dimensional photodiode array. *Astron. Astrophys.*, 123:29–32, June 1983.
- A. J. Lebedinski. Rotation of the Sun. *Soviet Astron. J.*, 18:10, 1941.
- R. B. Leighton. Transport of Magnetic Fields on the Sun. *Astrophys. J.*, 140:1547, November 1964. doi: 10.1086/148058.
- R. B. Leighton. A Magneto-Kinematic Model of the Solar Cycle. *Astrophys. J.*, 156:1, April 1969. doi: 10.1086/149943.
- J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, P. F. Boerner, C. Chou, J. F. Drake, D. W. Duncan, C. G. Edwards, F. M. Friedlaender, G. F. Heyman, N. E. Hurlburt, N. L. Katz, G. D. Kushner, M. Levay, R. W. Lindgren, D. P. Mathur, E. L. McFeaters, S. Mitchell, R. A. Rehse, C. J. Schrijver, L. A. Springer, R. A. Stern, T. D. Tarbell, J.-P. Wuelser, C. J.

- Wolfson, C. Yanari, J. A. Bookbinder, P. N. Cheimets, D. Caldwell, E. E. Deluca, R. Gates, L. Golub, S. Park, W. A. Podgorski, R. I. Bush, P. H. Scherrer, M. A. Gummin, P. Smith, G. Auken, P. Jerram, P. Pool, R. Souffi, D. L. Windt, S. Beardsley, M. Clapp, J. Lang, i N. Waltham. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.*, 275:17–40, January 2012. doi: 10.1007/s11207-011-9776-8.
- D. W. Longcope, C. C. Kankelborg, J. L. Nelson, i A. A. Pevtsov. Evidence of Separator Reconnection in a Survey of X-Ray Bright Points. *Astrophys. J.*, 553:429–439, May 2001. doi: 10.1086/320667.
- G. Lustig i H. Wöhl. Solar equatorial plasma rotation from 1983 until 1986. *Astron. Astrophys.*, 218:299–301, July 1989.
- G. Lustig i H. Wöhl. Solar meridional plasma motions from 1982 until 1986. *A&A*, 229: 224–227, March 1990.
- P. C. H. Martens, G. D. R. Attrill, A. R. Davey, A. Engell, S. Farid, P. C. Grigis, J. Kasper, K. Korreck, S. H. Saar, A. Savcheva, Y. Su, P. Testa, M. Wills-Davey, P. N. Bernasconi, N.-E. Raouafi, V. A. Delouille, J. F. Hochedez, J. W. Cirtain, C. E. Deforest, R. A. Angryk, I. de Moortel, T. Wiegelmann, M. K. Georgoulis, R. T. J. McAteer, i R. P. Timmons. Computer Vision for the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.*, 275:79–113, January 2012. doi: 10.1007/s11207-010-9697-y.
- E. W. Maunder. The sun and sun-spots, 1820-1920. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 82: 534–543, June 1922.
- S. W. McIntosh i J. B. Gurman. Nine Years Of Euv Bright Points. *Solar Phys.*, 228: 285–299, May 2005. doi: 10.1007/s11207-005-4725-z.
- J. Meeus. *Astronomical algorithms*. Willmann-Bell, Richmond, Virginia, 1991.
- N. Meunier i J. Zhao. Observations of Photospheric Dynamics and Magnetic Fields: From Large-Scale to Small-Scale Flows. *Space Sci. Rev.*, 144:127–149, April 2009. doi: 10.1007/s11214-008-9472-7.
- M. S. Miesch. Large-Scale Dynamics of the Convection Zone and Tachocline. *Living Reviews in Solar Physics*, 2:1, April 2005. doi: 10.12942/lrsp-2005-1.
- M. Mulec, R. Brajša, H. Wöhl, A. Hanslmeier, B. Vršnak, V. Ruždjak, J.-F. Hochedez, i J. Engler. Solar Rotation Velocity Determined by Coronal Bright Points - New Data and Analysis. *Central European Astrophysical Bulletin*, 31:1, 2007.

- D. Nandy. Meridional Circulation and the Solar Magnetic Cycle. In D. Danesy, editor, *SOHO 14 Helio- and Asteroseismology: Towards a Golden Future*, volume 559 of *ESA Special Publication*, page 241, October 2004.
- E. Nesme-Ribes, E. N. Ferreira, i L. Vince. Solar dynamics over solar cycle 21 using sunspots as tracers. II. Meridional motions and covariance. *Astron. Astrophys.*, 276: 211, September 1993.
- S. V. Olemskoy i L. L. Kitchatinov. On the Determination of Meridional Flow on the Sun by the Method of Tracers. *Astronomy Letters*, 31:706–712, October 2005. doi: 10.1134/1.2075313.
- E. N. Parker. The Formation of Sunspots from the Solar Toroidal Field. *Astrophys. J.*, 121:491, March 1955a. doi: 10.1086/146010.
- E. N. Parker. Hydromagnetic Dynamo Models. *Astrophys. J.*, 122:293, September 1955b. doi: 10.1086/146087.
- M. Pérez Garde, M. Vázquez, H. Schwan, i H. Wöhl. Large-scale solar motions as determined by Doppler shift measurements using a linear photodiode array. *A&A*, 93:67–70, January 1981.
- K. Petrovay. Solar Cycle Prediction. *Living Reviews in Solar Physics*, 7:6, December 2010. doi: 10.12942/lrsp-2010-6.
- A. A. Pevtsov i S. M. Latushko. Current Helicity of the Large-Scale Photospheric Magnetic Field. *Astrophys. J.*, 528:999–1003, January 2000. doi: 10.1086/308227.
- I. Poljančič, R. Brajša, D. Ruždjak, D. Hržina, R. Jurdana-Šepić, H. Wohl, i W. Otruba. A Comparison of Sunspot Position Measurements from Different Data Sets. *Sun and Geosphere*, 5:52–57, December 2010.
- E. R. Priest, C. E. Parnell, i S. F. Martin. A converging flux model of an X-ray bright point and an associated canceling magnetic feature. *Astrophys. J.*, 427:459–474, May 1994. doi: 10.1086/174157.
- P. Pulkkinen i I. Tuominen. Velocity structures from sunspot statistics in cycles 10 to 22. II. Latitudinal velocity and correlation functions. *Astron. Astrophys.*, 332:755–760, April 1998a.
- P. Pulkkinen i I. Tuominen. Velocity structures from sunspot statistics in cycles 10 to 22. I. Rotational velocity. *Astron. Astrophys.*, 332:748–754, April 1998b.

- P. Pulkkinen, I. Tuominen, A. Brandenburg, A. Nordlund, i R. F. Stein. Rotational effects on convection simulated at different latitudes. *Astron. Astrophys.*, 267:265–274, January 1993.
- O. Reynolds. On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion. *Royal Society of London Philosophical Transactions Series A*, 186:123–164, 1895. doi: 10.1098/rsta.1895.0004.
- D. Roša, R. Brajša, B. Vršnak, i H. Wöhl. The Relation between the Synodic and Sidereal Rotation Period of the Sun. *Solar Phys.*, 159:393–398, July 1995a. doi: 10.1007/BF00686540.
- D. Roša, B. Vršnak, i H. Božić. Projected Heliographic Coordinates of Objects Located in the Solar Atmosphere. *Hvar Observatory Bulletin*, 19:23–34, 1995b.
- D. Roša, B. Vršnak, H. Božić, R. Brajša, V. Ruždjak, A. Schroll, i H. Wöhl. A Method to Determine the Solar Synodic Rotation Rate and the Height of Tracers. *Solar Phys.*, 179:237–252, 1998.
- G. Rüdiger. Reynolds stresses and differential rotation. I - On recent calculations of zonal fluxes in slowly rotating stars. *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, 16:239–261, 1980. doi: 10.1080/03091928008243659.
- G. Rüdiger. *Differential rotation and stellar convection. Sun and the solar stars*. 1989.
- D. Ruždjak, V. Ruždjak, R. Brajša, i H. Wöhl. Deceleration of the rotational velocities of sunspot groups during their evolution. *Solar Phys.*, 221:225–236, June 2004. doi: 10.1023/B:SOLA.0000035066.96031.4f.
- S. Sanchez, A. Fournier, i J. Aubert. On the predictability limit of a mean-field flux transport solar dynamo model and its implications for solar activity forecasting. *ArXiv e-prints*, June 2013.
- C. Scheiner. *Rosa Ursina sive Sol*. Bracciano, 1630.
- P. H. Scherrer, R. S. Bogart, R. I. Bush, J. T. Hoeksema, A. G. Kosovichev, J. Schou, W. Rosenberg, L. Springer, T. D. Tarbell, A. Title, C. J. Wolfson, I. Zayer, i MDI Engineering Team. The Solar Oscillations Investigation - Michelson Doppler Imager. *Solar Phys.*, 162:129–188, December 1995. doi: 10.1007/BF00733429.
- W. Schmidt. Models of solar differential rotation. *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, 21:27–57, 1982. doi: 10.1080/03091928208209004.



- W. Schmidt i M. Stix. Two comments of the sun's differential rotation. *Astron. Astrophys.*, 118:1–3, February 1983.
- J. Schou, H. M. Antia, S. Basu, R. S. Bogart, R. I. Bush, S. M. Chitre, J. Christensen-Dalsgaard, M. P. di Mauro, W. A. Dziembowski, A. Eff-Darwich, D. O. Gough, D. A. Haber, J. T. Hoeksema, R. Howe, S. G. Korzennik, A. G. Kosovichev, R. M. Larsen, F. P. Pijpers, P. H. Scherrer, T. Sekii, T. D. Tarbell, A. M. Title, M. J. Thompson, i J. Toomre. Helioseismic Studies of Differential Rotation in the Solar Envelope by the Solar Oscillations Investigation Using the Michelson Doppler Imager. *Astrophys. J.*, 505:390–417, September 1998. doi: 10.1086/306146.
- E. H. Schröter. The solar differential rotation - Present status of observations. *Solar Phys.*, 100:141–169, October 1985. doi: 10.1007/BF00158426.
- E. H. Schröter i H. Wöhl. Differential rotation and giant cell circulation of solar Ca/+/-network. *Solar Phys.*, 49:19–32, July 1976. doi: 10.1007/BF00221482.
- M. Schwabe. Sonnenbeobachtungen im Jahre 1843. Von Herrn Hofrath Schwabe in Dessau. *Astronomische Nachrichten*, 21:233, February 1844.
- N. R. Sheeley, Jr., A. G. Nash, i Y.-M. Wang. The origin of rigidly rotating magnetic field patterns on the sun. *Astrophys. J.*, 319:481–502, August 1987. doi: 10.1086/165472.
- I. Skokić, R. Brajša, D. Roša, D. Hržina, i H. Wöhl. Validity of the Relations Between the Synodic and Sidereal Rotation Velocities of the Sun. *Solar Phys.*, 289:1471–1476, May 2014. doi: 10.1007/s11207-013-0426-1.
- H. B. Snodgrass. Magnetic rotation of the solar photosphere. *Astrophys. J.*, 270:288–299, July 1983. doi: 10.1086/161121.
- H. B. Snodgrass. Separation of large-scale photospheric Doppler patterns. *Solar Phys.*, 94:13–31, August 1984. doi: 10.1007/BF00154804.
- H. B. Snodgrass i S. B. Dailey. Meridional Motions of Magnetic Features in the Solar Photosphere. *Solar Phys.*, 163:21–42, January 1996. doi: 10.1007/BF00165454.
- H. B. Snodgrass i R. Howard. Torsional oscillations of low mode. *Solar Phys.*, 95:221–228, February 1985. doi: 10.1007/BF00152399.
- H. B. Snodgrass i R. K. Ulrich. Rotation of Doppler features in the solar photosphere. *Astrophys. J.*, 351:309–316, March 1990. doi: 10.1086/168467.

- E. A. Spiegel i J.-P. Zahn. The solar tachocline. *Astron. Astrophys.*, 265:106–114, November 1992.
- M. Stix. *The Sun: An Introduction*. Springer, Berlin, 2004.
- D. Sudar, I. Skokić, D. Ruždjak, R. Brajša, i H. Wöhl. Tracing sunspot groups to determine angular momentum transfer on the Sun. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 439: 2377–2385, February 2014. doi: 10.1093/mnras/stu099.
- M. J. Thompson, J. Toomre, E. R. Anderson, H. M. Antia, G. Berthomieu, D. Burtonclay, S. M. Chitre, J. Christensen-Dalsgaard, T. Corbard, M. De Rosa, C. R. Genovese, D. O. Gough, D. A. Haber, J. W. Harvey, F. Hill, R. Howe, S. G. Korzennik, A. G. Kosovichev, J. W. Leibacher, F. P. Pijpers, J. Provost, E. J. Rhodes, Jr., J. Schou, T. Sekii, P. B. Stark, i P. R. Wilson. Differential Rotation and Dynamics of the Solar Interior. *Science*, 272:1300–1305, May 1996. doi: 10.1126/science.272.5266.1300.
- W. T. Thompson. Coordinate systems for solar image data. *Astron. Astrophys.*, 449: 791–803, April 2006. doi: 10.1051/0004-6361:20054262.
- R. K. Ulrich. Very Long Lived Wave Patterns Detected in the Solar Surface Velocity Signal. *Astrophys. J.*, 560:466–475, October 2001. doi: 10.1086/322524.
- F. W. Very. Heliographic Positions. II. *Astrophys. J.*, 6:400, December 1897. doi: 10.1086/140422.
- B. Vršnak, R. Brajša, H. Wöhl, V. Ruždjak, F. Clette, i J.-F. Hochedez. Properties of the solar velocity field indicated by motions of coronal bright points. *Astron. Astrophys.*, 404:1117–1127, June 2003. doi: 10.1051/0004-6361:20030502.
- M. Waldmeier. *Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung*. 1955.
- Y.-M. Wang. The Sun's Large-Scale Magnetic Field and Its Long-Term Evolution. *Solar Phys.*, 224:21–35, October 2004. doi: 10.1007/s11207-005-4982-x.
- Y.-M. Wang i N. R. Sheeley, Jr. The rotation of photospheric magnetic fields: A random walk transport model. *Astrophys. J.*, 430:399–412, July 1994. doi: 10.1086/174415.
- F. Ward. The General Circulation of the Solar Atmosphere and the Maintenance of the Equatorial Acceleration. *Astrophys. J.*, 141:534, February 1965. doi: 10.1086/148143.
- G. Wibberenz. Propagation of Cosmic Rays in Interplanetary Space. In A. Bruzek i H. Pilkuhn, editors, *Lectures on Space Physics 1: Cosmic Rays and Space Biophysics*, page 81, 1973.

- D. M. Willis, H. E. Coffey, R. Henwood, E. H. Erwin, D. V. Hoyt, M. N. Wild, i W. F. Denig. The Greenwich Photo-heliographic Results (1874 - 1976): Summary of the Observations, Applications, Datasets, Definitions and Errors. *Solar Phys.*, 288:117–139, November 2013a. doi: 10.1007/s11207-013-0311-y.
- D. M. Willis, R. Henwood, M. N. Wild, H. E. Coffey, W. F. Denig, E. H. Erwin, i D. V. Hoyt. The Greenwich Photo-heliographic Results (1874 - 1976): Procedures for Checking and Correcting the Sunspot Digital Datasets. *Solar Phys.*, 288:141–156, November 2013b. doi: 10.1007/s11207-013-0312-x.
- A. D. Wittmann. On the Relation between the Synodic and Sidereal Rotation Period of the Sun. *Solar Phys.*, 168:211–213, September 1996. doi: 10.1007/BF00145837.
- H. Wöhl i R. Brajša. Meridional Motions of Stable Recurrent Sunspot Groups. *Sol. Phys.*, 198:57–77, January 2001.
- H. Wöhl, R. Brajša, A. Hanslmeier, i S. F. Gissot. A precise measurement of the solar differential rotation by tracing small bright coronal structures in SOHO-EIT images. Results and comparisons for the period 1998-2006. *Astron. Astrophys.*, 520:A29, September 2010. doi: 10.1051/0004-6361/200913081.
- J. Zhang, M. R. Kundu, i S. M. White. Spatial Distribution and Temporal Evolution of Coronal Bright Points. *Solar Phys.*, 198:347–365, February 2001. doi: 10.1023/A:1005222616375.
- J. Zhao i A. G. Kosovichev. Torsional Oscillation, Meridional Flows, and Vorticity Inferred in the Upper Convection Zone of the Sun by Time-Distance Helioseismology. *ApJ*, 603:776–784, March 2004. doi: 10.1086/381489.
- J. Zhao, R. S. Bogart, A. G. Kosovichev, T. L. Duvall, Jr., i T. Hartlep. Detection of Equatorward Meridional Flow and Evidence of Double-cell Meridional Circulation inside the Sun. *Astrophys. J. Lett.*, 774:L29, September 2013. doi: 10.1088/2041-8205/774/2/L29.

# Životopis

Ivica Skokić rođen je u Osijeku, 3. studenog 1976. godine. Osnovnu školu i Prirodoslovno-matematičku gimnaziju pohađa u Ivanovcima i Valpovu, a potom upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku, gdje diplomira 2002. na smjeru elektronike i automatizacije. Nakon civilnog služenja vojnog roka, zapošljava se u Tvornici Elektro Opreme u Belišću, a potom upisuje poslijediplomski studij fizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu, smjer Atomska i molekularna fizika i astrofizika. U međuvremenu radi u tvrtkama Siemens d.d. Osijek, Odašiljači i veze d.o.o. Zagreb te Cybrotech d.o.o. Zagreb gdje i danas radi kao programer.

Član je Hrvatskog Astronomskog Društva, Hrvatske Meteorske Mreže, Međunarodne Meteorske Organizacije i Hrvatskog Astronomskog Saveza. Suosnivač je i član astronomskog društva „Anonymus“.

## Radovi u CC časopisima

1. Sudar, D.; Skokić, I.; Ruždjak, D.; Brajša, R.; Wöhl, H.: *Tracing sunspot groups to determine angular momentum transfer on the Sun*, MNRAS. 439:3 (2014), 2377-2385
2. Skokić, I.; Brajša, R.; Roša, D.; Hržina, D.; Wöhl, H.: *Validity of the relations between the synodic and sidereal rotation velocities of the Sun*, Solar Physics. 289:5 (2014), 1471-1476
3. Hanslmeier, A.; Brajša, R.; Čalogović, J.; Vršnak, B.; Ruždjak, D.; Steinhilber, F.; MacLeod, L. C.; Ivezić, Ž.; Skokić, I.: *The chaotic solar cycle - II. Analysis of cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  data*, Astronomy & Astrophysics. 550 (2013), A6-1-A6-8

## Radovi u ostalim časopisima

1. Šegon, D.; Andreić, Ž.; Korlević, K.; Novoselnik, F.; Vida, D.; Skokić, I.: *A possible new shower eta Hydrids*, WGN. 41:5 (2013), 157-159
2. Andreić, Ž.; Šegon, D.; Korlević, K.; Novoselnik, F.; Vida, D.; Skokić, I.: *Ten possible new showers from the Croatian Meteor Network and SonotaCo datasets*,

WGN. 41:4 (2013), 103-108

3. Šegon, D.; Andreić, Ž.; Korlević, K.; Novoselnik, F.; Vida, D.; Skokić, I.: *8 new showers from Croatian Meteor Network data*, WGN. 41:3 (2013), 70-74
4. Korlević, K.; Šegon, D.; Andreić, Ž.; Novoselnik, F.; Vida, D.; Skokić, I.: *Croatian Meteor Network Catalogues of Orbits for 2008 and 2009*, WGN. 41:2 (2013), 48-51
5. Šegon, D.; Andreić, Ž.; Korlević, K.; Gural, P.; Novoselnik, F.; Vida, D.; Skokić, I.: *New shower in Cassiopeia*, WGN. 40:6 (2012), 195-200
6. Brajša, R.; Wöhl, H.; Vršnak, B.; Ruždjak, V.; Clette, F.; Hochedez, J.-F.; Verbanac, G.; Skokić, I.; Hanslmeier, A.: *Proper Motions of Coronal Bright Points*, Central European Astrophysical Bulletin. 32 (2008), 165-190

## Radovi u pripremi i postupku objavljivanja

1. Skokić, I.; Brajša, R.; Sudar, D.; Saar, S. H.: *Short-term Solar Surface Velocity Profile from SDO/AIA Coronal Bright Point Measurements*.
2. Brajša, R.; Verbanac, G.; Sudar, D.; Skokić, I.; Hanslmeier, A.; Wöhl, H.; Roth, M.; Ludmany, A.; Muraközy, J.; MacLeod, C.L.; Ivezić, Ž.; Mursula, K.; Zhang, L.: *A prediction for the 24th solar cycle obtained combining various methods*, Solar Physics.
3. Šegon, D.; Andreić, Ž.; Gural, P. S.; Korlević, K.; Vida, D.; Novoselnik, F.; Skokić, I.: *Draconids 2011. Observations by the Croatian Meteor Network*, Earth, Moon, and Planets.

## Konferencije, predavanja, prezentacije i radionice

- Šegon, D.; Andreić, Ž.; Gural, P. S.; Skokić, I.; Korlević, K.; Vida, D.; Novoselnik, F.: *A Parent Body Search Across Several Video Meteor Databases*, International Conference on Minor Bodies in the Solar System, Poznan, Poljska (prezentacija, objavljeni rad)
- Šegon, D.; Gural, P.; Andreić, Ž.; Vida, D.; Skokić, I.; Korlević, K.; Novoselnik, F.: *Meteor Shower Search in the CMN and SonotaCo Orbital Data Bases*, International Meteor Conference, 22.-25. kolovoza 2013., Poznan, Poljska (prezentacija, poster, objavljeni rad)
- Šegon, D.; Andreić, Ž.; Gural, P. S.; Korlević, K.; Vida, D.; Novoselnik, F.; Skokić, I.: *Draconids 2011 outburst observations by Croatian Meteor Network*, International Meteor Conference, 20.-23. rujna 2012., La Palma, Španjolska (prezentacija, objavljeni rad)

- XIIth Hvar Astrophysical Colloquium, 3.-7. rujna 2012., Hvar, Hrvatska
- Brajša, R.; Sudar, D.; Skokić, I.; Munk, P.; Jurdana-Šepić, R.; Poljančić-Beljan, I.; Wöhl, H.; Hanslmeier, A.; Gissot, S. F.; Svalgaard, L.; Saar, S. H.: *Some Properties of the Solar Velocity Field Determined with the SOHO-EIT Data*, 28. studenog-02. prosinca 2011., Eighth European Space Weather Week, Namur, Belgija (poster)
- Brajša, R.; Munk, P.; Skokić, I.; Sudar, D.; Ruždjak, D.; Jurdana-Šepić, R.; Poljančić, I.; Wöhl, H.; Hanslmeier, A.; Mulec, M.; Svalgaard, L.; Gissot, S.; Ludmany, A.; Gyenge, N.: *On the solar rotation and activity during the 23rd solar cycle*, 9.-12. listopada 2011., Central European Solar Physics Meeting 5, Bairisch Kölldorf, Austrija (prezentacija)
- International Meteor Conference, 15.-18. rujna 2011., Sibiu, Rumunjska
- International Meteor Conference, 16.-19. rujna 2010., Armagh, Sjeverna Irska
- Novoselnik, F.; Vida, D.; Skokić, I.; Gregić, R.: *Kako otkriti supernovu*, Astronomski kamp Letenka, 15.-18. srpnja 2010., Letenka, Srbija (predavanje)
- Skokić, I.; Gregić, R.; Novoselnik, F.; Vida, D.: *Misija: pronalaženje supernove*, SciBar, Fakultet organizacije i informatike, 8. srpnja 2010., Varaždin, Hrvatska (predavanje)
- Novoselnik, F.; Vida, D.; Skokić, I.; Gregić, R.: *Using NEO Survey Images for Supernova Hunting*, Meeting on Asteroids and Comets in Europe, 21.-23. svibnja 2010., Višnjan, Hrvatska (prezentacija)
- International Meteor Conference, 24.-27. rujna 2009., Poreč, Hrvatska
- Brajša, R.; Wöhl, H.; Hanslmeier, A.; Mulec, M.; Skokić, I.; Verbanac, G.; Hagenaar, H.; Ruždjak, V.; Hochedez, J.-F.: *Velocity Field on the Sun Determined by Coronal Bright Points*, 10.-12. listopada 2007., Central European Solar Physics Meeting 3, Bairisch Kölldorf, Austrija (prezentacija)