

# Određivanje položaja struktura u fotosferi Sunca

---

**Podnar, Korina**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka / Sveučilište u Rijeci**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:194:034209>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Physics - PHYRI Repository](#)





SVEUČILIŠTE U RIJECI

FAKULTET ZA FIZIKU

Preddiplomski studij Fizika

Korina Podnar

**ODREĐIVANJE POLOŽAJA STRUKTURA U  
FOTOSFERI SUNCA**

Završna radnja

Mentorica: doc. dr. sc. Ivana Poljančić Beljan

Rijeka, 2022.

## SAŽETAK

Sunčeve su pjege prozor u kompliciranu magnetsku unutrašnjost Sunca i fasciniraju promatrače Sunca više od četiri stoljeća, čineći najduži, kontinuirani vremenski niz promatranja svih prirodnih pojava u svemiru. Uvod ovog rada opisuje strukturu Sunca kako bi pojave i procesi na toj zvijezdi bili pobliže objašnjeni. Dio Sunca koji čini žarište rada jest fotosfera i njene strukture, još točnije Sunčeve pjege, čija je definicija dana zajedno s uvidom u njihovo otkriće i nastanak. U glavnom dijelu opisan je način određivanja položaja fotosferskih struktura pomoću poznavanja heliografskih koordinata, elemenata za fizičko opažanje Sunca te njihovo preračunavanje. Nadalje, opisane su metode opažanja pjega te za kraj program Sungrabber pomoću kojeg se mogu određivati položaji na slikama Sunčeva diska.

**Ključne riječi:** Sunce, fotosfera, Sunčeve pjege, koordinate, heliografska duljina, heliografska širina

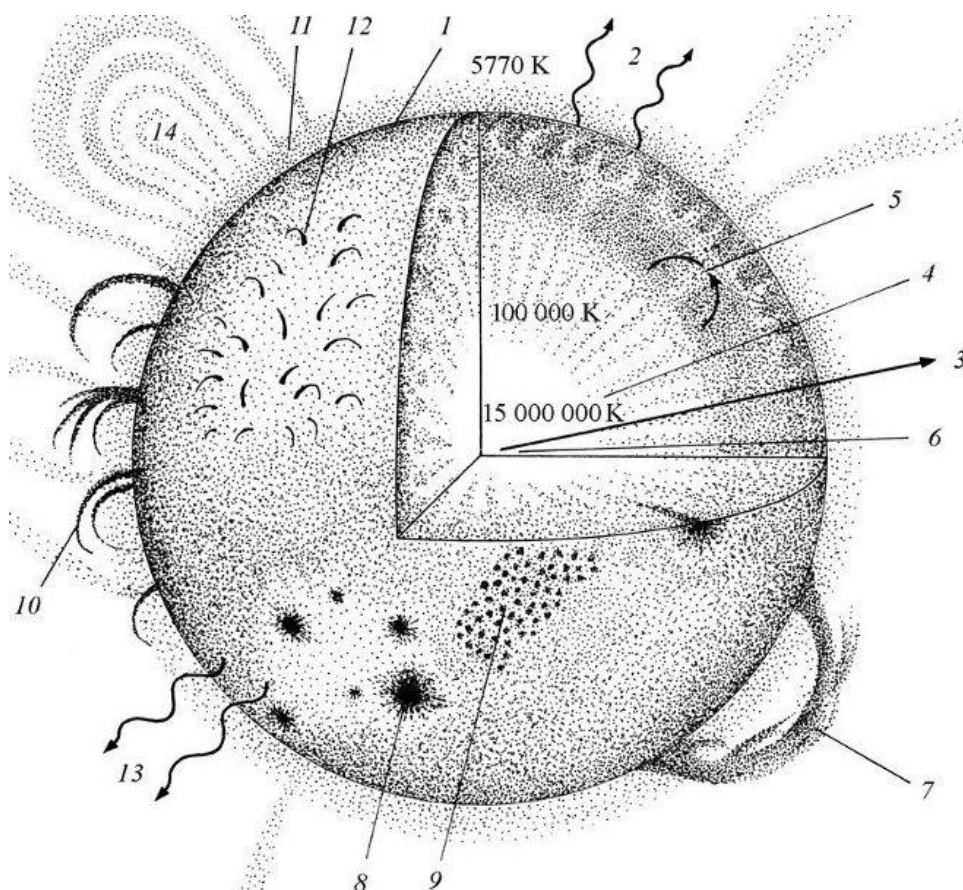
## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. FOTOSFERA I FOTOSFERSKE STRUKTURE.....	3
2.1. OTKRIĆE I NASTANAK SUNČEVIH PJEGA.....	4
3. METODE OPAŽANJA STRUKTURA U FOTOSFERI.....	9
3.1. ELEMENTI ZA FIZIČKO PROMATRANJE SUNCA.....	12
4. ODREĐIVANJE PLOŽAJA FOTOSFERSKIH STRUKTURA.....	14
4.1. PRORAČUNAVANJE ELEMENATA ZA FIZIČKO PROMATRANJE SUNCA.....	21
5. SUNGRABBER.....	23
6. ZAKLJUČAK.....	26
7. LITERATURA.....	27

## 1. UVOD

Zbog blizine Sunca, ono je zvijezda za koju je prikupljeno najviše eksperimentalnih podataka u usporedbi sa svim drugim zvijezdama. Sunce je klasificirano kao G2 V zvijezda, pri čemu G2 označava drugu po redu najtopliju zvijezdu žute G klase, s površinskom temperaturom oko 5800 K, dok V predstavlja zvijezdu glavnog niza, tipičnu za ovu temperaturnu klasu. Zvijezde poput Sunca zbog svoje veličine i boje nazivaju se još i žuti patuljci. Sastav površine Sunca; sjaj, polumjer, efektivnu temperaturu, magnetska polja i brzine rotacije, moguće je izmjeriti s visokom preciznošću sa zemaljskih i svemirskih zvezdarnica [1][2][3].

U različitim dijelovima Sunca odvijaju se različiti procesi, zbog čega se ono dijeli na jezgra, radijativnu zonu, konvektivnu zonu, fotosferu, kromosferu i koronu [3]. Slika 1.1. prikazuje strukturu Sunca zajedno s pojavama koje se na nj odvijaju.



Slika 1.1. 1 fotosfera, 2 vidljivo, infracrveno, ultraljubičasto i rendgensko zračenje, 3 neutrini, 4 radijativna zona, 5 konvektivna zona, 6 jezgra, termonuklearne reakcije, 7 prominencije, 8 pjege, 9 granule, 10 baklje, 11 kromosfera, 12 bodlje, 13 energetske čestice, 14 korona [4].

Sunčeva unutrašnjost podijeljena je u četiri regije s obzirom na različite procese koji se tamo odvijaju: jezgra, zona zračenja, međusloj i konvektivna zona. Jezgra je područje u kojem dolazi do nuklearne fuzije, a temperatura dostiže čak 15 milijuna °C.

Zona zračenja proteže se prema van od vanjskog ruba jezgre do površinskog sloja u podnožju konvektivne zone, a karakterizira ju način prijenosa energije – zračenje. Energija stvorena u jezgri prenosi se svjetlošću, koja se odbija od čestice do čestice kroz zonu zračenja. Iako fotoni putuju brzinom svjetlosti, toliko se puta odbijaju kroz ovaj gusti materijal da je pojedinačnom fotonu potrebno oko milijun godina da konačno dosegne površinski sloj Sunca. Tanki međusloj između radijacijske zone i konvektivne zone mjesto je gdje se smatra da nastaje Sunčevo magnetsko polje. Konvektivna zona krajnji je vanjski sloj Sunčeve unutrašnjosti, koji se proteže od dubine od oko 200 000 km sve do vidljive površine, čija je temperatura oko dva milijuna °C. Konvekcija se događa kada temperaturni gradijent (brzina kojom temperatura pada s porastom udaljenosti od središta Sunca) postane veći od adijabatskog gradijenta (brzine kojom bi temperatura pala da se volumen materijala udalji od središta Sunca bez dodavanja topline). Konvektivna gibanja vidljiva su na površini kao granule i supergranule [16].

Sunčevu troslojnu atmosferu čine fotosfera, kromosfera i korona. Korona je najrjeđi dio Sunčeve atmosfere, vidljiv za vrijeme potpune pomrčine Sunca, iz koje je Sunčeva tvar izbačena u međuplanetarni prostor u vidu Sunčevog vjetera. Najniže područje korone raspršuje Sunčevu svjetlost, dok se solarni vjetar radijalno emitira u svim smjerovima, prosječnom brzinom od  $400 \text{ km s}^{-1}$ . Kromosfera je srednji sloj atmosfere, debljine 2000 km, iz kojeg se podižu bodlje (spikule), mali izbačaji plina koji se dižu do visine od 7000 do 9000 km. U ovom sloju nastaju i prominencije, pojave plina, gustoće mnogo veće od gustoće okolne korone, nalik oblaku koje se protežu prema van od Sunčeve površine. Između kromosfere i korone tanak je prijelazni sloj u kojem se temperatura naglo povisuje od 1 do 10 milijuna K [4].

## 2. FOTOSFERA I FOTOSFERSKE STRUKTURE

Fotosfera je najniži sloj Sunčeve atmosfere, debljine nekoliko stotina kilometara, iz kojeg se Sunčevo zračenje širi u svemir [4]. To je područje iz kojeg potječu promatrani optički fotoni, te nastaju apsorpcijske spektralne linije, odnosno Fraunhoferove linije, koje nastaju zbog apsorpiranja pojedinih valnih duljina svjetlosti [1]. Budući da je Sunce udaljeno 150 milijuna kilometara od Zemlje, rub fotosfere doima se oštro golom oku, ali zapravo Sunce nema površinu, jer je prevruće da bi materija postojala u bilo kojem drugom stanju osim plazme. Temperature se u ovom sloju kreću od 4400 K na vrhu fotosfere do 10 000 K na dnu. Gustoća ioniziranog plina iznosi oko 1/1000 gustoće zraka na Zemljinoj površini, ali je mnogo neprozirniji zbog snažne apsorpcije svjetlosti uzrokovane povećanom koncentracijom vodikovih iona [6].

Brojne fotosferske strukture mogu se promatrati jednostavnim teleskopom. Neke od njih su Sunčeve pjege (makule), baklje (fakule), granule i supergranule. Protok materijala u fotosferi može se mjeriti pomoću Dopplerovog efekta [7].

Sunčeve pjege su tamnija i do 2500 K hladnija područja od ostale površine Sunca. Nastaju, razvijaju se i nestaju pod utjecajem snažnih magnetskih polja. Pojavljuju se između  $7^\circ$  i  $45^\circ$  sjevernih i južnih heliografskih širina, dok pojedina pjega prosječno traje kraće od desetak dana. Sastoje se od tamnijeg središnjeg područja (sjene ili umbre) te polusjene, koja okružuje sjenu radijalno ispresijecanim svijetlim vlaknima. Sunčeve pjege pojavljuju se u ciklusima koji najčešće traju između 9,5 i 11 godina, u skupinama u kojima se ističu dvije pjege: vodilja (u smjeru Sunčeve rotacije) i pratilja. Navedene pjege suprotne su magnetske polarnosti. Za vrijeme povećanog broja Sunčevih pjega Sunčevo je zračenje veće jer su okolna područja Sunčevih pjega sjajnija i toplija [5]. Jedanaestogodišnji ciklus Sunčeve aktivnosti opisan većim (u maksimumu aktivnosti) i manjim (u minimumu aktivnosti) brojem grupa Sunčevih pjega prisutnih na Sunčevoj površini, uzrokuje promijenjivo svemirsko vrijeme u maksimumu aktivnosti, okarakterizirano solarnim bakljama, koronalnim izbačajima mase, geomagnetskim olujama, pojačanim zračenjem, kao i tokom čestica visokih energija. Intenzivni tok ovih čestica ugrožava satelite, globalne komunikacijske sustave, zračni promet preko polarnih ruta i električne mreže [9]. Sunce se okrene oko svoje osi jednom u otprilike 27 dana, što je prvi put otkriveno promatranjem gibanja Sunčevih pjega u fotosferi [7].

## 2.1. Otkriće i nastanak Sunčevih pjega

Astronomi u drevnoj Kini uočili su Sunčeve pjege prije nekoliko tisuća godina. U knjizi „I-Ching”, koja datira iz 12. stoljeća prije Krista, spominje se „Ri Zhong Jian Mei”, što u prijevodu znači “zvijezda je viđena unutar Sunca” [10]. Prije izuma teleskopa, daleko najdosljedniji promatrači Sunčevih pjega bili su kineski i korejski astronomi koji su zabilježili više od 150 odvojenih viđenja. Srednjovjekovni arapski astronomi često su zamjećivali Sunčeve pjege, a prije kraja 16. stoljeća zabilježeno je samo četiri ili pet europskih viđenja Sunčevih pjega koja su zabilježili kroničari, a ne astronomi [11]. Najraniji poznati crtež Sunčevih pjega pojavljuje se u kronici Johna Worceстера koja prethodi izumu teleskopa gotovo 500 godina te pokriva povijesno razdoblje od najstarijih vremena do 1140. godine nove ere i sadrži brojne zapise o nebeskim pojavama. Jedan od najzanimljivijih izvještaja je opis dviju sunčevih pjega viđenih 8. prosinca 1128. iz Worceстера u Engleskoj. Opažanje Sunčevih pjega poklopilo se s pojavom polarne svjetlosti pet dana kasnije u Koreji, 13. prosinca 1128. [12].

Neposredno nakon izuma teleskopa, početkom 17. stoljeća, otkriće Sunčevih pjega pripisuje se se Johannesu Fabriciusu (1587. – 1616.), Galileiu Galileiju (1564. – 1642.), Thomasu Harriotu (1560. – 1621.) i Christophu Scheineru (1575. – 1650.) [5].

Nizozemski astronom J. Fabricius prvi je objavio informacije o opažanjima Sunčevih pjega u svom „Prikaz pjega opaženih na Suncu i njihove prividne rotacije sa Suncem”, 1611. godine. Bio je sin astronoma Davida Fabriciusa te je koristio *camera obscura* (lat. tamnu sobu) kao i teleskop u svom proučavanju Sunca [13].

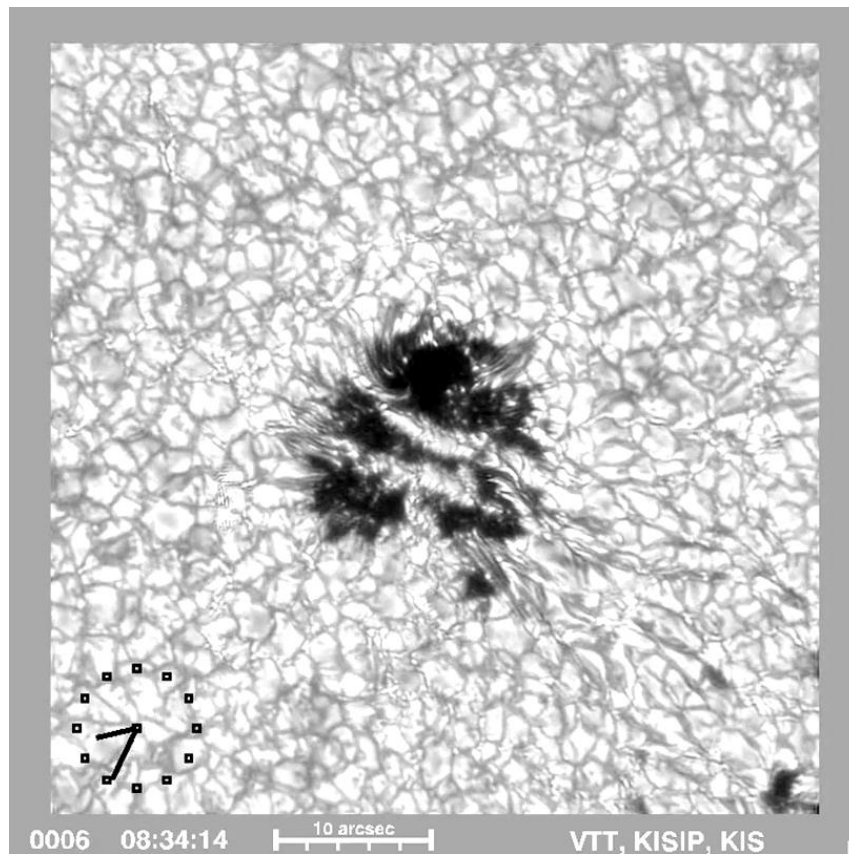
Scheiner je tvrdio da su Sunčeve pjege sateliti Sunca, dok je Galileo tvrdio da su pjege na površini Sunca ili blizu nje, a svoj je argument potkrijepio nizom detaljnih gravura svojih opažanja [14].

T. Harriot upotrijebio je jedan od svojih teleskopa za promatranje Sunčevih pjega neovisno o Galileu. Izvršio je skoro 200 promatranja Sunčevih pjega, koristeći svoja promatranja za izračunavanje brzine kojom se Sunce okreće oko svoje osi [15].

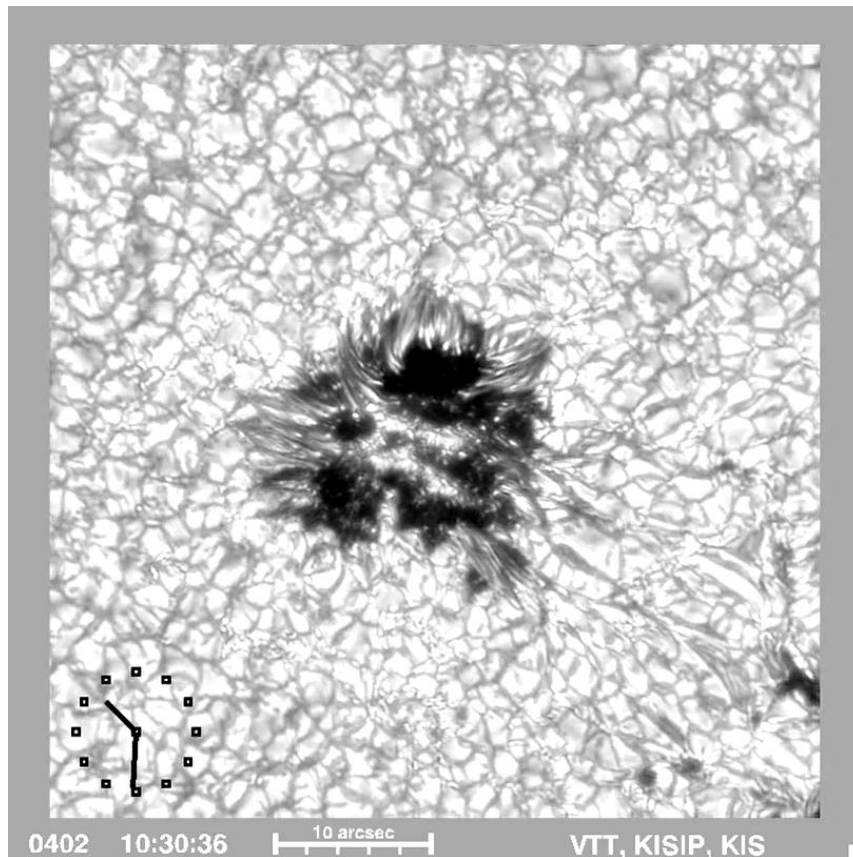
Sunčeve se pjege ne pojavljuju nasumično na Sunčevoj površini, već su rezultat malih koncentracija magnetskog polja, odnosno magnetskih silnica, koje izranjaju na površinu iz dubljih slojeva Sunca. Pretpostavlja se da su te koncentracije magnetskog polja posljedica grupiranja magnetskih silnica u izdužene niti koje zajedno čine veliko magnetsko „uže” (slika 2.4.c). Skupljanjem, magnetske niti tvore pore, koje se zatim spajaju i tvore veće pore ili proto-pjege. Proto-pjega je pora ili umbra koja će se na kraju razviti u Sunčevu pjegu.



Prikupi li proto-pjega dovoljno magnetskog toka, a okolnosti omogućće nagnutost magnetskog polja (paralelno sa Sunčevom površinom), formirat će se penumbra, element koji razlikuje Sunčeve pjege od pora. S obzirom da penumbra obuhvati umbru za oko 5 sati, to je relativno brz proces, zbog čega je promatranje tog fenomena vrlo otežano.



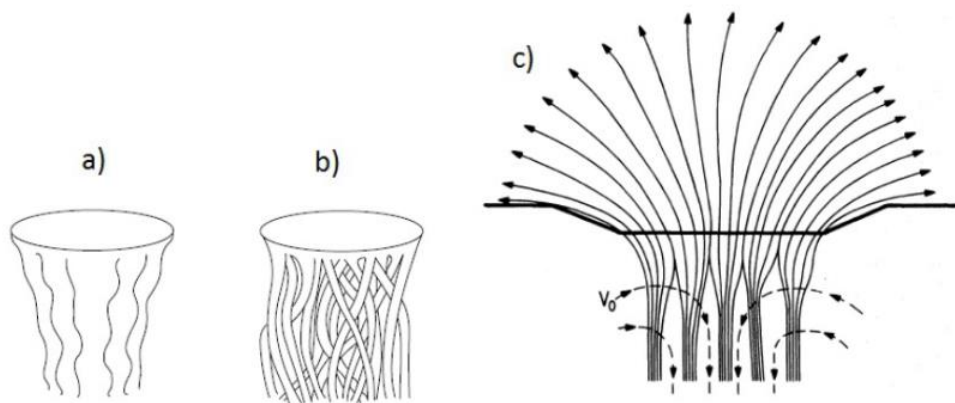
Slika 2.1. Formiranje Sunčeve pjege u aktivnom području [17].



Slika 2.3. Formiranje Sunčeve pjege u aktivnom području [17].

U polusjeni, vodoravna magnetska polja oblikovat će konvektivne stanice dajući im karakterističan filamentarni izgled. Sunčeve pjege mogu postojati danima ili čak tjednima, a kada se raspadnu, prvo izgube svoju polusjenu te ponovno postaju pore (ili „gole“ Sunčeve pjege), a potom pod pritiskom okolne granulacije postaju još manjima dok na kraju ne nestanu kao male magnetske nakupine [17].

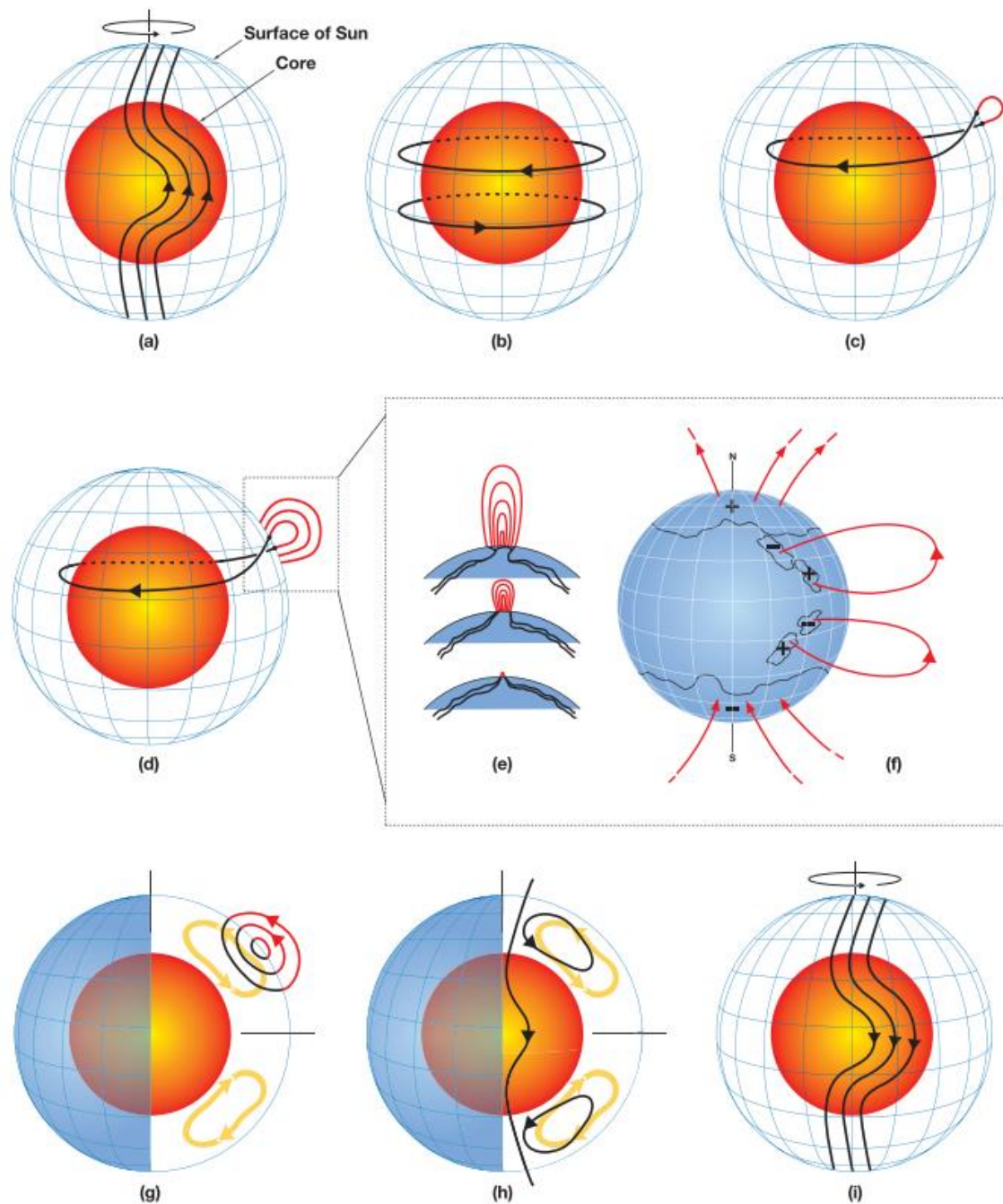
Magnetska aktivnost na Suncu nije ravnomjerno raspoređena po površini Sunca, već je koncentrirana u aktivna područja u kojima Sunčeve pjege imaju važnu ulogu. Povezivanje pora i manjih cijevi magnetskog toka rezultira jednom rastućom porom koja predstavlja umbru. Dosegne li promjer pore dovoljnu veličinu ili dovoljan ukupni magnetski tok, formirat će se polusjena.



Slika 2.4. Teorijski modeli magnetskog polja ispod površine umbre: a) monolitni model b) klaster model c) detaljni model klastera [18].

Jaka magnetska polja djelomično sprječavaju uobičajeni prijenos energije konvekcijom, čime se tumači tamnija boja Sunčevih pjega u odnosu na okolinu. Karakteristični radijus dobro razvijene pjege iznosi od 10 000 – 20 000 km, gdje tamna središnja jezgra predstavlja umbru koja je okružena manje tamnom, filametarnom polusjenom. U središtu pjege jakost magnetskog polja iznosi oko 2800 G te je gotovo okomita. Povećanjem polumjera povećava se i nagib magnetskog polja prema vertikali, gdje je jakost polja manja i doseže oko 1000 G ili manje [18].

Slika 2.5. prikazuje shematski prikaz nastanka i nestanka Sunčevih pjega, gdje crvena unutarnja sfera predstavlja Sunčevu radijacijsku jezgru, a plava mreža Sunčevu konvektivnu zonu.

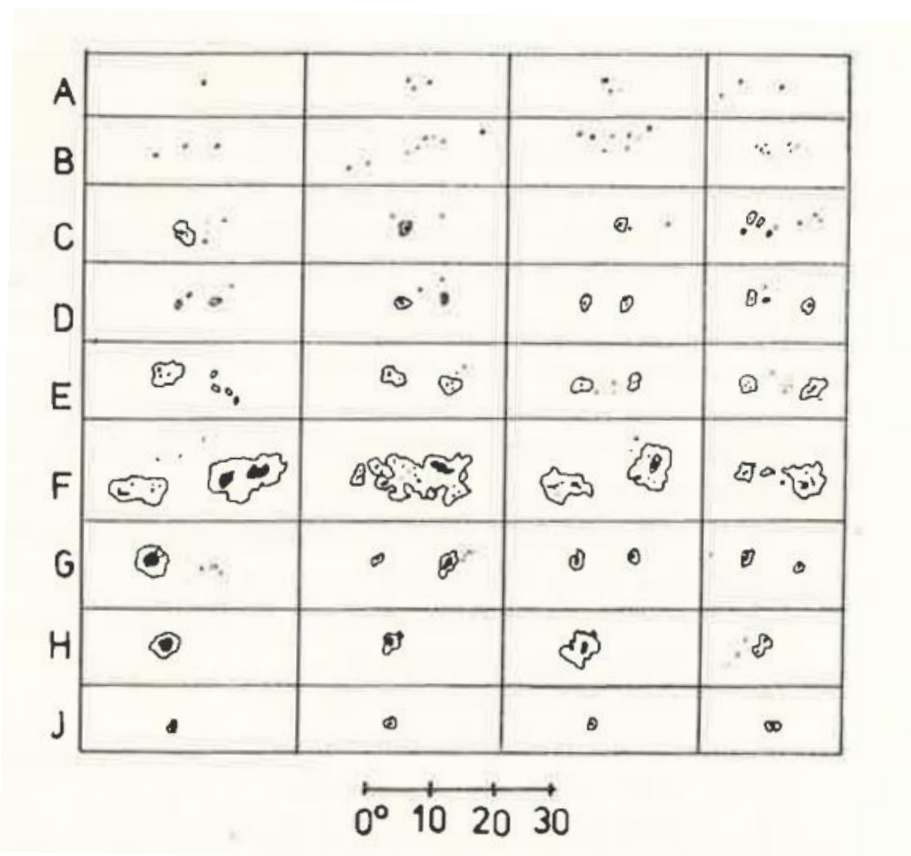


Slika 2.5. (a) Smicanje poloidnog polja diferencijalnom rotacijom Sunca blizu dna konvektivne zone; (b) Toroidalno polje kao posljedica smicanja diferencijalnom rotacijom; (c) Izdizanje uzlaznih petlji prema površini zbog jakosti toroidalnog polja; Sunčeve pjege nastaju od tih petlji; (d, e, f) Pojava dodatnog toka; (d, e) Tok se širi; (f) Tok se širi po širini i dužini od pjega koje se nestaju; (g) Meridijalno strujanje (žuta cirkulacija sa strelicama) nosi površinski magnetski tok prema polovima, uzrokujući preokret polova; (h) Dio tog toka se zatim prenosi prema dolje prema dnu i prema ekvatoru; (i) Obrnuti poloidni tok ponovno okreće blizu dna pomoću diferencijalne rotacije kako bi se proizvelo novo toroidalno polje [27].

### 3. METODE OPAŽANJA STRUKTURA U FOTOSFERI

Izravno promatranje Sunca potrebno je izbjegavati jer to može biti pogubno za ljudsko oko. Isto tako, nije dobra ni upotreba zatamnenih filtara jer mogu popucati uslijed velike koncentracije Sunčevih zraka, posebice u okularu dalekozora. Ukoliko se odluči na služenje takvim staklom, promatranje treba biti kratko. Korisno je pred objektiv staviti zaslon. No što je otvor zaslona manji, to će oštrina slike (zbog ogiba svjetlosti na rubovima zaslona) biti manja.

Amatersko promatranje Sunca sastoji se od ucrtavanja detalja sa Sunčeve površine na papir, što se radi metodom projekcije. Slika Sunca koju stvara okular teleskopa projicira se na bijeli ekran, a veličina slike ovisi o udaljenosti ekrana od okulara teleskopa. Zbog toga je moguće postići željene dimenzije slike pomicanjem ekrana. U ovom se postupku ekran pričvršćuje preko dvije ili tri šipke na tubus teleskopa okomito na optičku os. Da bi promatranje dnevnog kretanja Sunca bilo što učinkovitije, najbolje je upotrebljavati teleskop ekvatorske montaže. To je postavljanje teleskopa na dvije osovine odabrane tako da se prilikom praćenja dnevnoga gibanja nebeskih objekata teleskop okreće samo oko jedne od njih. Veličina ekrana koji se montira na dalekozor izabire se prema proizvoljnoj veličini projicirane slike, dok su standardni promjeri Sunčeve slike 10 cm, 20 cm i 25 cm. Isto tako, izbor veličine slike ovisi o mogućnostima dalekozora. Pri montaži ekrana na teleskopu dolazi do promjene ravnoteže, što se rješava postavljanjem protutege na suprotnoj strani teleskopa. Da bi se kvaliteta slike povećala, potrebno je okolinu ekrana što više zatamniti. Prilikom promatranja, na ekranu treba pričvrstiti crtaći papir na kojem je nacrtana kružnica sa željenim promjerom projicirane slike Sunca, za što je najbolji hamer (tvrđi crtaći papir) zbog najmanje deformacije. Nakon što se Sunčev disk izoštri, mekšom olovkom treba početi s crtanjem struktura koje se pojavljuju, poput pjega i baklji. Projiciranje obrne sliku tako da se sjever ponovo nalazi „gore”, dok je zapad sada lijevo, što znači da se Sunce kreće s desna ulijevo. Pjega izlazi na istočnoj (desnoj) strani, a zalazi na zapadnoj (lijevoj) strani, zbog čega je potrebno crtež početi s lijeve prema desnoj strani. Crtati treba precizno, posebice veće pjege sastavljene od mnogo malih pjega. Nakon opažanja može biti teško prebrojiti sve nacrtane pjege, stoga je pjege unutar grupe odmah prilikom opažanja najbolje prebrojiti i to napisati iznad dotične grupe. Redni broj grupe, kao i tip, preporučljivo je odmah napisati. Tip pjege određuje se prema Zürich-klasifikaciji, prema kojoj se razlikuje devet grupa pjega, kao što je prikazano na slici 3.1.



Slika 3.1. Zürich – klasifikacija grupa pjega, za svaki tip (A–J) prikazano je nekoliko primjera, a skala na dnu slike daje kutne dimenzije na heliografskoj mreži koordinata [22].

Tip A – mala osamljena (unipolarna) pjega ili skupina malih pjega

B – veća bipolarna skupina malih pjega bez penumbri

C – bipolarna skupina malih ili srednje velikih pjega s penumbrom između kojih su raspoređene male pjege

D – bipolarna skupina dviju ili triju malih pjega s penumbrom, a koje su spojene malim pjegama

E – velika bipolarna skupina nekoliko srednje velikih do velikih pjega s penumbrom u kojima ima mnogo malih pjega. Dimenzija po longitudi veća od 10°

F – vrlo velika bipolarna skupina s nepravilnim pjegama koje imaju penumbri i vrlo mnogo malih pjega. To je najrazvijeniji stupanj. Dimenzije po longitudi su oko 15°

G – prvi stupanj raspadanja pjega. Dvije velike pjege s penumbrom u bipolarnoj raspodjeli bez malih pora između njih. Veličine po longitudi su oko 10°

H – srednja ili velika pjega s penumbrom s malim brojem malih pjega u neposrednoj blizini, ili zbijena skupina malih ili srednje velikih pjega s penumbrom koje su nastale dijeljenjem velike pjege (unipolarne)

J – mala pravilna pjega s penumbrom ili mala pjega u raspadu (unipolarna)

Nakon što su sve pjege i skupine pjega ucrtane, crtaju se fakularna područja, koja se obično mogu zamijetiti samo na rubovima Sunčeva diska zbog povećanog kontrasta. Da bi se odredila točna orijentacija Sunca, određuje se dnevni hod Sunca. To je kružnica paralelna Zemljinu ekvatoru po kojoj se Sunce prividno giba zbog rotacije Zemlje. Okomica na tu kružnicu označava smjer prema sjeveru (Zemljin meridijan). Dnevni hod se određuje praćenjem povoljno smještene i jednostavne pjege za vrijeme dok je praćenje teleskopom isključeno, a nizom crtica na papir ucrtava se smjer gibanja pjege. Smjer sjever-jug od kojeg se poslije mjeri kut  $P$  nalazi se povlačenjem okomica na dnevni hod kroz centar Sunčeva diska. Uz crtež je potrebno upisati redni broj crteža, datum promatranja i vrijeme promatranja (početak i kraj). Isto tako, dobro je ocijeniti vremenske prilike i kvalitetu Sunčeve slike na ekranu prema ovim tablicama:

Tablica 3.1. [22]

Ocjene atmosferskih prilika	
5	vedro, čista atmosfera
4	nebo sa slabom sumaglicom
3	znatne promjene u atmosferi
2	velike promjene u atmosferi
1	silne promjene, velika oblačnost

Tablica 3.2. [22]

Ocjene za kvalitetu slike	
5	odlično vidljivi svi detalji na Suncu
4	dobro vidljiva granulacija i fakule
3	vidljive su i vrlo male pjege, granulacije se nazire
2	vidljive su male pjege
1	vidljive su veće pjege, granulacija se ne vidi

Potpuni opis crteža još bi sadržavao ime motrioca, mjesto opažanja, upotrijebljeni dalekozor, njegovo povećanje i karakteristike. Konačni izgled tablice s podacima koji se upisuju odmah za vrijeme promatranja je sljedeći:

Broj crteža – datum – vrijeme – ocjena atmosferskih prilika – ocjena kvalitete slike – instrument – mjesto opažanja – motrilac – primjedba.

Važno je naglasiti da crtež treba završiti za najviše deset minuta jer se zahtijeva točnost pri određivanju koordinata pjega na  $0,1^\circ$ , a za deset minuta se Sunce okrene oko osi za  $0,09^\circ$  [22].

### 3.1. Elementi za fizičko promatranje Sunca

Rotacijom Zemlje oko Sunca položaj Sunčeve osi prema Zemlji periodički se mijenja. To se događa s obzirom da se Zemljin i Sunčev ekvator ne nalaze u istoj ravnini pa je za promatranje Sunca potrebno znati točan prividan položaj Sunčeve osi. Položaj osi određuje se pomoću pozicijskog kuta  $P$  te heliografske širine Sunčeva diska  $B_o$ . Pozicijski kut jest kut između pravca sjevera na Sunčevu disku te projekcije Sunčeve osi na ravninu diska, što je prikazano na slici 4.1. Ako je Sunčeva os nagnuta prema istoku od smjera sjevera, taj je kut pozitivan. No, ako je Sunčeva os nagnuta prema zapadu,  $P$  je negativan. Time je određen položaj centralnog meridijana na Sunčevu disku.  $B$  je nagib Sunčeva ekvatora prema smjeru središta diska. Zemlja se nalazi sjeverno od ravnine Sunčeva ekvatora ako je  $B$  pozitivan, a južno od iste ravnine za negativni  $B$ . Prema tome, nagib Sunčeva ekvatora mjeri se duž centralnog meridijana. Za određivanje koordinata određenih struktura na površini Sunca potrebno je uz  $P$  i  $B$  poznavati i položaj Carringtonova meridijana, zbog čega se u godišnjacima daje podatak o heliografskoj dužini  $L$  centralnog Sunčeva meridijana, koji se mjeri od Carringtonova meridijana na zapad. Rotacijom Sunca,  $L$  se konstanto smanjuje, što je posljedica Sunčeve rotacije od istoka prema zapadu. Svi podaci u godišnjacima daju se za nulti sat UT, pa se označuju sa  $B_o$ ,  $L_o$ ,  $P$ . Vrijednosti za  $B_o$ ,  $L_o$  i  $P$  moraju se precizno interpolirati kako bi se postigla točnost od  $0,1^\circ$  pri određivanju heliografskih koordinata. S obzirom da se  $P$  i  $B$  relativno sporo mijenjaju, dovoljno ih je interpolirati na određeni datum promatranja (ukoliko tablice u godišnjaku ne daju podatke za svaki dan). Dakle, dovoljno je točno upotrijebiti vrijednost za 0 sati UT ( $P_o$  i  $B_o$ ) za bilo koje vrijeme promatranja. Promjena duljine Sunčeva centra iznosi  $0,09^\circ$  za deset minuta, zbog čega je potrebno što točnije izračunati heliografsku duljinu centralnog Sunčeva meridijana  $L$  [22].



U tu se svrhu koristi tablica prikazana na slici 3.2.

**PROMJENA HELIOGRAFSKE DULJINE  $L$  CENTRALNOG SUNČEVA  
MERIDIJANA**

Dana	Sati	Sati	Minuta
2	26,398°	1	0,550°
3	36,597	2	1,100
4	52,796	3	1,650
5	65,995	4	2,200
6	79,194	5	2,750
7	92,393	6	3,300
8	105,592	7	3,850
9	118,791	8	4,400
10	131,990	9	4,950
		10	5,500
		11	6,050
		12	6,600
		13	7,150°
		14	7,699
		15	8,249
		16	8,799
		17	9,349
		18	9,899
		19	10,449
		20	10,999
		21	11,549
		22	12,099
		23	12,649
		24	13,199
		5	0,046°
		10	0,092
		15	0,138
		20	0,184
		25	0,230
		30	0,276
		35	0,322
		40	0,368
		45	0,414
		50	0,460
		55	0,506
		60	0,550

Slika 3.2. Promjena heliografske duljine  $L$  centralnog Sunčeva meridijana [22].

## 4. ODREĐIVANJE POLOŽAJA FOTOSFERSKIH STRUKTURA

Da bi se odredio položaj struktura u fotosferi Sunca, potrebno je poznavati heliografske koordinate, koje su povezane su s orijentacijom Sunčeve osi rotacije.

Sunčeva je rotacija ustanovljena neposredno nakon konstrukcije prvih teleskopa te otkrića Sunčevih pjega. Galileo je uočio da se pjege gibaju od istočnog prema zapadnom rubu Sunčeva diska i da velike, dugoživuće grupe pjega nakon približno mjesec dana zauzimaju jednak položaj na disku. Zaključio je da je takvo gibanje pjega posljedica Sunčeve rotacije sinodičkim periodom od oko mjesec dana [19]. Prema referenci [20] sinodički je period definiran na sljedeći način: „*Vrijeme potrebno da se tijelo unutar Sunčevog sustava, poput planeta, Mjeseca ili umjetnog Zemljinog satelita, vrati u isti ili približno isti položaj u odnosu na Sunce kako ga vidi promatrač na Zemlji*”. Iz sustavnih i redovitih opažanja, zaključeno je da pjege koje se pojavljuju u blizini Sunčeva ekvatora rotiraju većom kutnom brzinom od pjega na većim heliografskim širinama. Ta je pojava nazvana diferencijalnom rotacijom, čija je prva detaljna istraživanja proveo engleski astronom Richard Christopher Carrington (1826. – 1875.), koji je također otkrio kretanje zona Sunčevih pjega prema Sunčevom ekvatoru kako Sunčev ciklus napreduje.

Heliografske koordinate povezane su s orijentacijom Sunčeve osi rotacije u odnosu na ravninu ekliptike. Ta je ravnina određena s dvije veličine: duljinom (longitudom) uzlaznog čvora Sunčeva ekvatora ( $W$ ) i inklinacijom Sunčeva ekvatora prema ravnini ekliptike ( $i$ ). Navedene veličine definiraju godišnje promjene elemenata koji se koriste za određivanje heliografskih koordinata. Godine 1871. opažen je crveni pomak Fraunhoferovih linija na zapadnom rubu Sunca i plavi pomak na istočnom, što je protumačeno kao posljedica Dopplerova učinka uslijed Sunčeve rotacije, a čime je u 19. stoljeću uvedena spektroskopska metoda određivanja brzine Sunčeve rotacije.

Diferencijalna rotacija Sunca obično se prikazuje izrazom:

$$\omega(B) = a + b \sin^2 B + c \sin^4 B \quad (4.1)$$

gdje je  $\omega$  sinodička ili siderička kutna brzina ( $^{\circ}/\text{dan}$ ), a  $B$  heliografska širina ( $^{\circ}$ ). Siderički ili zvjezdani period je vrijeme potrebno da nebesko tijelo unutar Sunčeva sustava izvrši jednu revoluciju u odnosu na fiksne zvijezde [21]. Iznos ekvatorske rotacije određuje koeficijent  $a$ , dok koeficijenti  $b$  i  $c$  opisuju diferencijalnu rotaciju. Određivanje koeficijenata  $a$ ,  $b$ , i  $c$  često se temelji na praćenju pomaka različitih razlučivih struktura u Sunčevoj fotosferi kao i u ostalim slojevima Sunčeve atmosfere. Važno je da odabrane strukture zadovoljavaju sljedeće kriterije: moraju biti jasno definirane da bi pouzdano definiranje njihova položaja bilo omogućeno; ne smiju pokazivati

vlastito gibanje kao ni značajne promjene oblika i kontrasta prema pozadini. Isto tako, vrijeme života mora im biti dovoljno dugo kako bi se njihovim premještanjem na Sunčevom disku mogao odrediti period Sunčeve rotacije. Uz to, visina iznad fotosfere se ne bi trebala značajno mijenjati. Bez obzira na navedeno, strukture koje u potpunosti zadovoljavaju navedene kriterije gotovo da i ne postoje. Mjerenja položaja pojedinačnih pjega ili grupa pjega ograničene su ispravnosti zbog njihova nepravilna oblika koji se mijenja u vremenu tijekom njihovog razvoja, stoga je vrlo teško automatizirati mjerenja. Zbog navedenih razloga obrada opažanja vrlo je naporan i dugotrajan proces.

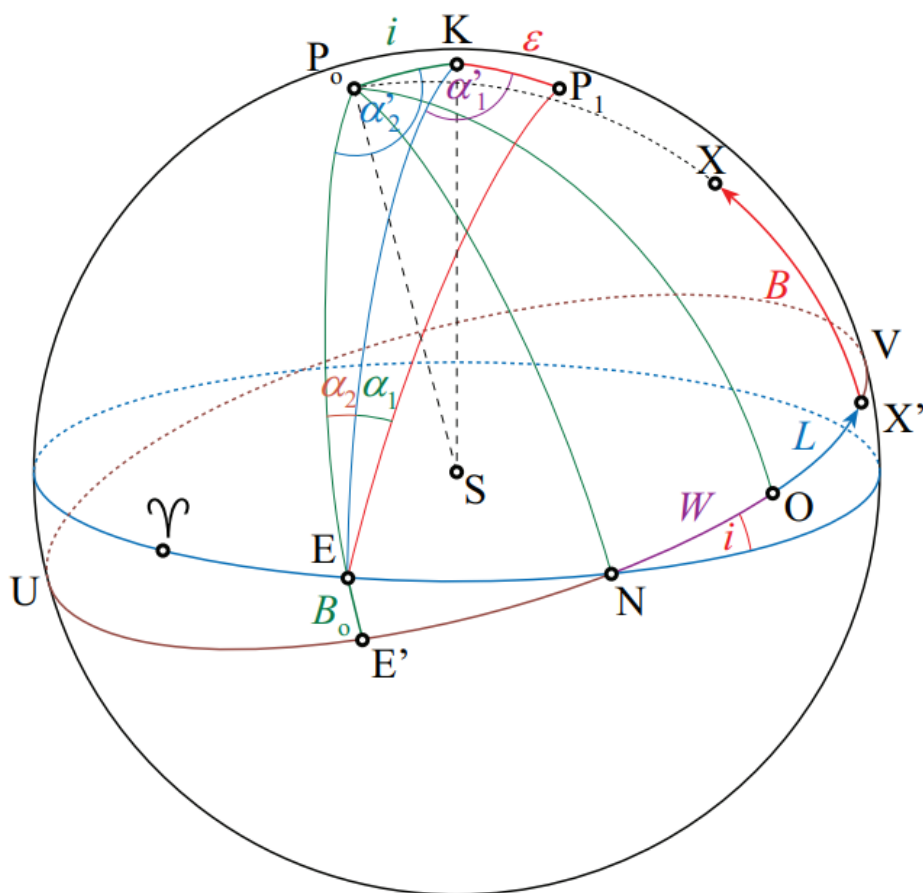
Na slici 4.1 prikazana je heliocentrična nebeska sfera. Točka K je ekliptični pol, a P<sub>o</sub> predstavlja sjeverni pol Sunčeve osi rotacije. Položaj proljetne točke na ekliptici označen je grčkim slovom  $\gamma$ . Kružnica UNV Sunčev je ekvator; točka N je uzlazni čvor Sunčeva ekvatora na ekliptici. Sunčeva rotacija je direktna te gledano s pola P<sub>o</sub>, odvija se u smjeru suprotnom od vrtnje kazaljke na satu, što je prikazano strelicom. Prostorni položaj osi rotacije određuje se pomoću dva već spomenuta parametra: inklinacijom  $i$ , tj. kutom između ravnine Sunčeva ekvatora i ekliptike te longitudom uzlaznog čvora  $\Omega$  (luk  $\gamma$ N).

Prihvaćene vrijednosti za ove veličine su:

$$i = 7^{\circ} 15' \tag{4.2}$$

$$\Omega = 73^{\circ}40' + 50,25'' (t - 1850,0) \tag{4.3}$$

gdje je  $t$  vrijeme izraženo u godinama.



Slika 4.1. Uz definiciju parametara ( $L_o$ ,  $B_o$ ,  $P$ ) koji jednoznačno određuju položaj Sunčeve osi rotacije i početnog meridijana [26].

Početni meridijan za mjerenje heliografske duljine, još nazvan Carringtonov meridijan prikazan je lukom  $P_0O$  na slici 4.1. On je određen kao stalna točka na površini Sunca od koje se mjeri heliografska duljina. Taj meridijan po definiciji rotira brzinom  $14,18^\circ/\text{danu}$ , a sinodička brzina iznosi  $13,20^\circ/\text{danu}$ . Sinodička rotacija od 27,28 dana naziva se Carringtonova rotacija. Pretpostavka je da točka  $O$  na Sunčevom ekvatoru rotira periodom od 25,38 dana, koji se još naziva i Carringtonov period. Referentni položaj točke  $O$  odabran je tako da se podudara s čvorom  $N$  Sunčeva ekvatora datuma 1. siječnja, 1854. god. u 12:00 UT (univerzalno vrijeme), što odgovara sljedećem julijanskom danu: 2398220,0.

Položaj točke  $O$  definiran je kutnom udaljenošću  $W = \sphericalangle NP_0O$ , koja je, s obzirom na definiciju, dana izrazom:

$$W = \frac{360^\circ}{25,38^d} (JD - 2398220,0) \quad (4.4)$$

Heliografske koordinate neke točke X na Sunčevoj površini su:

heliografska širina (latituda):  $B = 90^\circ - \sphericalangle P_oSX = \sphericalangle X'SX$

heliografska duljina  $L$  (longituda): kut u vrhu  $P_o$  sfernog trokuta  $OP_oX'$ , tj. duljina luka  $OX'$

Heliografska duljina se mjeri prema zapadu od tzv. Carringtonova meridijana, dok je latituda pozitivna od ekvatora prema sjeveru, a negativna od ekvatora prema jugu.

Ekliptička longituda točke E, koja predstavlja središte prividna Sunčeva diska i koja se nalazi na ekliptici, dana je izrazom:

$$\lambda_o - 180^\circ$$

gdje je  $\lambda_o$  Sunčeva prividna longituda.

Prema tome je:

$$EN = \Omega - (\lambda_o - 180^\circ)$$

Ako su  $(L_o, B_o)$  heliografske koordinate središta Sunčeve ploče, tada je:

$$\sphericalangle P_oSE = 90^\circ - B_o$$

$$\sphericalangle EP_oN = 360^\circ - W - L_o$$

pri čemu veličina  $360^\circ - W$  označava heliografsku duljinu ulaznog čvora.

Primjenom poučaka sferne trigonometrije na trokut  $EE'N$  (u vrhu N je kut  $i$ ) i na trokut  $P_oEN$  (kut u vrhu N jednak je  $90^\circ - i$ ) dobivaju se sljedeće:

$$\sin B_o = \sin(\lambda_o - \Omega) \sin i \quad (4.5a)$$

$$\cos B_o \sin(L_o + W) = \cos i \sin(\Omega - \lambda_o) \quad (4.5b)$$

$$\cos B_o \cos(L_o + W) = -\cos(\Omega - \lambda_o) \quad (4.5c)$$

Iz izraza (4.5b) i (4.5c) slijedi:

$$\tan(L_o + W) = -\frac{\cos i \sin(\Omega - \lambda_o)}{\cos(\Omega - \lambda_o)} \quad (4.5)$$

Omjer funkcija sinus i kosinus na desnoj strani izraza (4.5d) nije zamijenjen funkcijom tangens

radi lakšeg računanja kvadranta kojem pripada argument  $(L_o + W)$  tangens funkcije na lijevoj strani jednadžbe.

Izrazima (4.5a) i (4.5d) mogu se izračunati veličine  $L_o$ ,  $B_o$  za zadani trenutak opažanja, pri čemu treba poznavati pripadnu vrijednost Sunčeve prividne geocentrične longitude  $\lambda_o$ .

Ako je  $P_1$  sjeverni nebeski pol, pozicijski kut  $P$  sjevernog pola ( $P_o$ ) Sunčeve osi rotacije jednak je zbroju kutova  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  (označenih na slici 4.1):

$$P = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (4.5e)$$

U slučaju planetografskih koordinata (i u slučaju dvojnih zvijezda) pozicijski kut mjeri se od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ , dok se u slučaju Sunca uzima da je njegov apsolutni iznos  $90^\circ$ . Iznos je pozitivan kada je sjeverni pol rotacijske osi priklonjen prema istoku, a negativan kada je sjeverni pol rotacijske osi priklonjen prema zapadu. Heliografska širina središta Sunčeve ploče ( $B_o$ ) upućuje na priklon Sunčeve osi rotacije u odnosu na Zemlju.  $B_o$  je pozitivnog iznosa kada je sjeverni pol rotacijske osi priklonjen prema Zemlji, a negativan u suprotnom slučaju.

U sfernom trokutu  $KP_1E$  luk  $\sphericalangle KSE$  iznosi  $90^\circ$ ,  $\sphericalangle KSP_1$  jednak je priklonu  $\varepsilon$  Zemljina ekvatora prema ekliptici, dok je sferni kut  $\alpha'_1$  u vrhu  $K$  jednak razlici ekliptičke duljine točke  $P_1$  (koja iznosi  $90^\circ$ ) i ekliptičke duljine točke  $E$ , stoga vrijedi:

$$\sphericalangle KSE = 90^\circ$$

$$\sphericalangle KSP_1 = \varepsilon$$

$$\alpha'_1 = 90^\circ - (\lambda_o - 180^\circ) = 270^\circ - \lambda_o$$

Tada je:

$$\tan \alpha_1 = -\cos(\lambda_o) \tan(\varepsilon) \quad (4.5f)$$

U sfernom trokutu  $KEP_o$   $\sphericalangle KSE$  je  $90^\circ$ , dok je  $\sphericalangle P_oSK$  jednak inklinaciji  $i$  Sunčeva ekvatora. Ekliptička duljina točke  $P_o$  je  $(\Omega - 90^\circ)$ , tako da je kut  $\alpha'_2$  kut u vrhu  $K$  sfernog trokuta  $P_oKE$  jednak:

$$\alpha'_2 = \lambda_o - 180^\circ - (\Omega - 90^\circ) = \lambda_o - \Omega - 90^\circ$$

Iz sfernog trokuta  $KEP_o$  slijedi:

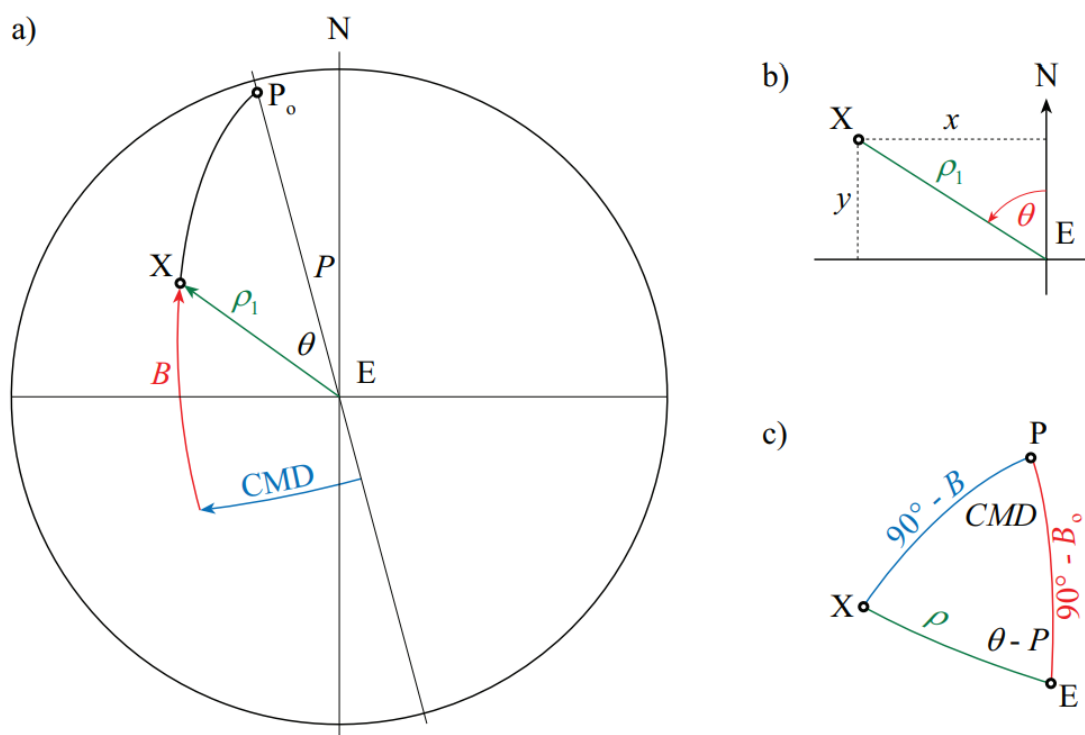
$$\tan \alpha_2 = -\tan i \cos(\Omega - \lambda_o) \quad (4.5g)$$

Iz izraza (4.5e), (4.5f), i (4.5g) dobiva se izraz za pozicijski kut sjevernog pola Sunčeve osi rotacije:

$$P = -\tan^{-1}(\cos \lambda_o \tan \varepsilon) - \tan^{-1}(\tan i \cos(\Omega - \lambda_o)) \quad (4.6)$$

Položaj Sunčeve osi rotacije i početnog meridijana u odnosu na promatrača jednoznačno su definirani parametrima ( $L_o, B_o, P$ ) danim izrazima (4.5a), (4.5d) i (4.6) za zadani trenutak opažanja, što određuje heliografski koordinatni sustav.

Slika 4.2. prikazuje Sunčev disk kako ga vidi motritelj. Točka E prividno je središte Sunčevog diska, dok je pravac NE okomica na tzv. dnevni hod Sunca, koji se podudara s linijom istok – zapad. Pravac EN u smjeru jug – sjever odgovara nultom pozicijskom kutu  $\theta = 0^\circ$ . Točka  $P_o$  je sjeverni pol Sunčeve osi rotacije, dok je kut  $P$  pozicijski kut sjevernog pola Sunčeve osi rotacije. Položaj točke X na Sunčevom disku može se iskazati dvjema veličinama koje se određuju opažanjem. Prva je kutna udaljenost točke/objekta od središta Sunčeva diska ( $\rho_1$ ). Druga veličina jest pozicijski kut  $\theta = \sphericalangle NEX$ , koji se mjeri u suprotnom smjeru od kazaljke na satu od satne kružnice na nebeskoj sferi koja prolazi središtem Sunčeva diska.



Slika 4.2. a) Sunčeva ploča kako je vidi promatrač b) Određivanje veličina obično se provodi mjerenjem pravokutnih koordinata  $x$  i  $y$  objekta na Sunčevoj ploči c) Veza heliografskih koordinata ( $\lambda, B$ ) i koordinata  $\rho$  i  $\theta$  nalazi se pomoću sfernog trokuta  $P_oXE$  [26].

Koordinate  $(x,y)$  točke X u pravokutnom koordinatnom sustavu s ishodištem u točki E obično se određuju neposrednim mjerenjem. Os ordinata točke E u smjeru je nultog pozicijskog kuta (EN), dok je apcisa os u smjeru dnevnog hoda (slika 4.2.b). Ako se koordinate  $x$  i  $y$  iskažu u kutnim jedinicama, tj. normaliziraju u odnosu na prividni kutni polumjer Sunca, tada se veličine  $(\rho, \theta)$  nalaze pomoću izraza:

$$\rho_1 = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$x = \rho_1 \sin(\theta)$$

$$y = \rho_1 \cos(\theta)$$

Kutna duljina luka  $\rho_1$  velike kružnice EX na Sunčevoj površini može se izračunati poznavanjem kutne udaljenosti  $\rho_1$  te udaljenosti Zemlja – Sunce. Kut  $\rho_1$  identičan je kutu između pravaca povučenih iz središta Sunca prema promatraču i točki X. Isto tako, može se pokazati da iz kosokutnog trokuta (u ravnini), u čijim su vrhovima Zemlja, središte Sunca i promatrana točka na Sunčevoj površini, slijedi izraz:

$$\sin(\rho + \rho_1) = \frac{r \sin \rho_1}{R} \quad (4.7)$$

pri čemu je  $r$  udaljenost Zemlja – Sunce, a  $R$  Sunčev polumjer.

Ako su  $(B, L)$  heliografske koordinate točke X, a  $(B_o, L_o)$  heliografske koordinate središta E Sunčeve ploče, tada su elementi sfernog trokuta  $P_oXE$  (slika 4.2.c):

$$\sphericalangle XEP_o = 90^\circ - B$$

$$\sphericalangle P_oXE = 90^\circ - B_o$$

$$\sphericalangle EP_oX = \rho$$

$$\sphericalangle P_oEX = \theta - P$$

$$\sphericalangle XP_oE = L - L_o$$

gdje posljednja veličina predstavlja kutnu udaljenost točke X od središnjeg meridijana, što se označava kao CMD (prema engleskoj skraćenici *central meridian distance*).

Razrješavanjem sfernog trokuta  $P_oXE$  dobivaju se izrazi:



$$\sin B = \sin B_o \cos \rho + \cos B_o \sin \rho \cos(P - \theta) \quad (4.8a)$$

$$\cos(L - L_o) = \sin \rho \sin(P - \theta) \quad (4.8b)$$

$$\cos B \cos(L - L_o) = \cos \rho \cos B_o - \sin \rho \sin B_o \cos(P - \theta) \quad (4.8c)$$

pomoću kojih se izračunavaju heliografske koordinate ( $B, L$ ) promatrane točke X.

U postupku nalaženja kutne brzine Sunčeve rotacije iz praćenja pomaka struktura, prvo se proračunavaju udaljenosti opažane strukture od središnjeg Sunčevog meridijana (CMD), a zatim se kutna brzina  $\omega$  nalazi praćenjem vremenske promjene kutne udaljenosti ustrojstva od središnjeg meridijana:

$$\omega = \frac{\Delta(CMD)}{\Delta t} \quad (4.9)$$

Kutna se brzina može se izvesti iz nagiba pravca koji najbolje odgovara mjerenim veličinama  $CMD$  u ovisnosti o vremenu  $t$ . Linearna ovisnost  $CMD(t)$  vrijedi za strukture smještene na Sunčevoj površini [19][25].

#### 4.1. Proračunavanje elemenata za fizička opažanja Sunca

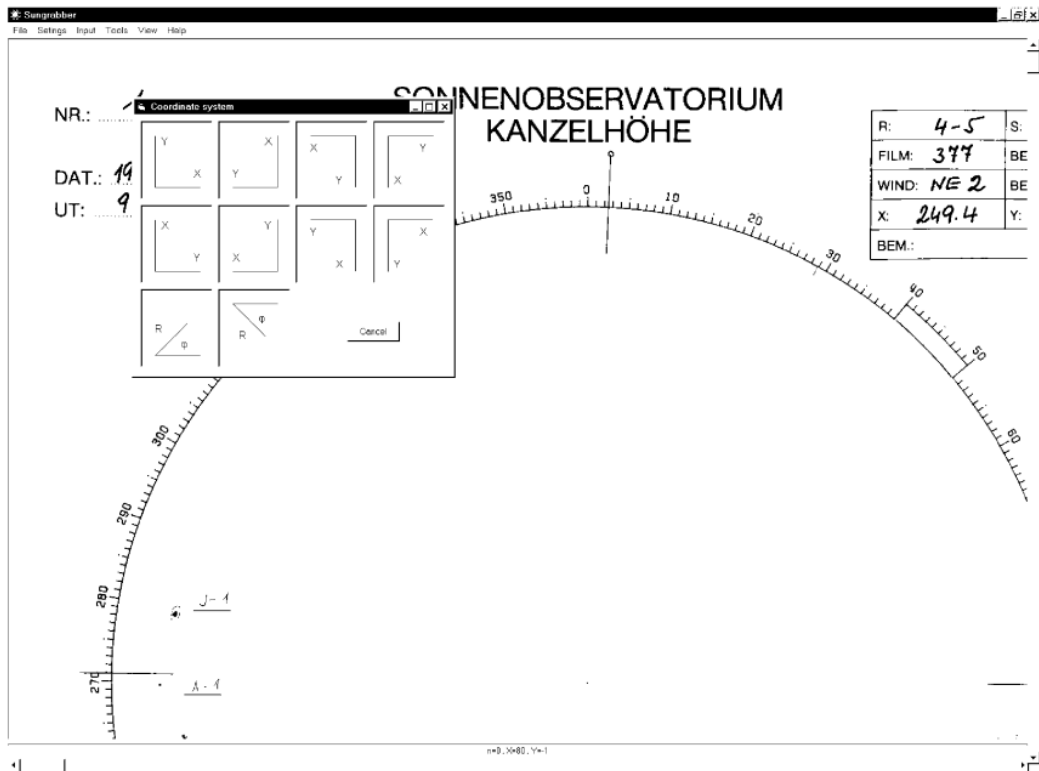
U prethodnim su razmatranjima navedeni izrazi za određivanje heliografskih koordinata pojava na Suncu (izrazi 4.8a,b,c). Mjereći heliografske koordinate određenih pojava na Suncu te praćenjem promjena njihovih udaljenosti od središnjeg meridijana, može se odrediti sinodički period Sunčeve rotacije. Ukoliko se navedeni izrazi ili postupci primjenjuju, treba poznavati vrijednost čimbenika ( $L_o, B_o, P$ ) i udaljenost  $r$  Zemlje od Sunca za zadani trenutak opažanja. Zemljina udaljenost od Sunca pojavljuje se u izrazu 4.7. Heliografske koordinate središta Sunčeva diska ( $L_o, B_o$ ) i pozicijski kut ( $P$ ) sjevernog pola Sunčeve osi rotacije nazivaju se elementima za fizička opažanja Sunca. Za zadani trenutak opažanja njihova vrijednost može se interpolirati iz podataka koji se objavljuju u astronomskim godišnjacima. Elementi ( $L_o, B_o, P$ ) mogu se neposredno izračunati pomoću izraza 4.5a, 4.5d i 4.6, poznavajući vrijednost prividne Sunčeve longitude  $\lambda_o$  pravog priklona  $e$  Zemljina ekvatora prema ekliptici. Pri tome, veličine  $i, \Omega$  i  $W$  dane su izrazima 4.2, 4.3 i 4.4. U postupku opisanom u knjizi Elementarna astronomija, D. Roša, (607. – 608.) nalazi se izvod prividne Sunčeve longitude, pravi priklon Zemljina ekvatora prema

ekliptici te Zemljina udaljenost od Sunca. To omogućuje izračunavanje heliografskih koordinata i veze sideričkog i sinodičkog perioda Sunčeve rotacije bez upotrebe astronomskih godišnjaka.

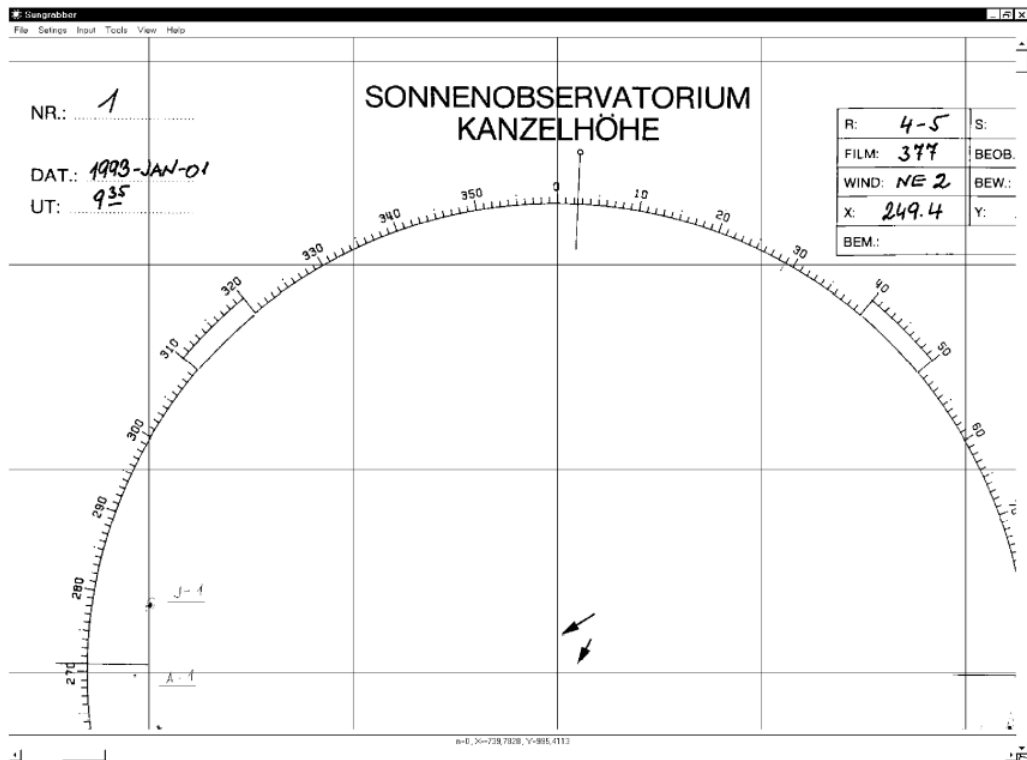
## 5. SUNGRABBER

Pretvorba u heliografske koordinate dugotrajan je postupak s različitim izvorima pogrešaka, zbog čega je razvijena aplikacija Sungrabber, kako bi mjerenja bila brža i lakša. Podaci izmjerenih heliografskih koordinata pohranjuju se u tekstualne datoteke koje su povezane s pripadajućim solarnim slikama, koje mogu biti pohranjene u nekoliko grafičkih oblika (jpg, gif, bmp). To omogućuje brzu i jednostavnu usporedbu mjerenja iz različitih izvora, a moguće je i proširenje softvera, zbog čega se Sungrabber može koristiti u različite svrhe. Rad u aplikaciji nije složen. Na pojedinoj slici moguće je definirati heliografski koordinatni sustav u nekoliko klikova mišem [23]. Efemeride su tablice koje služe u astronomiji i navigaciji, a donose podatke o položaju i gibanju nebeskih tijela za neko razdoblje, kao i podatke o udaljenosti i sjaju tijela, retrogradnom gibanju planeta, te o pomrčinama [24]. Efemeride za fizička promatranja Sunca izračunavaju se pomoću formula s dovoljnom točnošću. Sungrabber nudi mogućnost mjerenja na solarnim sinoptičkim slikama, a koordinate tragača pohranjuju se izravno u heliografski koordinatni sustav bez potrebe za daljnjom konverzijom. Podaci se prema zadanim postavkama spremaju u isti direktorij kao i slika, iako ih je moguće pohraniti pod drugim imenom i u drugom direktoriju. Postoji dodatno ugrađena opcija za brzu usporedbu podataka iz različitih izvora, koji se mogu pohraniti u zasebne datoteke i jednostavno mijenjati. Rad koji se obavi u programu može se spremati bilo kada, a podaci se mogu koristiti i mijenjati kada je to potrebno. Nakon pokretanja aplikacije, korisnik otvara sliku iz izbornika datoteka. Prikazat će se novi dijaloški okvir ukoliko se slika učitava prvi put. Aplikacija nije razvijena samo za mjerenja na solarnim sinoptičkim snimkama već i za mjerenja na drugim vrstama snimki, stoga je uključena mogućnost odabira jednog od nekoliko koordinatnih sustava. Odabir je potrebno izvršiti iz izbornika „Postavke-Koordinatni sustav”, što je prikazano na slici 5.1. Pritiskom tipke + na ekranu se prikaže pravokutna mreža (slika 5.2). Veća gustoća mreže dobiva se ponovnim pritiskom na tipku, dok tipka - ima suprotnu funkciju. Potrebno je postaviti nultu točku, čiji je položaj proizvoljan. Za ispravno određivanje središta Sunčevog diska, nulta se točka mora nalaziti unutar Sunčevog diska. Ako je naziv slike u formatu `kantz_drawx_fd_yyymmdd_hhmm` (gdje je yyyy godina, mm je mjesec, dd je dan, hh je sat i mm je minuta opažanja izražena u UT, tj. prema SOHO standardu), Sungrabber prepoznaje vrijeme promatranja te automatski izračunava efemeride za fizička promatranja Sunca, dok je za druge formate naziva slika potrebno unijeti vrijeme promatranja. Definiranje Sunčevog limba osjetljiv je proces s velikim utjecajem na točnost podataka, zbog čega se mora određivati s velikom preciznošću. Točke Sunčeva ruba označuju se klikom lijeve tipke miša, a u slučaju pogreške, točku je moguće ukloniti klikom desne tipke miša. Točnost ovisi o broju označenih točaka, iako

označavanje previše točaka može potrajati i ne garantirati poboljšanje. Teoretski su dovoljne tri točke, ali preporučljivo ih je deset do petnaest.



Slika 5.1. Odabir koordinatnog sustava u programu Sungrabber [23].



Slika 5.2. Pravokutna mreža preko slike [23].

Glavni problem zbog kojeg postoji važno pitanje o točnosti jest kvaliteta crteža Sunčevog diska. Gotovo je nemoguće utvrditi greške nastale pri izvođenju crteža s obzirom na čimbenike koji doprinose procesu određivanja struktura na Suncu. Neki od njih su uvjeti u atmosferi, vrijeme potrebno za izradu crteža, stabilnost nosača teleskopa, točnost praćenja i dr. Iskustvo promatrača smatra se najvažnijim čimbenikom. Utjecaj koji se može lako izmjeriti i eliminirati proizlazi iz aberacije leće projicirane slike. Najveća razlučivost i točnost postižu se u središtu slike, gdje navedeni utjecaji ponekad mogu pridonijeti više od jednog stupnja netočnosti u heliografskim koordinatama, dok se točnost smanjuje prema solarnom rubu. Jedna od napomena koja bi mogla pomoći u postupku boljih mjerenja pomoću Sungrabbera jest da skenovi crteža Sunca budu kvalitetni i visoke rezolucije. Skeniranje visoke rezolucije će dati visoku rezoluciju za mjerenja, dok je ugrađeni algoritam za izračun efemerida za fizička promatranja Sunca dovoljno točan za obradu skeniranog. Ako su potrebne bolje vrijednosti od dobivenih, one se mogu promijeniti (te uz to provjeriti) jednostavno „ručno“ u tekstualnoj datoteci povezanoj sa slikom, a kada se ista slika ponovo učita, Sungrabber će koristiti te ažurirane vrijednosti [23].

## 6.ZAKLJUČAK

Sunčeve su pjege tamna područja vidljiva u bijeloj svjetlosti u fotosferi, koje su astronomi u drevnoj Kini uočili prije nekoliko tisuća godina. To su područja pojačane magnetske aktivnosti gdje magnetske cijevi u obliku petlji izbijaju na površinu stvarajući bipolarna aktivna područja, zbog čega se javljaju u grupama, iako se mogu pojaviti i kao pojedinačne pjege. Promatranja provedena tijekom posljednja dva stoljeća pokazuju da je broj Sunčevih pjega približno periodičan, a da bi se odredio njihov položaj, potrebno je poznavati heliografske koordinate, koje su povezane su s orijentacijom Sunčeve osi rotacije. Početni meridijan za mjerenje heliografske duljine naziva se Carringtonov meridijan, a određen je kao stalna točka na površini Sunca od koje se mjeri heliografska duljina. Heliografske koordinate neke točke  $X$  na Sunčevoj površini su heliografska širina (latituda)  $B$  i heliografska duljina  $L$  (longituda). Heliografska duljina se mjeri prema zapadu od tzv. Carringtonova meridijana, dok je latituda pozitivna od ekvatora prema sjeveru, a negativna od ekvatora prema jugu. Položaj točke  $X$  na Sunčevom disku može se iskazati kutnom udaljenošću točke/objekta od središta Sunčeva diska te pozicijskim kutom. U postupku nalaženja kutne brzine Sunčeve rotacije iz praćenja pomaka struktura prvo se proračunavaju udaljenosti opažane strukture od središnjeg Sunčevog meridijana ( $CMD$ ), a zatim se kutna brzina nalazi praćenjem vremenske promjene kutne udaljenosti ustrojstva od središnjeg meridijana. Sinodički period Sunčeve rotacije može se odrediti neposrednim mjerenjem Dopplerova učinka u blizini ruba Sunčeva diska ili praćenjem prividnog gibanja pojava u Sunčevoj atmosferi, dok se siderički period Sunčeve rotacije računa tako što se sinodički period korigira s obzirom na gibanje Zemlje oko Sunca. Rotacijom Zemlje oko Sunca položaj Sunčeve osi prema Zemlji periodički se mijenja, što se događa s obzirom da se Zemljin i Sunčev ekvator ne nalaze u istoj ravnini, pa je za promatranje Sunca potrebno znati točan prividan položaj Sunčeve osi. Položaj osi određuje se pomoću pozicijskog kuta i heliografske širine Sunčeva diska. Promjena duljine Sunčeva centra iznosi  $0,09^\circ$  za deset minuta, zbog čega je potrebno što točnije izračunati heliografsku duljinu centralnog Sunčeva meridijana. Jedna od metoda opažanja struktura u fotosferi Sunca je amatersko promatranje metodom projekcije, nakon čijeg se postupka tip pjege određuje prema Zürich-klasifikaciji. No, jedna od korisnih metoda određivanja položaja Sunčevih pjega jest pomoću programa Sungrabber. Motivacija za razvoj softvera Sungrabber je učiniti mjerenja na Sunčevim crtežima što lakšima. Program se može koristiti u znanstvene svrhe besplatno te se dalje razvija i poboljšava.

## 6. LITERATURA

- [1] B.W. Carroll, D.A. Ostlie, An introduction to modern astrophysics, 2<sup>nd</sup> edition, Pearson New International Edition, UK, 2014.
- [2] <<https://www.britannica.com/place/Sun>> (19.8.2022.)
- [3] <<https://eskola.zvezdarnica.hr/osnove-astronomije/sunce/grada-sunca/>> (19.8.2022.)
- [4] <<https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=58774>> (19.8.2022.)
- [5] <<https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=69666>> (19.8.2022.)
- [6] <<https://www.britannica.com/science/photosphere>> (20.8.2022.)
- [7] <<https://solarscience.msfc.nasa.gov/surface.shtml>> (20.8.2022.)
- [8] <<https://www.space.com/sunspots-formation-discovery-observations>> (20.8.2022.)
- [9] <<https://www.nature.com/articles/s41467-018-07690-0>> (20.8.2022.)
- [10] <<https://science.howstuffworks.com/sunspot4.htm>> (20.8.2022.)
- [11] <<https://academic.oup.com/astrogeo/article/40/6/6.21/251044>> (21.8.2022.)
- [12] <<https://sunearthday.nasa.gov/2006/locations/firstdrawing.php>> (21.8.2022.)
- [13] <<https://www.britannica.com/biography/Johannes-Fabricius>> (21.8.2022.)
- [14] <<https://www.britannica.com/biography/Galileo-Galilei/Telescopic-discoveries#ref576742>> (21.8.2022.)
- [15] <<https://www.famousscientists.org/thomas-harriot/>> (21.8.2022.)
- [16] <<https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>> (18.8.2022.)
- [17] <[https://est-east.eu/?option=com\\_content&view=article&id=924&Itemid=622&lang=en](https://est-east.eu/?option=com_content&view=article&id=924&Itemid=622&lang=en)> (21.8.2022.)
- [18] I. Poljančić Beljan, Properties of the solar velocity field indicated by motions of sunspot groups and coronal bright spots, doktorska disertacija, Institut für Physik, Karl–Franzens–Universität Graz, 2018.
- [19] <<https://eskola.zvezdarnica.hr/osnove-astronomije/sunce/sunceva-rotacija/>> (22.8.2022.)
- [20] <<https://www.britannica.com/science/synodic-period>> (22.8.2022.)

- [21] <<https://www.britannica.com/science/sidereal-period>> (22.8.2022.)
- [22] M. Berić, E. Frlež, S. Kovačić, E. Rabuzin, I. Tadej, B. Vršnjak, *Astronomija, Narodna tehnika hrvatske*, Zagreb, 1982.
- [23] D. Hržina, D. Roša, A. Hanslmeier, V. Ruždjak, R. Brajša, Sungrabber-software for measurements on solar synoptic images, *Cent. Eur. Astrophys. Bull.* 31 (2007), 1, 273–279
- [24] <<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17113>> (25.8.2022.)
- [25] I. Skokić, *Prijenos momenata količine gibanja i polje brzina velikih razmjera na Suncu*, doktorski rad, Zagreb, 2014.
- [26] D. Roša: *Elementarna astronomija*, Zvezdarnica Zagreb-Zagrebački astronomski savez i Hrvatsko astronomsko društvo, prvo izdanje, 2020.
- [27] M.Dikpati, Predicting cycle 24 using various dynamo-based tools  
<<https://angeo.copernicus.org/articles/26/259/2008/angeo-26-259-2008.pdf>> (15.9.2022.)