Magnetsko polje Sunca

Bošković, Stjepan

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:775271

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Department of Physics in Osijek







SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



STJEPAN BOŠKOVIĆ

MAGNETSKO POLJE SUNCA

Završni rad

OSIJEK, 2016.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



STJEPAN BOŠKOVIĆ

MAGNETSKO POLJE SUNCA

Završni rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku radi stjecanja zvanja prvostupnika fizike

OSIJEK, 2016.

"Ovaj završni rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Branka Vukovića i komentora dr. sc. Maje Varga Pajtler u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija Fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera. "

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. OSNOVNA RAZMATRANJA 3
3. GLAVNE OSOBINE MAGNETSKOG POLJA I SUNČEV CIKLUS 4
3.1 Rasprostranjenost magnetskih područja na površini 4
3.2 Ciklus od 11 (22) godina 5
4. SUNČEVE PJEGE I OSTALE MAGNETSKE POJAVE 7
4.1 Sunčeve pjege 7
4.1.1 Temeljne karakteristike 7
4.1.2 Brojevi Sunčevih pjega 8
4.1.3 Wilsonov i Evershedov efekt 9
4.2 Sunčeve prominencije i baklje 10
4.3 Sunčev vjetar 11
5. SUNČEV DINAMO MEHANIZAM 12
5.1 Pretpostavke o mehanizmu 12
5.2 Očuvanje magnetske helikoidne strukture 13
6. MAGNETSKO POLJE U POJEDINIM ZONAMA 15
6.1 Konvekcijska zona 15
6.2 Kromosfera i korona 15
6.2.1 „Magnetska kupola i tepih“ 16
6.2.2 Karakteristike korone 16
6.3 Heliosfera 17
7. ZAKLJUČAK 19
8. LITERATURA 20
9. ŽIVOTOPIS 21

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku Završni rad

Odjel za fiziku

MAGNETSKO POLJE SUNCA

STJEPAN BOŠKOVIĆ

Sažetak

Sunce je pojam kojeg svakodnevno susrećemo i upotrebljavamo u raznim kontekstima, no ako želimo nešto više znati o Suncu općenito, ponajviše o Sunčevoj unutrašnjosti i aktivnostima, onda je magnetsko polje Sunca zasigurno neizostavan pojam.

U ovom završnom radu bit će detaljnog govora o magnetskom polju Sunca. U prvom dijelu rada teorijski su obrađeni osnovni podaci i razmatranja. U središnjem dijelu rada slijedi razrada temeljnih pojmova vezanih uz nastanak i ponašanje magnetskog polja općenito i konkretni učinci u pojedinim područjima. Zanimljive fenomene koje uzrokuje magnetsko polje na Sunčevoj površini i unutrašnjosti, uz teorijsku obradu sadrže i ilustracijske slike.

(21 stranica, 11 slika, 16 literaturna navoda)

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku.

Ključne riječi: ciklus/ dinamo/ magnetsko polje/ Sunčeve pjege/ Sunce

Mentor: izvr.prof.dr.sc Branko Vuković, dr.sc. Maja Varga Pajtler

Ocjenjivači:

Rad prihvaćen:

University Josip Juraj Strossmayer Osijek
Department of Physics

Bachelor of Physics Thesis

THE MAGNETIC FIELD OF THE SUN

STJEPAN BOŠKOVIĆ

Abstract

Sun is a term which we daily encounter and use in different contexts, but if we want to know something more about the Sun and Sun's interior and activities, then the magnetic field of the Sun is an indispensable term.

In this bachelor's thesis there will be a detailed discussion about Sun's magnetic field. To begin with, there are theoretically analyzed basic data followed by elaboration of basic terms related to occurrence and behavior of magnetic field in general and specific effects in certain areas. Interesting phenomena which are caused by magnetic filed on Sun's surface and interior, along with theoretical treatment are illustrated by pictures.

(21 pages, 11 figures, 16 references)

Thesis deposited in department of Physics library

Keywords: cycle/ dynamo/ magnetic field/ Sunspot/ Sun

Supervisor: Proffesor Branko Vuković, PhD, Maja Varga Pajtler, PhD

Reviewers:

Thesis accepted:

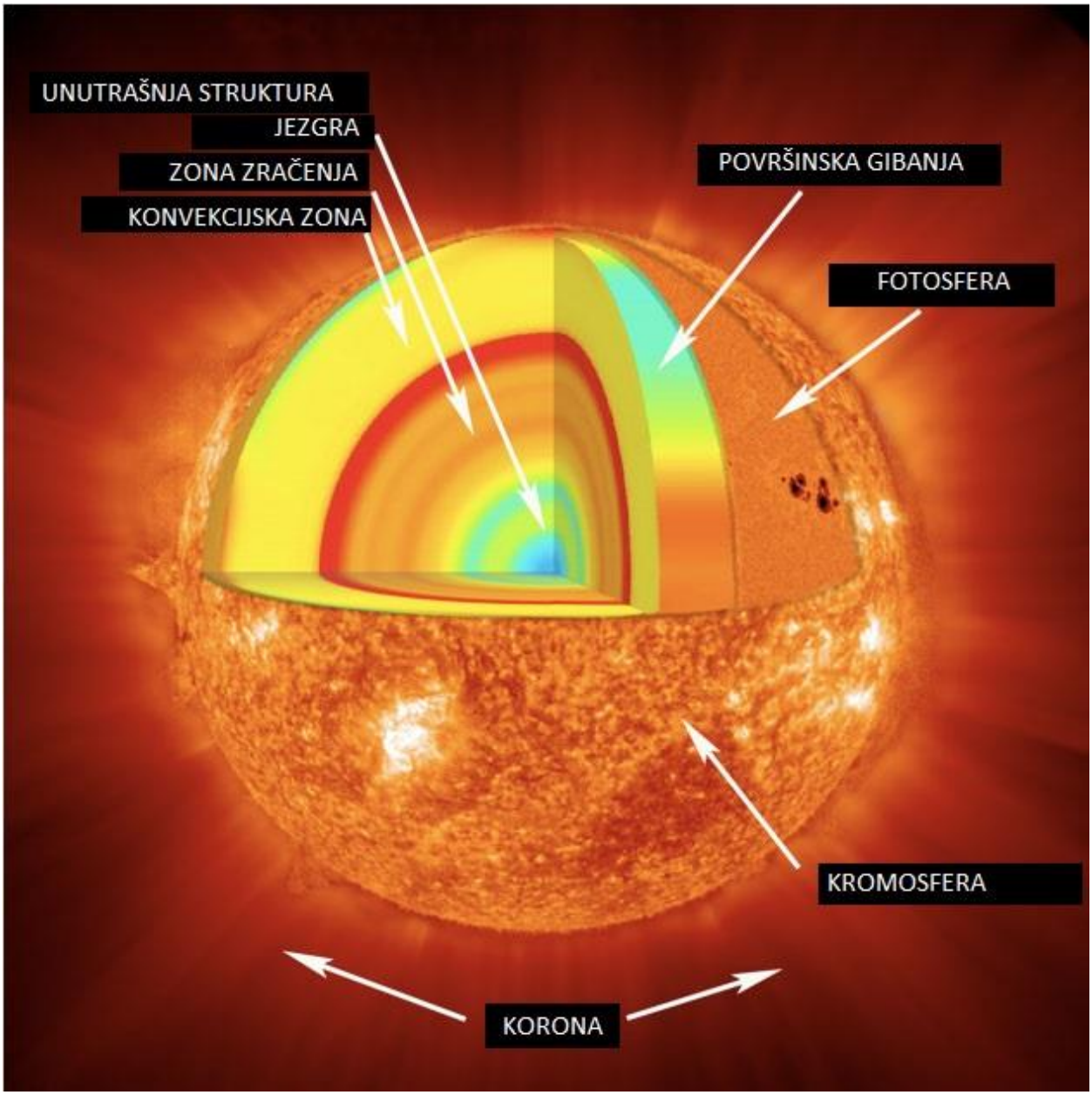
1. UVOD

Sunce je zvijezda koja se nalazi u središtu našeg Sunčevog sustava. Sama struktura Sunca je veoma složena te se dijeli na unutrašnju strukturu Sunca koju čine vruća jezgra, zona zračenja i konvekcijska zona, a površinski dio se sastoji od fotosfere, kromosfere i korone kao što je prikazano na Slici 1. Unutrašnjost Sunca sastoji se od plinovite vruće plazme[1] kroz čiju se strukturu prostire magnetsko polje. Kad Sunce ne bi imalo magnetsko polje, bilo bi ga puno jednostavnije opisati zbog malog odstupanja od sferne simetričnosti uslijed diferencijalne rotacije[2], a razne konvekcije, oscilacije i valovi prouzrokovali bi samo pozadinske smetnje. Također, pojmovi kao Sunčeve pjege i korone[3], Sunčev vjetar[4] i prominencije[5] te ostali pojmovi vezani za Sunce bili bi nepoznati.

Sunčev magnetizam ima vodeću ulogu u području Sunčevog istraživanja upravo zato što je puno toga nepoznato. Općenito znanje o snazi i strukturi magnetskog polja je veoma loše, a sve što se zna dobilo se iz fotosfere (prividna površina Sunca) i analize EUV[6] slika o pojavama koje nastaju na površini. To i nije baš sjajna spoznaja budući da magnetsko polje ima slabu ulogu u fotosferi, a potpuno dominira procesima u neistraženim unutrašnjim područjima. Nedostatak detaljnijih mjerenja sprječava razvoj fizike u tom području i pronalazak odgovora na razna pitanja koja se postavljaju.

U ovom radu bit će opisano magnetsko polje Sunca. Zbog boljeg razumijevanja teme rad sadrži detaljnije opise svih pojava koje utječu na magnetsko polje, a zasebno su obrađene važne komponente kao Sunčeve pjege i Sunčev mehanizam.

[1] Plazma – „4. stanje tvari“, ionizirani plin koji ima barem jedan elektron odvojen od atoma ili molekula
[2] Diferencijalna rotacija – Sunce se brže okreće u području ekvatora nego na polovima
[3] Korona – vanjski dio atmosfere Sunca
[4] Sunčev vjetar – plazma vrlo male gustoće koju emitira Sunce u svim smjerovima
[5] Prominencije – svijetle pojave u koroni iznad Sunčeve površine
[6] EUV – (eng. extra ultraviolet) ekstra ultra-ljubičasto



Slika 1. Struktura Sunca [14]

2. OSNOVNA RAZMATRANJA

Mehanizam koji upravlja donjim dijelom Sunčeve konvekcijske zone[7] generalno se smatra izvorom Sunčevog magnetskog polja. Trenutna predviđanja smještaju taj mehanizam u prostor između konvekcijske zone i zone zračenja[8] koji se još naziva i zona preleta. Tu se odvijaju snažni procesi u kojima magnetsko polje izlazi iz zone preleta te prolazi kroz konvekcijsku zonu i izbija na Sunčevu površinu i na kraju formira petlju čiji se vrh najčešće nalazi u području korone[9], a mjesta gdje krakovi petlje sijeku površinu Sunca nazivaju se Sunčeve pjege.

Struktura i svojstva samog polja variraju s promjenom visine. Većina oslobođene magnetske energije ostaje u prostoru magnetskog polja pa koncentracija magnetskog toka u grubo može biti opisana kao paket približno paralelnih linija s relativno oštrom granicom. Područja magnetskog polja na samoj površini mogu se vidjeti kao veoma mala i svijetla ili kao jako velika i tamna (Sunčeve pjege). Iako svojstva magnetskog polja variraju, jakost na površini je iznenađujuće homogena te iznosi oko 0,15 T. Zahvaljujući tlaku koji nastane uslijed djelovanja magnetskog polja, magnetska polja snažno eruptiraju te su približno vertikalna. Uslijed erupcije, većina energije na površini oslobađa se u obliku toplinske energije plinova, a na većim visinama opada gustoća magnetskog toka i tlak plina. Na velikim udaljenostima, točnije na 10-20 polumjera Sunca, kinetička energija Sunčevog vjetra izjednačava se s energijom magnetskog toka (Alfvenov radijus). Na još većim udaljenostima, Sunčev vjetar dominira i uzdužno usmjerava linije magnetskog polja što u kombinaciji sa Sunčevom rotacijom rezultira spiralnim oblikom magnetskog polja [1,14].

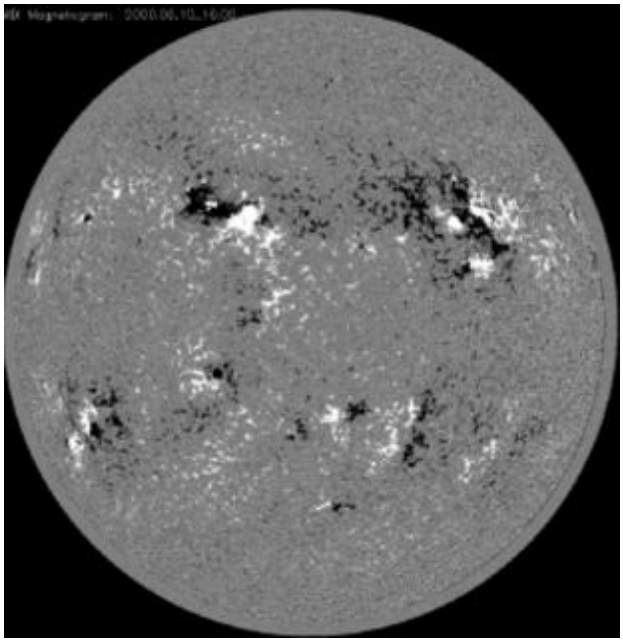
[7] Konvekcijska zona – dio Sunca koji se proteže od 2/3 polumjera Sunca do fotosfere
[8] Zona zračenja – sloj iznad jezgre (unutrašnjost Sunca koja čini oko 1/5 polumjera)
[9] Korona – vanjski dio atmosfere Sunca male gustoće i visoke temperature

3. GLAVNE OSOBINE MAGNETSKOG POLJA I SUNČEV CIKLUS

Sunčevo magnetsko polje pokazuje nevjerojatan stupanj uređenosti i organiziranosti u prostoru i vremenu, a svojstva magnetskih područja na Sunčevoj površini i smjerovi polja sustavno utječu na smjer Sunčevog aktivnog ciklusa[10].

3.1 Rasprostranjenost magnetskih područja na površini

Karte magnetskog polja pokazuju strukturu i rasprostranjenost polja na Sunčevoj površini. Tijekom perioda jakih Sunčevih aktivnosti, velika magnetska područja ukazuju na mjesta gdje se nedavno dogodila aktivnost, odnosno gdje je polje izbilo na površinu iz dubine Sunca. Na Slici 2. vidi se da postoje i velika područja privremeno neaktivnih polja koja se nalaze na Sunčevim polovima, a predstavljaju globalne polove Sunčevog magnetskog polja koji su usklađeni sa rotacijskom osi.



Slika 2. Velika područja privremeno neaktivnih polja gdje crne i bijele nijanse predstavljaju pozitivne i negativne magnetske polove [2]

[10] Sunčev ciklus – traje u prosjeku 11 godina tijekom kojih se mijenja količina Sunčevog zračenja

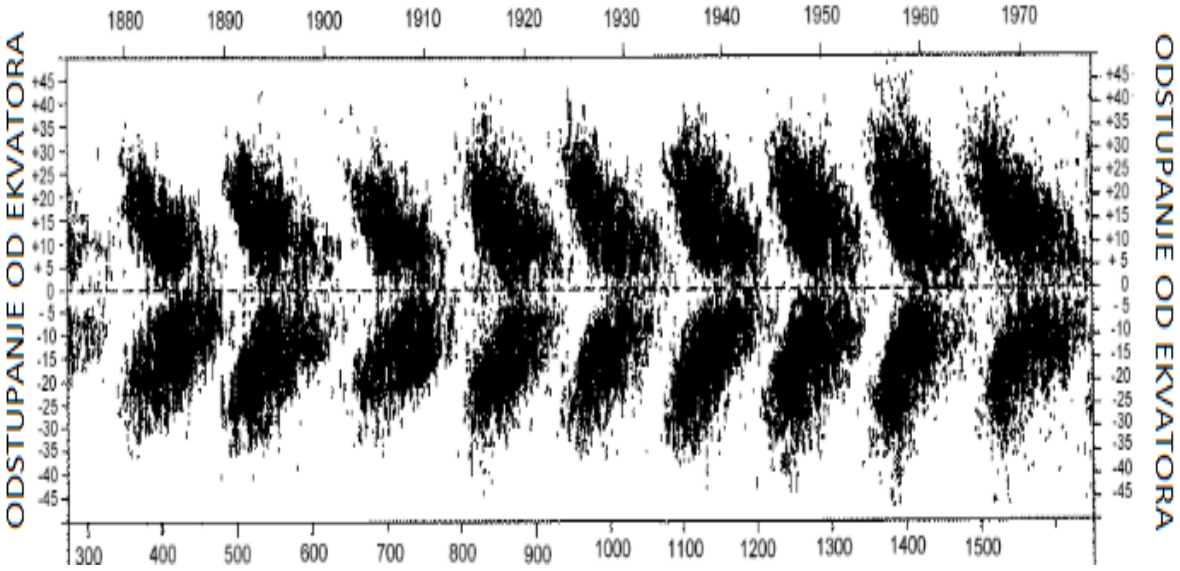
Magnetska polja na površini imaju velike vrijednosti magnetskog toka[11] i dug vijek trajanja. Najveća aktivna područja dosežu magnetski tok od oko 10^{15} Wb i trajanje od nekoliko mjeseci, dok ona najmanja imaju magnetski tok od oko 10^{11} Wb i traju manje od jednog dana, odnosno traju dok magnetski tok ne iščezne ili se spoji s već postojećim pozadinskim tokom. Velika područja magnetskog polja formiraju grupe izraženih Sunčevih pjega te ih se zato lako prepoznaje, dok se ona slabija područja mogu detektirati samo izravnim mjerenjem magnetskog polja. Također, proučavanjem magnetskih područja dobivaju se podaci o magnetskoj strukturi izvora koji se nalazi blizu dna konvekcijske zone. Iz tih podataka doznaje se da su aktivna područja većinom orijentirana u pravcu istok-zapad kao i još neka druga svojstva. [2,16].

3.2 Ciklus od 11 (22) godina

Sve Sunčeve aktivnosti mogu se složiti u jedan, ne strogo periodičan, 11-godišnji ciklus. Postoji dobra usklađenost naizgled nasumičnih pojava i razvoja magnetske strukture u aktivnim slojevima Sunca, a to se najbolje vidi iz zamjene magnetskih polova grupa Sunčevih pjega ili magnetskih područja koja zaokružuje dva puta 11-godišnji aktivni ciklus.

Prosječan položaj Sunčevih pjega mijenja se tijekom 11-godišnjeg ciklusa. U početku, pjege se poslože u dva pojasa koja se nalaze na otprilike 30 stupnjeva iznad i ispod ekvatora, međutim tijekom ciklusa one lagano padaju prema ekvatoru te se na kraju nalaze na otprilike 5 stupnjeva s obzirom na ekvator. Kada se podaci stave na dijagram vremena i otklona dobije se oblik leptira (kao što je prikazano na Slici 3.), koji je zastupljen i u izgledu magnetskog polja na samoj površini Sunca.

[11] Magnetski tok – broj silnica magnetskog polja koje prolazi kroz neku površinu



Slika 3. Bilježeni položaji pjega tijekom ciklusa formiraju oblik leptira [3]

Sunčeve pjege najčešće se nalaze u grupi koja čini magnetsko područje. Polaritet takvih područja je određen Haleovim zakonom koji je definiran na temelju mjerenja magnetskog polja takvih grupa Sunčevih pjega, iz čega proizlaze 3 bitne činjenice:

- Magnetska orijentacija područja ostaje ista u svakom dijelu hemisfere tijekom 11-godišnjeg ciklusa
- Područja na sjevernoj i južnoj hemisferi imaju različitu magnetsku orijentaciju
- Magnetska orijentacija područja mijenja se s izmjenom ciklusa

Kao posljedica ovih pravila, magnetska orijentacija se ponavlja nakon 2 ciklusa, a to je ukupno 22 godine. Tijekom ciklusa dolazi i do odstupanja od pravca istok-zapad. Otklon kuta od pravca istok-zapad označava se sa γ i proporcionalan je glavnom otklonu λ s obzirom na ekvator, a ta dva parametra opisana su Joyovim zakonom: $\gamma \simeq \lambda/2$. Veće Sunčeve pjege uglavnom se ponašaju u skladu sa Joyovim zakonom, dok on ne vrijedi za manja područja.

Magnetske aktivnosti imaju samo manji utjecaj na rotaciju Sunca. Mjerenja nisu pokazala ozbiljnije promjene na dnu konvekcijske zone u ciklusu od 11 godina, međutim postoje određene indikacije koje upućuju na promjenu vremena rotacije u području konvekcijske zone u periodu od 1,3 godina, no još se ne zna potječu li te promjene od magnetskog polja [1,3,15].

4. SUNČEVE PJEGE I OSTALE MAGNETSKE POJAVE

4.1 Sunčeve pjege

Sunčeve pjege istražuju se više od 400 godina, odnosno od kada ih je Galileo promatrao svojim teleskopom. Tijekom godina njihova analiza davala je mnoštvo podataka, ali znatan procvat dogodio se tek 1908. godine kada je Hale iz Sunčevih pjega procijenio magnetsku aktivnost. To su ujedno bila i prva mjerenja Sunčevog magnetskog polja izvan Zemlje iz kojih se došlo do zaključka da je magnetsko polje pravi uzrok nastanka Sunčevih pjega.

U znanstvenom radu „O Sunčevim pjegama“ (1736.), Ruđer Bošković opisao je dvije metode za određivanje perioda vrtnje Sunca i položaj osi rotacije iz triju položaja jedne Sunčeve pjege, a Rudolf Wolf uveo je tzv. Wolfov relativni broj Sunčevih pjega:

$$R = k \cdot (10 \cdot g + s) \quad , \tag{1}$$

pri čemu je s broj pojedinačnih Sunčevih pjega koji se u periodu promatranja nalazi na vidljivoj strani Sunca, g broj skupina Sunčevih pjega, a k koeficijent koji ovisi o osjetljivosti instrumenata i utjecaju drugih čimbenika.

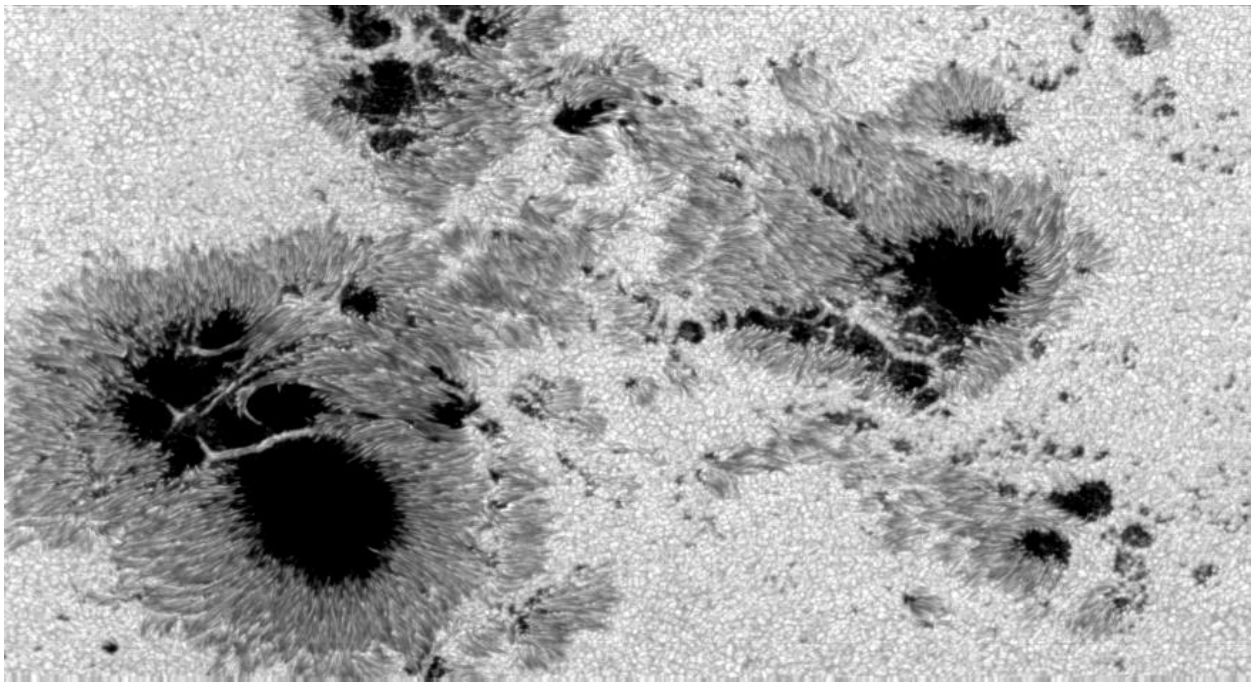
4.1.1 Temeljne karakteristike

Kao što je prikazano na Slici 4., svaku pjegu karakterizira tamna jezgra, sjena, malo svjetliji vijenac i polusjena, a polusjena je upravo ono što pjegu razlikuje od manjih pukotina.

Svjetlina i temperatura pjega ponašaju se kao funkcija položaja, odnosno ovise o tome gdje se pjega nalazi. Sjena čini maleno i veoma tamno područje, ali procjena svjetline se ne može odrediti sa velikom sigurnošću. Polusjena čini pomiješano tamno-svijetlo područje koje se najbolje može opisati i analizirati, a jezgra uglavnom ostaje nepoznanica.

S obzirom na veličinu, najveće pjege mogu doseći promjer od oko 60 000 km, ali se takve veoma rijetko pojavljuju, baš kao i one najmanje koje su promjera ispod 3 000 km. Veličina je povezana sa životnim vijekom pjege pa zato one veće pjege žive mjesecima, dok one manje traju kraće od jednog dana. Nakon što dosegnu maksimalan promjer, polagano se raspadaju, a ti raspadi stvaraju poremećaje u magnetskom polju.

Sunčeve pjege imaju jakost magnetskog polja od otprilike 0,25-0,35 T u unutrašnjosti, dok na samoj površini taj iznos pada na otprilike 0,07-0,1 T. Iz podataka o mjerenju jakosti polja moguće je odrediti koliko prosječno magnetskog toka izbija kroz sjenu i polusjenu, a pokazalo se da više od pola proizlazi iz područja polusjene.



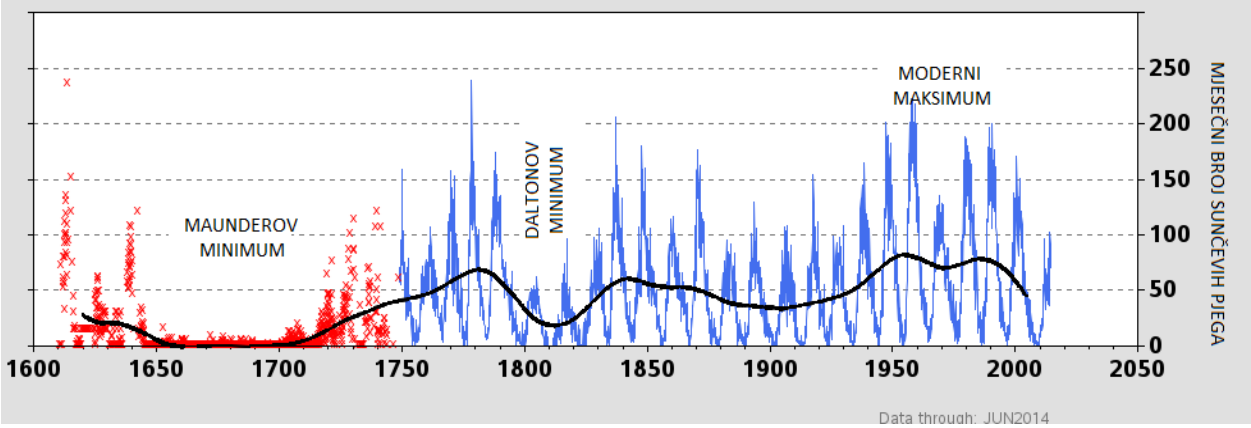
Slika 4. Sunčeve pjege pod bijelom svjetlošću [3]

4.1.2 Brojevi Sunčevih pjega

Najduža izravna metoda mjerenja Sunčeve aktivnosti izvodi se pomoću brojeva Sunčevih pjega, a metoda se počela koristiti odmah nakon izuma teleskopa, početkom 17. stoljeća. Raznim promatranjima i analizama ponašanja Sunca došlo se do broja oko 1700, što je aproksimirana vrijednost jer se nikako ne može sa sigurnošću reći što se događa na cijelom Suncu. Iako je poznato ponašanje pjega tijekom 11-godišnjeg ciklusa, postoje promjene u aktivnostima pjega tijekom dužih vremenskih perioda. Najpoznatija promjena dogodila se sredinom 17. stoljeća, a to je bio Maunderov minimum[12], kada pjega gotovo uopće nije bilo, a zadnji zabilježeni događaj

[12] Maunderov minimum – period od 1645. do 1715. tijekom kojega je broj Sunčevih pjega bio jako nizak

bio je Daltonov minimum[13] početkom 19. stoljeća kao što je vidljivo na Slici 5. Iako se definiranje tih brojeva čini proizvoljno, ono je povezano s raznim drugim mjerenjima kao što su ukupni magnetski tok na površini, a pouzdano utvrđivanje broja pjega važno je zbog utvrđivanja Sunčevog ponašanja u određenim periodima [3,13].



Slika 5. Brojevi Sunčevih pjega u razdoblju od 400 godina [13]

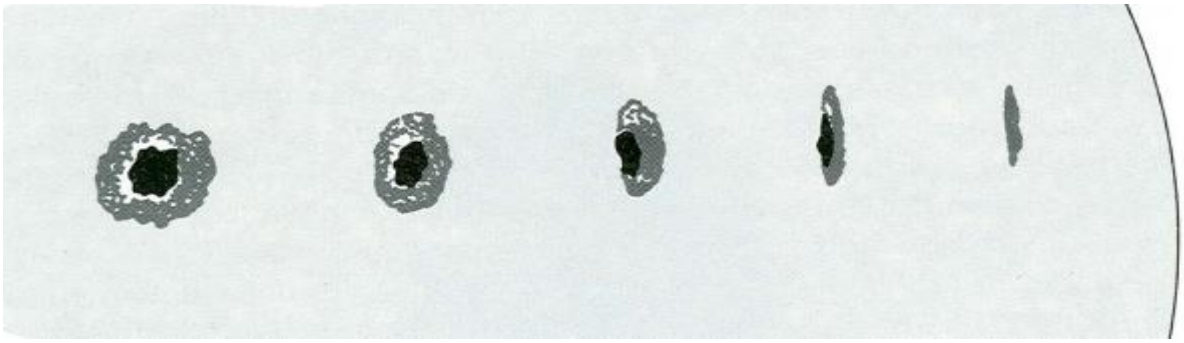
4.1.3 Wilsonov i Evershedov efekt

Sunčeve pjege koje se nalaze u neposrednoj blizini Sunčeva ruba, u smislu vidljivog dijela Sunca, imaju svojstvo da im područje polusjene postane gotovo nevidljivo kada tijekom Sunčevog ciklusa pjega mijenja položaj, kao što je prikazano na Slici 6., a to svojstvo se naziva Wilsonov efekt.

Pojava kod koje se polusjena vidi u tamnijim i svjetlijim nijansama naziva se Evershedov efekt. Efekt je otkriven iz promatranja spektralnih linija koje su počele pokazivati Dopplerov pomak. Točnije, kada se pjega nalazila na rubu vidljivog dijela Sunca, opažao se crveni pomak[14], a kada se nalazi bilo gdje drugdje na površini opažao se plavi pomak[15]. Ta se pojava objašnjava izbacivanjem materijala iz unutrašnjosti polusjene u vanjski dio, a brzina izbacivanja je oko 1-2

[13] Daltonov minimum – period od 1790. do 1830. godine, kao i Munderov minimum obilježava period s niskim brojem sunčevih pjega
[14] Crveni pomak-porast valne duljine elektromagnetskog zračenja uzrokovan udaljavanjem izvora zračenja od promatrača
[15] Plavi pomak- skraćivanje valne duljine elektromagnetskog zračenja uzrokovano gibanjem izvora zračenja prema promatraču

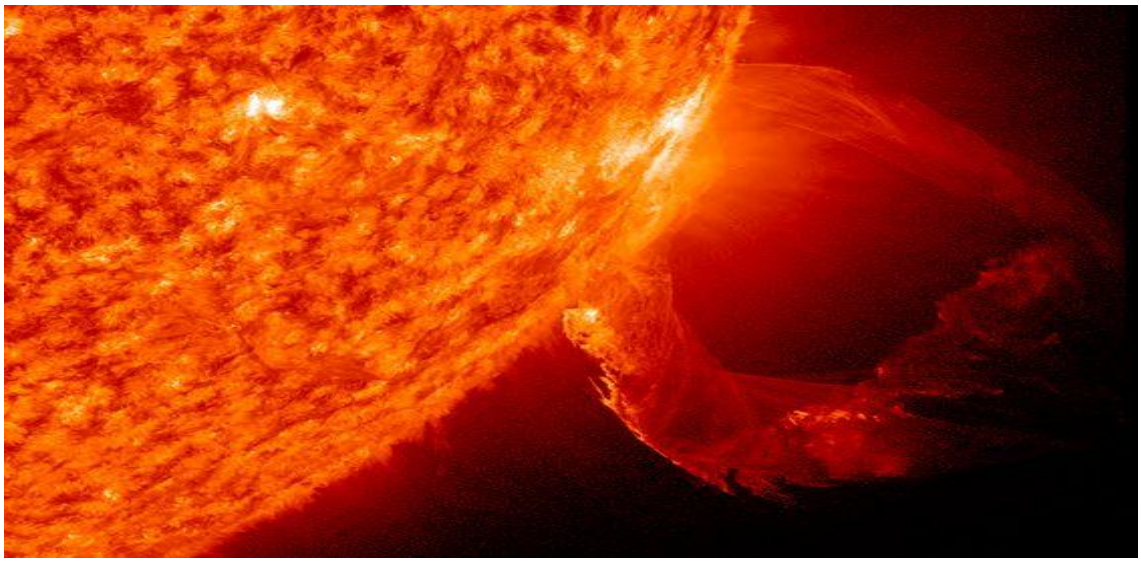
km/s. Razni modeli i simulacije su pokušali objasniti postupak izbacivanja, ali još uvijek nije jasno kako i zašto se to događa [1,2].



Slika 6. Wilsonov efekt [3]

4.2 Sunčeve prominencije i baklje

Prominencija je pojava u Sunčevoj atmosferi nalik oblaku, a vidi se kao svijetla pojava u koroni iznad ruba Sunčeva kruga kao što je prikazano na Slici 7. To je plin oko stotinu puta veće gustoće od gustoće okolne korone, s temperaturom od oko 10 000 K. Prominencije su smještene iznad područja snažnijeg magnetskog polja s kojim su povezane, a prema ponašanju dijele se na mirne i aktivne. Mirne mogu trajati i više mjeseci, dok one veoma aktivne traju u prosjeku jedan dan. Prosječna im je duljina 200 000 kilometara, a visina i širina po 5 000 kilometara. Tipična prominencija širi se tisućama kilometara, a najveća je snimljena sa svemirske letjelice SOHO 2010. godine i procijenjeno je da je bila duga 700 000 kilometara, što je približno jednako polumjeru Sunca.



Slika 7. Prominencija [9]

Sunčeva baklja nastaje u obliku velike eksplozije u Sunčevoj atmosferi, nalik prominenciji, a smatra se da nastaje kada se promjene i zajedno povežu magnetske linije dvaju magnetskih polja koja imaju suprotan smjer. Zbog velike količine oslobođene energije, većina Sunčevih baklji se pojavljuje u aktivnim područjima oko Sunčevih pjega, gdje iznenada dobivaju veliku snagu zbog oslobađanja magnetske energije iz korone.

4.3 Sunčev vjetar

Sunčev vjetar je plazma vrlo male gustoće koju neprestano emitira Sunce, odnosno Sunčeva korona u svim smjerovima. Zanimljivo je što vjetar uspijeva napustiti Sunce unatoč snažnom gravitacijskom privlačenju, a razlog tome je vrlo velika brzina izbacivanja uslijed vrlo visoke temperature u koroni.

Gustoća i brzina vjetra uvelike ovise o Sunčevoj aktivnosti pa što je Sunce aktivnije to je Sunčev vjetar brži i rjeđi te obratno. Također, razlikujemo spori i brzi Sunčev vjetar. Spori Sunčev vjetar ima brzinu od oko 400 km/s i temperaturu od oko $1{,}4–1{,}6 \cdot 10^6$ K, dok s druge strane, brzi Sunčev vjetar ima brzinu od oko 750 km/s te nižu temperaturu od oko $8 \cdot 10^5$ K. Bitna karakteristika Sunčevog vjetra je da stvara heliosferu, odnosno ogroman prostor nakupljenih tvari, koja okružuje cijeli Sunčev sustav [9].

5. SUNČEV DINAMO MEHANIZAM

Poznato je da magnetsko polje mijenja svoj polaritet u periodima od 11 godina. Promjena polariteta tijekom ciklusa ukazuje na to da postoji mehanizam koji je odgovoran za brzu promjenu i ubrzani nestanak magnetskog polja. Iako bi se ovaj proces mogao opisati kao snažno pojačavanje magnetske aktivnosti zbog snažnih strujanja u konvekcijskoj zoni, pravo objašnjenje je ipak puno kompliciranije i obuhvaća definiranje mehanizama koji su odgovorni za razvoj snažnog i eksplozivnog polja iz slabog polja, odnosno treba objasniti kako i zašto dolazi do povećanja aktivnosti. Razne pretpostavke i modeli pokušali su objasniti ovu pojavu, međutim još uvijek nije razvijena pouzdana teorija koja bi to uspjela.

5.1 Pretpostavke o mehanizmu

U okvirima magnetohidrodinamičkog opisa (MHD)[16], problem dinamo mehanizma se može opisati kao rješenje MHD jednadžbe koja sadrži Amperov, Faradayev i Ohmov zakon i magnetsku silu koja ne iščezava s vremenom. Tada su promjene magnetskog polja $\vec{B}$ pod utjecajem ubrzanja polja $\vec{u}$ i magnetske difuzivnosti[17] η, opisane jednadžbom:

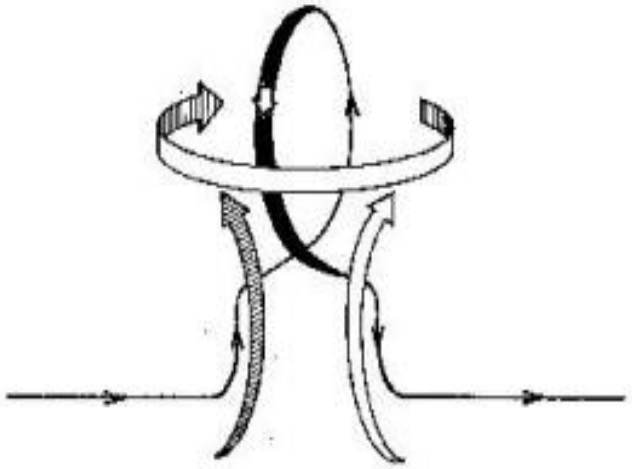
$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times \left(\vec{u} \times \vec{B}\right) - \vec{\nabla} \times \left(\eta \vec{\nabla} \times \vec{B}\right) \tag{2}$$

Ovom jednadžbom dan je općeniti opis nastanka i daljnjeg ponašanja magnetskog polja. Jednadžba se sastoji od samo 3 člana te je ova formulacija daleko od prave istine.

Cowlingov anti-dinamo teorem tvrdi da rotacijsku simetriju magnetskog polja ne može održati samo dinamo mehanizam, a u prilog tome ide činjenica da je struktura magnetskog polja očito nesimetrična.

Elsasserov teorem je slične anti-dinamo prirode, a tvrdi da sama rotacija ne može dovesti do stvaranja sfernog oblika. Vjerojatno najpouzdaniji model koji je do sada razvijen objašnjava dinamo mehanizam preko Parkerove petlje koja je prikazana na Slici 8., a ona opisuje kako konvekcijski rast i pad polja u rotacijskom sustavu uzrokuje kruženje polja, koje se ujedno i uvija uslijed djelovanja Coriolisove sile.

[16] Magnetohidrodinamika(MHD) - grana fizike koja proučava međudjelovanje magnetskih polja i vodljivih fluida
[17] Difuzivnost - spontano miješanje dviju ili više tvari kroz njihovu dodirnu površinu



Slika 8. Parkerova petlja koja opisuje kako dolazi do uvijanja uzdižućeg polja uslijed djelovanja Coriolisove sile [6]

Prvi pokušaj simulacije mehanizma bio je oko 1980. godine kada je uspješno rekonstruiran aktivni dinamo mehanizam, ali nedostatak mu je ležao u magnetskom polju koje se neprestano širilo, što nije bilo u skladu s dosadašnjim saznanjima. Nešto kasniji pokušaji uspjeli su objasniti naizmjenične promjene polariteta magnetskog polja, ali nisu uspjeli simulirati snažna polja odgovorna za 11-godišnji ciklus.

Na temelju navedenih modela i opisa dolazi se do zaključka da dinamo mehanizam ima kompleksnu i nesimetričnu strukturu u razvoju magnetskog polja i oblikovanju sferičnog oblika, a zbog nemogućnosti izravnog promatranja jasno je da će se teško ikada razviti model koji pouzdano opisuje takav mehanizam koji stvara magnetsko polje [4,5,6].

5.2 Očuvanje magnetske helikoidne strukture

Teorijski važno svojstvo u proučavanju dinamo mehanizma je magnetska helikoidnost, koja definira opseg oko kojeg se magnetsko polje može uvijati oko sebe kao što je prikazano na Slici 9., a definira se kao:

$$H = \int_V \vec{A} \cdot \vec{B}\, dV \quad , \tag{3}$$

pri čemu H karakterizira helikoidnost ukupnog magnetskog polja, $\vec{B}$ jakost magnetskog polja ($\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$), a $\vec{A}$ predstavlja vektorski potencijal. Helikoidnost je zapravo mjerilo nepromjenjivosti u ovakvim uvjetima pa je jednadžba gibanja za H dana s:

$$\frac{dH}{dt} = -2\eta \int_V \vec{j} \cdot \vec{B}\, dV \quad , \tag{4}$$

gdje je η magnetski otpor (u smislu viskoznosti), a j gustoća struje. Vidljivo je da je magnetska helikoidnost potpuno očuvana u slučaju kada je η=0. Također se može primijetiti da se ubrzanje polja ne pojavljuje egzaktno u jednadžbi gibanja, a to znači da se mreža magnetske helikoidnosti mijenja samo u periodu dužeg vremenskog intervala. Takvo ponašanje predstavlja ograničenje u opisivanju Sunčeva dinamo mehanizma zato što je 11-godišnji ciklus puno kraći od potrebnog intervala. Općenito za mehanizme koji se baziraju na helikoidnosti ili smicanju vrijedi da stvaranje snažnog magnetskog polja automatski uzrokuje nastanak velike magnetske helikoidnosti. Kako god, Sunce mora stvoriti magnetsku helikoidnost tijekom 11-godišnjeg ciklusa, a preostaje odgovoriti na pitanje radi li to u obliku slabog otpornog rasipanja ili odbacivanjem mase u vanjski svemir (vjerojatno izbacivanjem mase korone) [7,10].



Slika 9. Primjeri helikoidnosti magnetskog polja

(lijevo-neuvrnuto, u sredini-uvrnuto, desno-dva neuvrnuta, ali se križaju) [8]

6. MAGNETSKO POLJE U POJEDINIM ZONAMA

6.1 Konvekcijska zona

Konvekcijska zona se već spominjala u raznim kontekstima i u ovom će poglavlju biti detaljnije opisana zbivanja u tom sloju Sunca. U prostorima konvekcijske zone plazma nije dovoljno topla i gusta za prijenos energije zračenjem, zbog čega se stvaraju „toplinski stupovi“ koji prenose vruću plazmu od zone zračenja sve do fotosfere. Iz toga se može zaključiti da ti toplinski stupovi predstavljaju jednu vrstu prečaca, a takvo turbulentno kretanje plazme uzrokuje stvaranje magnetskog polja na površini tih stupova. Toplinski stupovi su samo teorijska pretpostavka koja aproksimira proces koji omogućava takav prijenos plazme, zbog čega je neophodno što više proučavati Sunčev mehanizam u formiranju magnetske strukture konvekcijske zone kako bi se mogle povezati uočene pojave na Sunčevoj površini i dinamo mehanizam koji je odgovoran za prvotnu proizvodnju magnetskog toka.

Nakon nastanka magnetskog polja dolazi do pojave koja se teorijski naziva „problem skladištenja“. Problem opisuje različitost gibanja raznih fluida prema dnu i površini konvekcijske zone. Ta gibanja su važna jer opisuju kako se zapravo magnetsko polje izbacuje na površinu, odnosno što se događa prije samog izbacivanja. Pretpostavka je da se magnetsko polje „skladišti“ u području iznad konvekcijske zone gdje tada mora imati određeni pokretački mehanizam kojim se izbacuje na Sunčevu površinu. Jedna mogućnost je zračenje topline koje dovodi do polaganog kretanja polja prema nižem dijelu konvekcijske zone što bi značilo da hvata zalet, nakon čega se eksplozivno izbacuje na površinu uslijed djelovanja konvekcijskog i magnetskog tlaka.

6.2 Kromosfera i korona

Kromosfera je sloj koji se prostire iznad najnižeg sloja (fotosfere), a sam sloj je debljine oko 2 000 km, dok korona čini vanjski sloj Sunčeve atmosfere izrazito visoke temperature. Podaci o magnetskom u tim područjima su uglavnom vrlo nejasni i do njih se ne može doći direktnim proučavanjem već se promatraju samo posljedice djelovanja magnetskog polja. Emisijske linije korone koje se žele promatrati su jako proširene zbog vruće i rijetke plazme gdje temperatura prelazi 10^6 K pa je Zeemanov efekt[18] teško detektirati i eventualno dobiti nekakve

[18] Zeemanov efekt – dijeljenje spektralnih linija svjetlosti pod utjecajem magnetskog polja

podatke o magnetskom polju. Još jedan problem predstavlja promjenjivost korone, zbog čega je sloj u kojem su magnetska polja aktivna cijelo vrijeme dobro prikriven. S druge strane, uvjeti su nešto povoljniji na višim dijelovima kromosfere jer se mogu promatrati prominencije koje prolaze kroz kromosferu, čija je plazma puno hladnija i gušća [8].

6.2.1 „Magnetska kupola i tepih“

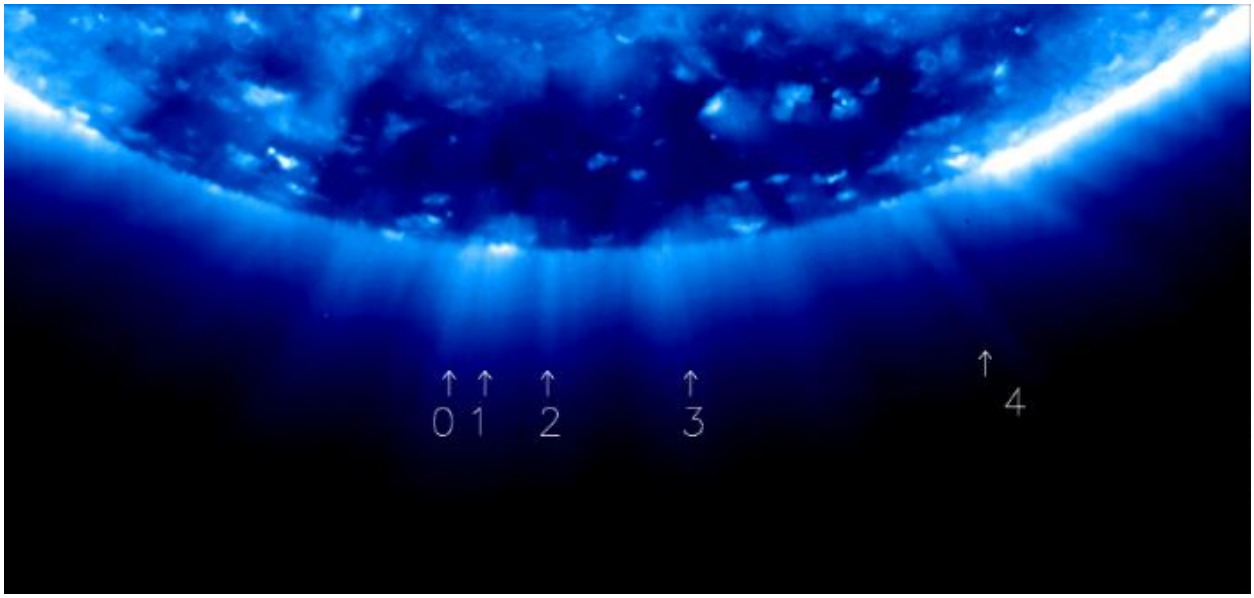
Nakon izbijanja magnetskog polja na površinu Sunca, gornji dio fotosfere i kromosfera formiraju dio koji ima ulogu hlađenja, a taj dio se nalazi na visini od 1 000 km. Gustoća plazme i tlak doživljavaju velike promjene na visini od već nekoliko stotina kilometara, a to ima za posljedicu širenje horizontalnih komponenata magnetskih polja kako bi se uravnotežio tlak sa tlakom okolne plazme te kako bi se polja mogla povećavati uz što manje smetnji. Također, postoje i samostalna polja koja naravno traže polje suprotnog pola te se ta polja međusobno privlače i u konačnici spajaju, a kao rezultat spajanja formiraju se veliki magnetski lukovi. Promatranja su pokazala da takvi lukovi mogu doseći visinu do 1 000 km iznad fotosfere.

Teorijske pretpostavke predviđaju da postoje i vrlo brza napredovanja magnetskog polja u donjem dijelu kromosfere, što vodi do formiranja skoro horizontalne kupole na visini od otprilike 800 km, a to se može dogoditi ako je na takvim visinama kromosfera veoma nehomogene temperature. Prethodno formirani magnetski lukovi dosežu ogromne visine iznad kupole i čine tzv. magnetske tepihe, koji su strukturirani tako da se hladni materijal iz kromosfere i vruća plazma iz korone podijele u susjedne magnetske lukove koji su međusobno udaljeni otprilike 1 000 km. Zvuči kao ponavljanje, ali točne udaljenosti između plazme u donjoj kromosferi, kupole i tepiha nisu precizno određene, a i sam model nije razrađen sa velikom sigurnošću.

6.2.2 Karakteristike korone

Sunčeva korona je najbolji pokazatelj koliko važnu ulogu ima magnetsko polje u formiranju Sunčeve atmosfere. Oko 20-30% Sunčeve površine je prekriveno rupama korone, a to su područja koja su magnetski povezana s vanjskom heliosferom. Na takvim područjima nema zadržavanje plazme jer se ona odnosi brzim Sunčevim vjetrom. Magnetsko polje u rupama korone ne samo da kontrolira mrežu magnetskog toka koja može probiti kromosferu, nego utječe

i na visinu, duljinu i temperaturu rezultirajućeg zatvorenog polja. Oblik i rasprostranjenost takvih područja drastično se mijenja tijekom 11-godišnjeg ciklusa pa su tako tijekom minimalne aktivnosti rupe vrlo velikog opsega s obrnutim magnetskim polovima, no tijekom visokih aktivnosti prostiru se preko velikih dijelova površine te se međusobno povezuju u veliki pojas koji ponekad može biti dulji od samog polumjera Sunca. Tijekom Sunčeva minimuma magnetski tok može napustiti rupu korone, a to se na EUV slikama očituje kao oblaci (kao što je prikazano na Slici 10.). Oblaci nastaju iz novih manjih magnetskih područja koja se ponovno spajaju sa pozadinskim poljem rupe korone, a te rekonekcije osiguravaju toplinu potrebnu za održavanje gustoće unutar oblaka [1,14].



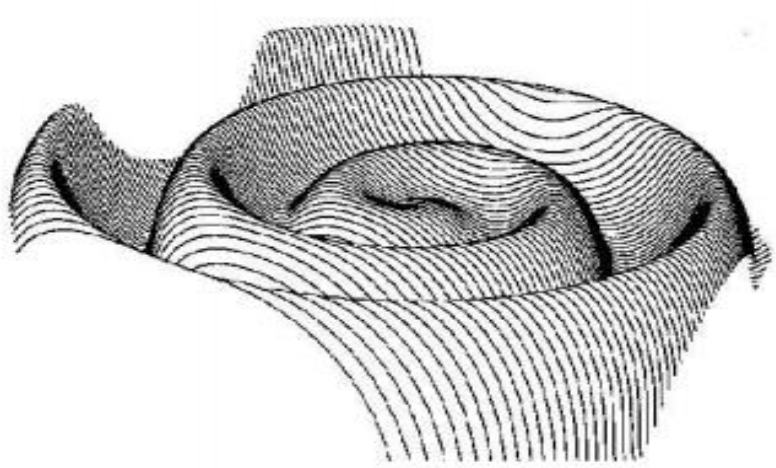
Slika 10. Oblaci iznad rupe korone na južnoj hemisferi Sunca [9]

6.3 Heliosfera

Kao što je već spomenuto, heliosfera čini ogroman prostor koji okružuje cijeli Sunčev sustav, a to je zapravo jedino područje u kojem su se vršila razna direktna promatranja. Nažalost, ovdje magnetsko polje više nema bitnu ulogu i ne može se izravno vidjeti njegova stvarna važnost.

Kroz rupe korone probija se visoko magnetsko polje koje doseže ogromne veličine. Na takvim visinama, Sunčev vjetar naglo ubrzava i usmjerava magnetska polja na gibanje u zajedničkom smjeru. Na udaljenosti od otprilike 3 polumjera Sunca, unutarnji i vanjski dijelovi

magnetskog polja raspoređeni su u dva područja koja su međusobno odvojena heliosfernom strujnom plohom[19] koja, kao što se vidi na Slici 11., nije ravna već je valovite prirode zbog izmjene polariteta polja. Postoji velika usklađenost između plohe i Sunčevog vjetra pa tako Sunčev vjetar koji se nalazi daleko od polja često ubrzava i može dostići brzinu od 800 km/s (brzi vjetar), dok vjetar u blizini polja zbog guste plazme usporava na oko 400-600 km/s (spori vjetar). Spori vjetar koji se zadržava u polju struje naposljetku uzrokuje nestabilnost polja, što je još jedan čimbenik koji izaziva valnu prirodu plohe. Prema slici 11., mora postojati još nešto što uzrokuje rotacijsku strukturu. Pretpostavlja se da je to brzi Sunčev vjetar koji prema teoriji probija površinu plohe te stvara područja nižeg i višeg tlaka, što na kraju rezultira rotacijom. Konkretni modeli za to područje nisu do kraja razrađeni te uopće nije poznato kakve su dimenzije plohe i naravno, postoji li poveznica sa Sunčevim magnetskim poljem [9,11,12].



Slika 11. Kombinacija rotacije i valne prirode heliosferne strujne plohe [16]

[19] Heliosferna strujna ploha – ploha u Sunčevom sustavu gdje se mijenja polaritet Sunčevog magnetskog polja

7. ZAKLJUČAK

Magnetsko polje ima važnu ulogu u svim područjima fizike Sunca i zato nije čudno da se toliko puta spominje i primjenjuje. U ovom radu razrađeni su temeljni pojmovi o Suncu, posebice oni koji sadrže poveznicu sa magnetskim poljem Sunca, ali spomenute su i druge zanimljive i korisne činjenice vezane uz strukturu i ponašanje Sunca.

Pojedine Sunčeve pojave koje se odvijaju na površini vidljive su čak i na samoj Zemlji pa nije čudno da privlači toliko pažnje općenito i naravno u području znanosti. Nažalost, zbog opsega teme, postoji još mnogo teorijskih objašnjenja i matematičkih razrada kojih se nismo dotakli. Razna istraživanja, mjerenja, pretpostavke i modeliranja vrše se svakodnevno i samo je pitanje vremena kada će se otkriti nove važne činjenice o Suncu, ali naravno postoji još ogroman broj pojava koje se možda nikada neće moći istražiti i objasniti.

Iako se čini da magnetsko polje Sunca nema previše poveznica sa Zemljom, postoje razne opasnosti na koje itekako treba pripaziti. Količina ultraljubičastog zračenja se mijenja tijekom Sunčevog ciklusa, a kada je Sunce u periodu minimalne aktivnosti, na Zemlju dolazi 4 puta više zračenja, što može biti veoma opasno. Vjerojatno najopasnija pojava su geomagnetske oluje koje se sastoje od Sunčevog vjetra koje napadaju Zemljino magnetsko polje. Najugroženija su područja koja su bliže polovima Zemlje pa je tako u Kanadi 1989. godine većina države jedno vrijeme bila bez struje uslijed djelovanja geomagnetske oluje, a možemo samo zamisliti što bi bilo da u današnje vrijeme ostanemo nekoliko dana bez struje. Nasreću, u današnje vrijeme kontinuirano se prate Sunčeve aktivnosti pa bi se tako unaprijed mogla izbjeći moguća opasnost.

Sunčevo magnetsko polje je zaista nevjerojatno i fascinira činjenica da je to tako jedan složen, ali ujedno veoma uređen sustav koji ima glavnu ulogu u puno stvari pa tako utječe i na život na Zemlji, zbog čega toliko cijenimo Sunce i želimo ga što više razumjeti, a važnost Sunca općenito možda je i na najbolji mogući način opisao američki pjevač Jim Morrison:

„Ako se jednom probudim i ne vidim Sunce, ili sam mrtav ili sam Sunce...“

8. LITERATURA

[1] Schrijver, C.J. and Zwaan, C., Solar and Stellar Magnetic Activity, Cambridge University press, 2000.

[2] Harvey, K.L. and Zwaan, C., Properties and emergence patterns of bipolar active regions, Solar Physics, 1993.

[3] Bray, R.J and Loughhead, R.E., Sunspots, Chapman and Hall LTD, 1964.

[4] Choudhuri, A.R., The Physics of Fluids and Plasmas-An Introduction for Astrophysicists, Chambridge, 1998.

[5] Elsasser, W.M., Induction Effects in Terrestrial Magnetism Part I. Theory, Physics Review, 69:106–116, 1946.

[6] Parker, E. N., The Generation of Magnetic Fields in Astrophysical Bodies. I. The Dynamo Equations, Astrophys., 162:665–673, 1970.

[7] Childress, S. and Gilbert, A.D., Stretch, Twist, Fold: The Fast Dynamo, Springer Berlin, Heidelberg, New York, 1995.

[8] Wissink, J.G., Hughes, D. W., Matthews, P. C. and Proctor, M. R. E., The three-dimensional breakup of a magnetic layer, 318:501–510, 2000.

[9] Phillips, J. L., Bame, S. J., Barnes, A., Barraclough, B. L., Feldman, W. C., Goldstein, B. E., Gosling, J. T., Hoogeveen, G. W., McComas, D. J., Neugebauer, M., and Suess, S. T., Ulysses solar wind plasma observations from pole to pole. Geophys. Res. Lett., 22:3301–3304, 1995.

[10] Berdyugina, S.V., Starspots: A Key to the Stellar Dynamo, LivingReviews, 2005.

[11] Čop, R., Mihajlović, S. i Cander, Lj.R., Magnetic Storms and their Influence on navigation, Magnetic Storms and their Influence... Pomorstvo, str. 89-99, 2008.

[12] Tobias, S., The solar tachocline: angular momentum transport, mean flows and instabilities, University of Leeds

[13] Paper demonstrates solar activity was at a grand maximum in the late 20th century
URL: https://wattsupwiththat.com/2012/09/13/paper-demonstrates-solar-activity-was-at-a-grand-maxima-in-the-late-20th-century/ (13.6.2016.)

[14] Sunce
URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Sunce#Magnetsko_polje (10.6.2016.)

[15] The Sun's Magnetic Field Changes
URL: http://solar.physics.montana.edu/ypop/Spotlight/Magnetic/cycle.html (13.6.2016.)

[16] NASA: The Sun's Magnetic Field is about to Flip
URL: http://www.nasa.gov/content/goddard/the-suns-magnetic-field-is-about-to-flip/#.VzXpa5F97IX (12.6.2016.)

9. ŽIVOTOPIS

Stjepan Bošković rođen je 4.8.1994. u Požegi. Završio je Osnovnu školu Dobriše Cesarića u Požegi te potom prirodoslovno-matematičku gimnaziju također u Požegi. Trenutno je student Odjela za fiziku na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.