

## SUNČEVO ZRAČENJE – MJERENJA U MIKROVALNIM I RENDGENSKOM PODRUČJU; U LINIJAMA HA I HEI 1083 NM

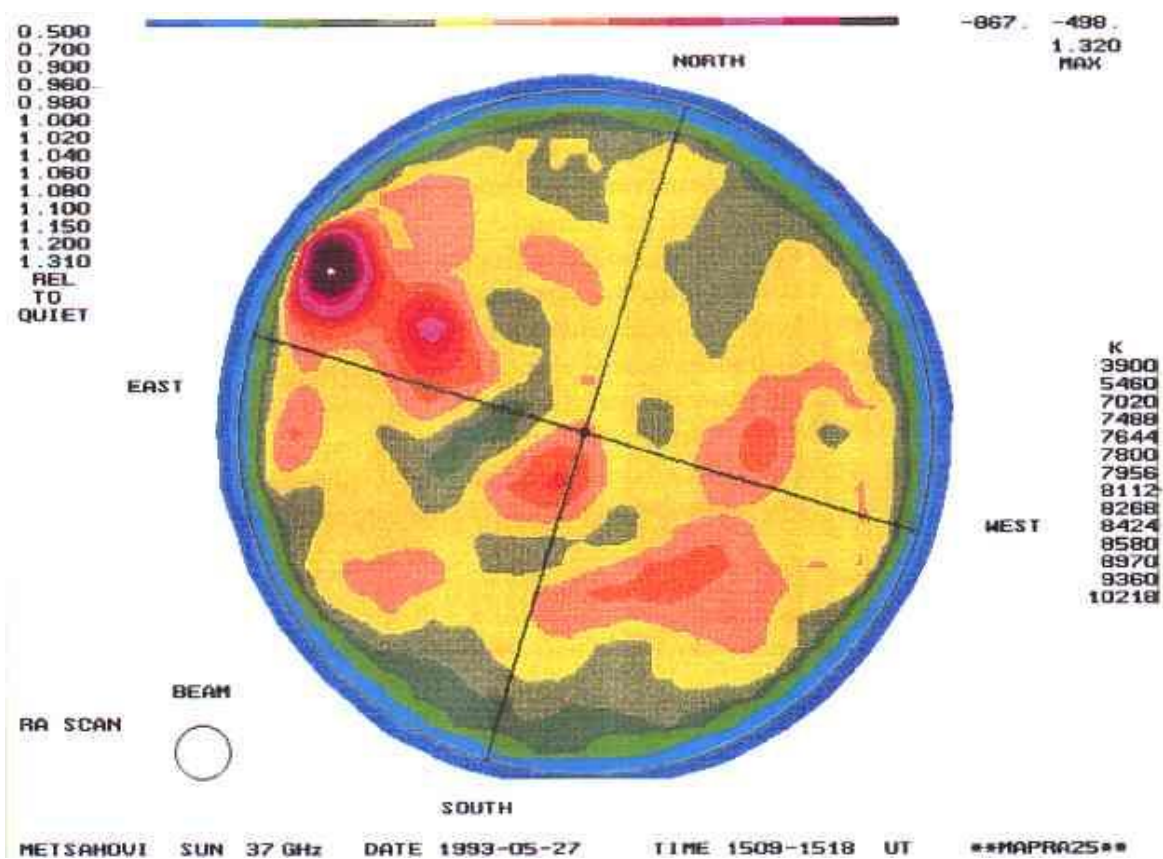
*Priredila: Dajana Hinger*

### **Mjerenja u mikrovalnom, rendgenskom području i u ha liniji**

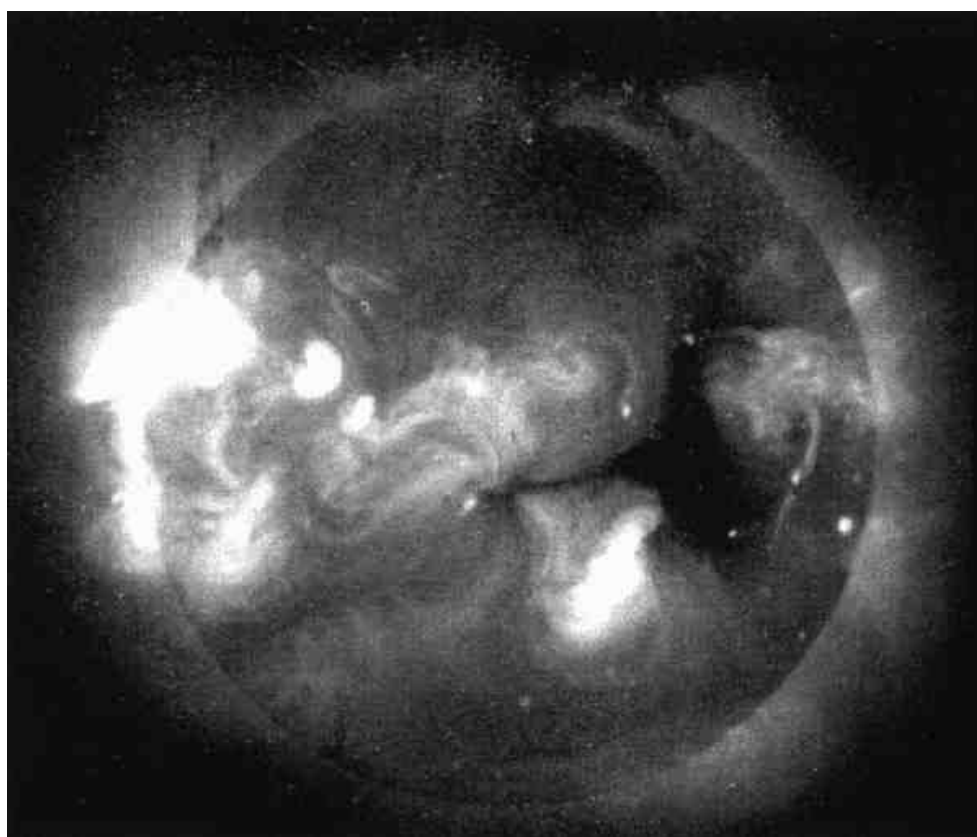
Na slici 1. prikazan je izgled Sunca u mikrovalnom dijelu spektra, snimljen 27.05.1993. godine, na MRRS (Matsuhara Radio Research Station). Temperatura sjaja je zadana Rayleigh - Jeansovim zakonom zračenja i zapravo mjeri jakost mikrovalnog ili radio zračenja. Različite temperature sjaja na Suncu označene su različitim bojama, pri čemu vrijednost temperature za odgovarajuću boju na slici nalazimo u tablici temperatura u K na desnoj strani slike. Na lijevoj strani dani su intenziteti sjaja u relativnim jedinicama. Područja najniže temperature označena su plavom, a područja najviše temperature ljubičastom bojom. Valja naglasiti da se područja u kojima je temperatura sjaja viša od temperature mirnog Sunca nazivaju visokotemperaturnim područjima (VTP), a ona u kojima je temperatura sjaja niža od temperature mirnog Sunca - niskotemperaturna područja (NTP). Temperatura mirnog Sunca je temperatura Sunca bez bljeskova ili drugih poremećaja. U tom slučaju relativna jakost zračenja je 1,00 što odgovara temperaturi sjaja od 7800 K. Svako mirno područje na Suncu magnetskog polja manjeg od 0.01 T i temperature od  $10^4$  K do  $10^7$  K zrači u mikrovalnom dijelu spektra zbog zakročnog zračenja, koje nastaje raspršenjem elektrona na ionima. Cijela atmosfera Sunca na visinama većim od 200 km od fotosfere prozirna je za mikrovalno zračenje valne duljine od oko 8 mm. U filamentima se zbog veće gustoće i niže temperature plazme događa apsorpcija mikrovalnog zračenja. U koroninim šupljinama, koje imaju manju gustoću i temperaturu mikrovalno zračenje je smanjeno.

Na slici 2. je prikazano Sunce u rendgenskom području. Mjerenja su izvedena na japanskom satelitu YOHKOH, 27.05.1993. godine. Tamna područja na slici odgovaraju područjima niže temperature, najjasnije su koronine šupljine, a svjetla područja su područja više temperature od temperature okoline. Svijetle točke na slici su koronine svijetle točke, a vidljive su i koronine petlje.

Na slici 2. uočavamo tamna područja - koronine šupljine; jednu veliku u ekvatorskom području i dvije manje, jednu u sjevernom i jednu u južnom polarnom području. Usporedimo li rendgensku i mikrovalnu sliku Sunca, vidimo da aktivna područja na rendgenskoj slici odgovaraju jakoj emisiji u mikrovalnom području. Nadalje, područja slabijeg sjaja u mikrovalnom, odgovaraju tamnim područjima na rendgenskoj slici. Usporedbom možemo odrediti približne temperature sjaja u koroninim šupljinama, pri čemu sliku u rendgenskom području moramo rotirati za  $17^\circ$ , da bi se Sunčevi ekvatori na obje slike poklopili. S obzirom da su slike različitih veličina, 1 mm na slici u rendgenskom području odgovara 0,93 mm na slici u mikrovalnom području, te vrijednosti udaljenosti koroninih šupljina od centra množimo s faktorom 0,93 i na tim udaljenostima tražimo iznose temperatura sjaja na slici u mikrovalnom području.



Slika 1. Sunce u mikrovalnom dijelu spektra



Slika 2. Sunce u rendgenskom dijelu spektra

Usporedbom nalazimo:

Ekvatorska koronina šupljina:

boja	relativna jakost zračenja	temperatura sjaja (K)
žuta	1,000-1,020	7800-7956
svijetlonarančasta	1,020-1,040	7956-8112
narančasta	1,040-1,060	8112-8268

Sjeverna polarna koronina šupljina:

boja	relativna jakost zračenja	temperatura sjaja (K)
zelena	0,980-1,000	7644-7800
žuta	1,000-1,020	7800-7956

Južna polarna koronina šupljina:

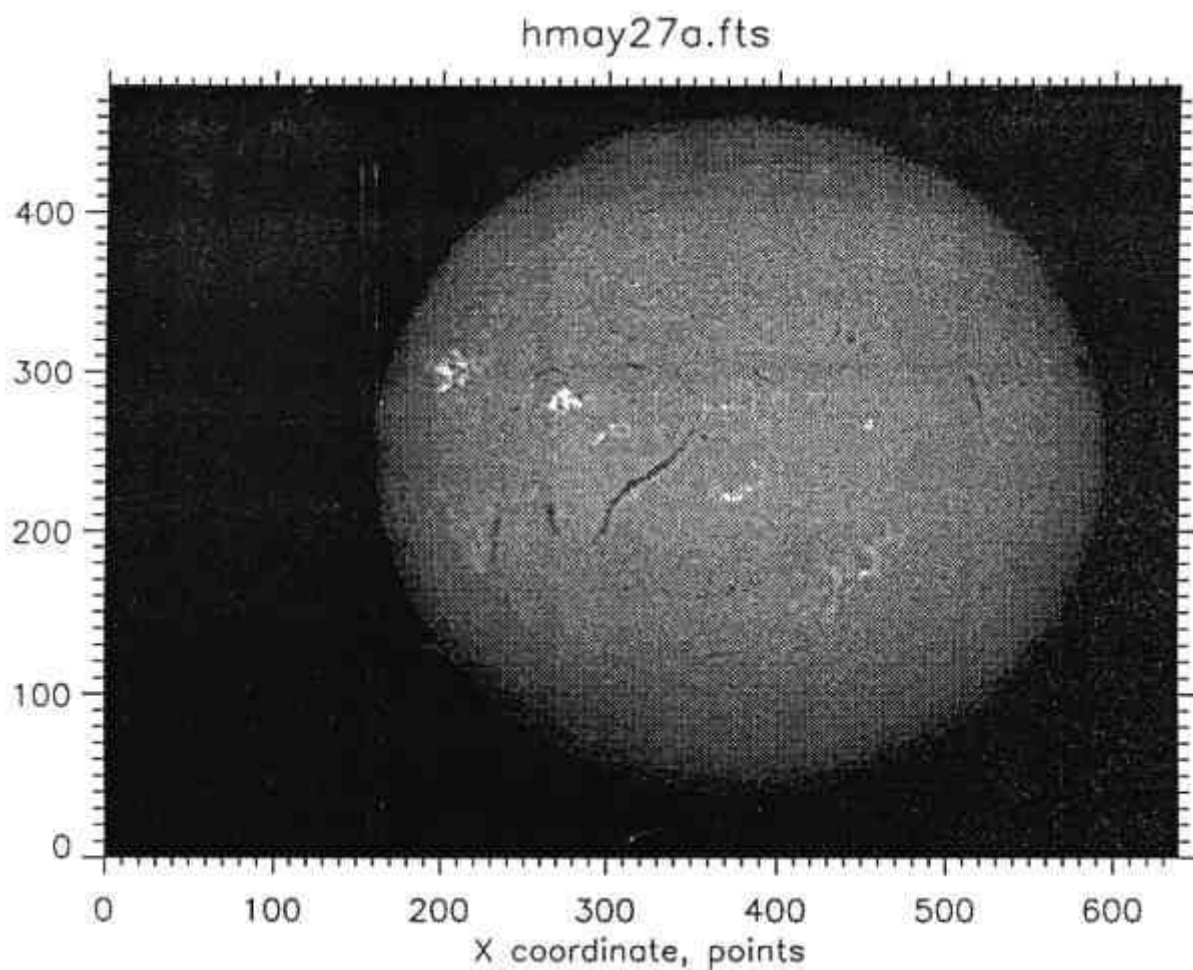
boja	relativna jakost zračenja	temperatura sjaja (K)
tamnozeleno	0,960-0,980	7488-7644
zelena	0,980-1,000	7644-7800
žuta	1,000-1,020	7800-7950

Dakle, za temperature šupljina nalazimo:

Ekvatorska koronina šupljina:	7800 K $\text{L}$ $T_{\text{L}}$ 8268 K
Sjeverna polarna koronina šupljina:	7644 K $\text{L}$ $T_{\text{L}}$ 7956 K
Južna polarna koronina šupljina:	7488 K $\text{L}$ $T_{\text{L}}$ 7956 K

Na slici 3. prikazan je izgled Sunca u Ha liniji, valne duljine 656,3 nm, snimljen na BBSO (Big Bear Solar Observatory) 27.05.1993. godine. Na toj slici uočavaju se aktivna - svjetla područja i tamna područja koja odgovaraju filamentima.

Usporedimo li sada sliku Sunca u mikrovalnom području i u Ha liniji, vidimo da bijela područja u Ha odgovaraju područjima s višom temperaturom sjaja. Tamna područja, filamenta se ne vide na mikrovalnoj slici zbog slabog razlučivanja osim velikog filameta koji se vidi kao NTP. Možemo približno odrediti temperaturu sjaja tog filameta.



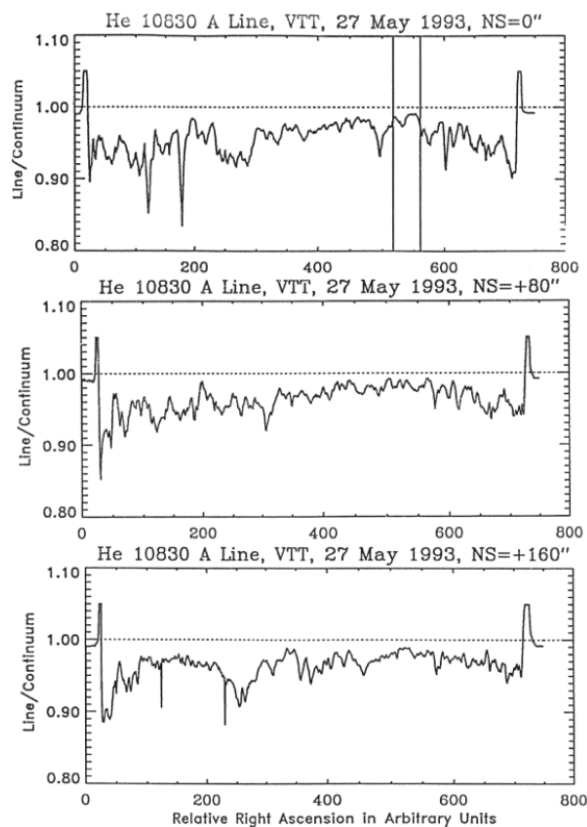
Slika 3. Sunce u H $\alpha$  liniji

boja	relativna jakost zračenja	temperatura sjaja (K)
tamnozeleno	0,960-0,980	7488-7644
zeleno	0,980-1,000	7644-7800

Temperatura filameta je 7488 K L TL 7800 K

## Mjerenja u bliskom infracrvenom dijelu spektra: HeI 1083 nm

Mjerenja jakosti bliske infracrvene apsorpcijske linije helija valne duljine 1083 nm obavljena su u Izani, Tenerife, u periodu od 24. do 30. svibnja 1993. god. Korišten je VTT, vakuumski teleskop u tornju, koji se sastoji od dvostruke zgrade opservatorija na čijem se vrhu nalazi celostat, dvije vakuumirane cijevi u kojima su teleskop i Echelle spektrograf. Duljina pukotine spektrografa iznosi  $80''$ . Jakost helijeve linije mjerena je pomoću CCD kamere, dvodimenzionalnog uređaja sitnih poluvodičkih detektora, gdje se razmjerno broju upadnih fotona skupljaju oslobođeni elektroni u potencijalni lonac pojedinog elementa slike (“pixel”=picture element). Na kraju osvjetljenja premješta se raspodjela naboja za pojedini red odgovarajućom, vremenski ovisnom promjenom potencijala i zapisuje pomoću računala. Sunce je premjeravano svake 4s uz vrijeme izlaganja od 1 s i usrednjavanjem od  $2 \times 2$  u CCD kameri ( $512 \times 512$  elemenata slike). Premjeravanja su obavljena u blizini Sunčeva ekvatora u smjeru istok - zapad na nebu i u polarnim područjima u smjeru istok - zapad na Suncu (slika 5.). Budući da se nebeski meridijan ne poklapa sa centralnim meridijanom na Sunčevom disku, potrebne su transformacije koje uzimaju u obzir pozicijski kut između Sunčeve osi i nebeskog meridijana za određeni dan.



Slika 5.

Glavni parametri mjerenja linije He 1083 nm su:

- Položaj rešetke: 3631 relativne jedinice
- Položaj CCD kamere:  $x = 35,2$  cm
- Širina pukotine spektrografa: 150 mm
- Duljina pukotine spektrografa:  $80''$
- Trajanje osvjetljenja: 1 s
- Spektralno razlučivanje:  $\Delta\lambda = 1,6$  pm
- Disperzija: 0,671 pm/elementu slike

Rezultati mjerenja su dani na slici 1. Prikazana su tri rezultata premjeravanja Sunca koji su obavljani 27.5.1993. godine sa VTT-om. Svaka točka na grafu predstavlja prikaz usrednjavanja izmjenjenog podatka duž spektrografske pukotine. Drugo i treće premjeravanje je pomaknuto za  $80''$ , odnosno za  $160''$  u smjeru sjevera. Za određivanje paralelnih smjerova na grafu po kojima su vršena premjeravanja koristit ćemo polumjer Sunca u stupnjevima ( $a \approx 15' = 900''$ ).

$1^\circ = 3600''$	$1 \text{ mdeg} = 3,6''$
$1'' = 0,28 \text{ mdeg}$	$80'' = 22,2 \text{ mdeg}$

Kutni polumjer od  $900''$ , tj. 252 mdeg, odgovara udaljenosti od 48 mm na rendgenskoj slici; nadalje,  $80''$ , tj. 22,2 mdeg odgovara udaljenosti od oko 4 mm, za koliko je pomaknuta os po kojoj je vršeno premjeravanje, na slici Sunca u rendgenskom području.

Na osi x je dana udaljenost na Suncu u relativnim jedinicama, dok je na osi y dan odnos linije i kontinuuma. Ravna crtkana linija na grafu je linija kontinuuma. Iz grafa uočavamo da je emisija izražena samo na rubovima Sunca gdje je veća od 1. Na Sunčevom disku nema emisije, uočavamo samo apsorpciju. Što je veći minimum veća je apsorpcija. Na prvom grafu u označenom (dvjema okomitim crtama) dijelu krivulja ima maksimum, što znači da je apsorpcija na tom dijelu najmanja. Vratimo se na sliku Sunca u rendgenskom području (slika 2), gdje je promjer Sunca 104 mm. S grafa očitavamo promjer na slici u liniji He: 130 mm. Proračunavanjem dobivamo da udaljenost iz grafa pomnožimo faktorom 0,8. Na isti način izračunavamo faktore za mikrovalno područje i  $H\alpha$  liniju i faktori, kojima moramo množiti vrijednosti očitane iz grafa da bi dobili udaljenosti na prikazanim slikama su:

za sliku Sunca u rendgenskom području: 0,8  
 za sliku Sunca u mikrovalnom području: 0,77  
 za sliku Sunca u  $H\alpha$  liniji: 0,74

Maksimum apsorpcije je na grafu u području 95 - 103 mm, što odgovara 76 - 82 mm na slici Sunca u rendgenskom području. Na tom mjestu uočavamo tamnije područje, koroninu šupljinu.

Na grafu uočavamo nekoliko minimuma.

Prvi minimum se nalazi na udaljenosti od oko 22 mm od ruba Sunca, što odgovara 17,6 mm na rendgenskoj slici; na tom mjestu uočavamo tamno područje. Jasnije se vidi na slici Sunca u  $H\alpha$  liniji, gdje je promjer Sunca 100 mm. Dakle, prvi minimum se nalazi na udaljenosti od 17 mm; na tom mjestu jasno se uočava filament.

Drugi minimum je na 32 mm, što odgovara udaljenosti od 26 mm u rendgenskom području; na tom mjestu nejasno se vidi zatamnjenje, a na udaljenosti od 25 mm na slici u  $H\alpha$  liniji jasno se uočava drugi filament.

Treći minimum je rastegnut, što može značiti da je premjeravanje vršeno uzduž filameta. Nalazi se na području od oko 42 do 53 mm. Na slici u  $H\alpha$  liniji ti iznosi su: 32 - 41 mm; na tom mjestu uočavamo veliki filament, uzduž kojega je vršeno premjeravanje.

Idući minimum je na udaljenosti 87 mm na grafu, što odgovara 67 mm na slici u  $H\alpha$  liniji; na tom mjestu jasno se uočava svjetla točka, koronina svjetla točka i u rendgenskom području ta udaljenost iznosi oko 70 mm; na tom mjestu također se jasno vidi koronina svjetla točka.

Minimum na udaljenosti 105 mm na grafu je na 81 mm na slici u Ha liniji i na tom mjestu ne uočavamo promjene, dok na 84 mm u rendgenskom području uočavamo svijetlo područje uz centralnu koroninu šupljinu.

Iduće premjeravanje je pomaknuto u smjeru sjevera za 80", što odgovara pomaku za 4 mm na slici Sunca u mikrovalnom području, rendgenskom području i u Ha liniji.

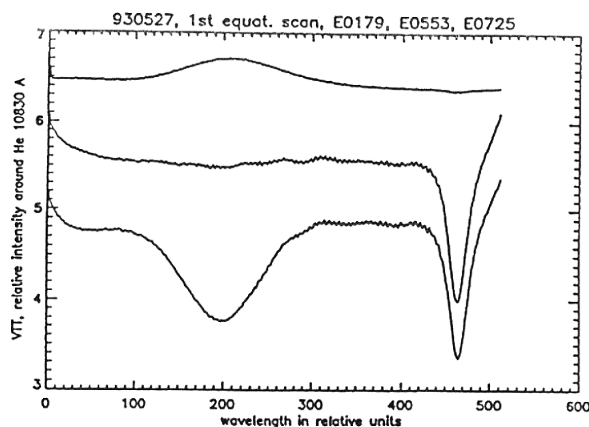
Na drugom grafu uočavamo minimume, koji odgovaraju prvom i drugom filamentu, koje smo spomenuli u prvom grafu. Iako ti filamenti ne leže na liniji ucrtanoj na slici, premjeravanja nisu vršena isključivo po liniji, nego po širem području na Suncu, oko navedene linije. Treći minimum na slici pomaknut je na desno, nalazi se na 52 mm, što odgovara 40 mm na slici u Ha liniji gdje je krajnji dio velikog filamenta. Minimumi koji se nalaze iza maksimuma, dakle iza koronine šupljine, odgovaraju svijetlim, aktivnim područjima.

Na trećem grafu uočavamo dvije uske linije minimuma, koje predstavljaju greške u mjerenjima. Prvi minimum na slici (oko 43 mm) odgovara svijetloj točki na slici u Ha liniji (oko 35 mm), i jasno uočljivoj svijetloj točki na slici u rendgenskom području (oko 34 mm). Na udaljenosti od 63 mm na grafu je idući minimum, na rendgenskoj slici (50 mm) je tu svjetlo područje, na slici u Ha liniji (48 mm) je također svijetlo područje. Na udaljenosti od oko 100 mm minimum na grafu se točno poklapa sa svijetlom koroninom točkom koja je vidljiva na oko 80 mm na slici Sunca u rendgenskom području.

## Interpretacija

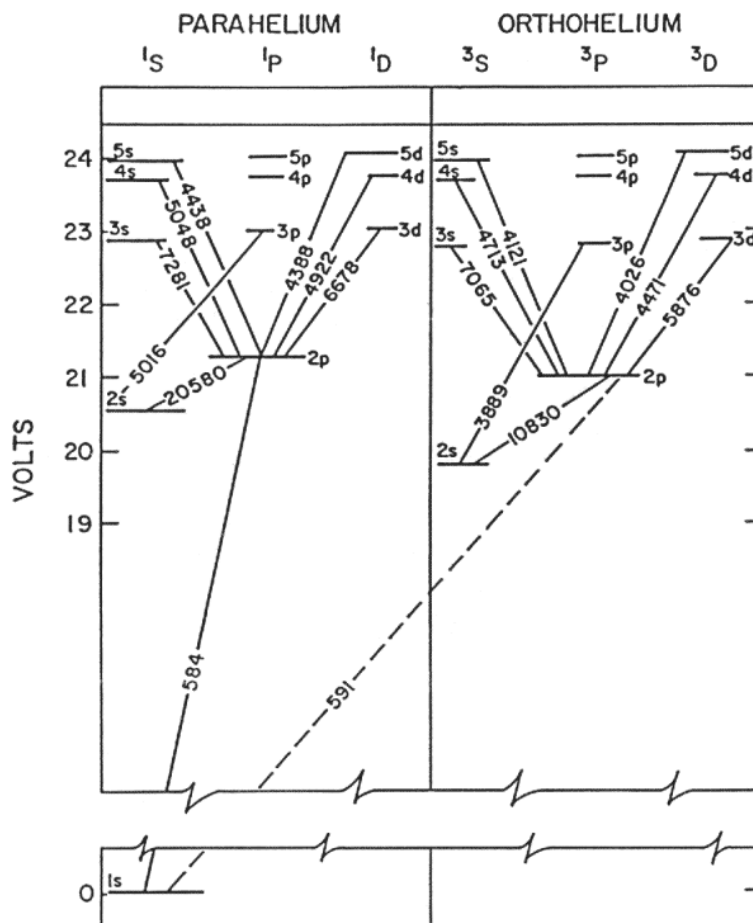
Koronine šupljine općenito se u mikrovalnom dijelu spektra pojavljuju kao područja niske temperature sjaja, ali mala pojačanja mikrovalnog zračenja iznad razine mirnog Sunca mogu biti opažena unutar takvih područja. Temperatura i gustoća snižene su u koroninim šupljinama, u odnosu na okolnu koronu, što dovodi do manje emisije mikrovalnog zračenja. Ipak, na kratkim valnim duljinama moguće je da slaba NTP budu nadjačana lokalnim radio zračenjem iz kromosfere, posebice u područjima fotosferskih ili kromosferskih baklji, ili jakih magnetskih polja. Stoga se uz zaključno zračenje, koje je glavni izvor mikrovalne emisije mirnog Sunca (to zračenje je manje u koroninim šupljinama) mogu pojaviti i drugi mehanizmi zračenja povezani s bakljama i magnetskim poljima unutar koroninim šupljina.

Linija He valne duljine 1083 nm vidljiva je u emisiji iznad Sunčeva ruba i u slaboj apsorpciji ili emisiji na Sunčevom disku (slika 4.). Ta apsorpcijska linija pojačana je u filamentima na Suncu i u aktivnim područjima, dok je uzduž filamentarnih kanala i u koroninim šupljinama prigušena. Nastaje između gornje kromosfere i donjeg prijelaznog područja, na visini 2000 km od fotosfere.



Slika 4.

He linija 1083 nm nalazi se na prijelazu između dva najniža metastabilna stanja ortohelija (slika 6.). Ta stanja ortohelija su energetski udaljena, a po zračenju odvojena od osnovnog stanja. Pobuđenje linije događa se uglavnom kao rekombinacija iz He II. He II je jednostruko ionizirani atom helija. Naseljenost kvaziosnovnog stanja linije (najniže stanje ortohelija) ovisi o okolnom zračenju kromosfere, donjeg prijelaznog područja i povratnom zračenju korone. Laboratorijske valne duljine triplet linije He 1083 nm su: 1083,0341 nm , 1083,0250 nm i 1082,9081 nm, gdje su prve dvije komponente tako bliske da se spajaju u jednu, glavnu liniju sa 8 puta većim intenzitetom od treće komponente, koja se pojavljuje kao satelitska linija, za 0,12 nm udaljena od glavne linije.



Slika 6.

Najniže metastabilno stanje ortohelija je razmjerno slabo naseljeno u fotosferi. Stoga se apsorpcija zbiva u kromosferskim područjima niže gustoće i više temperature. Helijeva apsorpcijska linija 1083 nm vrlo je plitka u koroninim šupljinama, budući da je naseljenost kvaziosnovnog stanja za apsorpciju djelomično ovisna i o povratnom zračenju iz korone, koje je smanjeno u koroninim šupljinama. Linijsko zračenje korone prodire natrag u nižu kromosferu, prouzrokujući dovoljnu ionizaciju helija da bi se naselilo niže stanje helijeve linije 1083 nm. To omogućuje apsorpciju fotosferskog kontinuiranog zračenja na valnoj duljini 1083 nm. Sve promatrane pojave opisane su sažeto u sljedećoj tablici:

pojava na Suncu	$\lambda=8\text{mm}$	He $\lambda=1083\text{nm}$	$\lambda=2\text{nm}$
H $\alpha$ filamenti	NTP	jaka apsorpcija	-
aktivna područja	VTP	jaka apsorpcija	emisija
koronine šupljine	NTP (VTP)	slaba apsorpcija	bez emisije