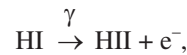


Mapiranje elektronske temperature i elektronske koncentracije centra Orion magline upotrebom spektroskopije integralnog polja

Određene su mape elektronske temperature T_e i elektronske koncentracije n_e u centru Orion magline. Korišćeni su podaci snimljeni metodom spektroskopije integralnog polja, instrumentom MUSE sa VLT-a, a T_e i n_e su računati iz odnosa intenziteta karakterističnih zabranjenih emisio-nih linija. Za dobijanje T_e u jednom slučaju korišćene su linije [NII], u drugom [SIII], dok su za dobijanje n_e u oba slučaja korišćene linije [SII]. Mape n_e se međusobno malo razlikuju, dok su kod mape T_e razlike uočljivije. Iz raspodela broja piksela po T_e očitavaju se dve različite dominantne temperature (temperature koje karakterišu najveći broj piksela): na mapi gde je korišćen [NII] dominantna T_e je ~ 9500 K, a na mapi gde je korišćen [SIII] dominantna T_e je ~ 8500 K. Ova razlika je očekivana, jer posmatrani sistem nije idealan, i ne ispunjava potpuno uslove pod kojim važe korišćene jednačine. Pre računanja T_e i n_e , intenziteti linija su korigovani za ekstinkciju poteklu od prašine iz magline i međuzvezdanog prostora. U regionima visoke ekstinkcije nije bilo moguće izmeriti intenzitete linija [NII] na 5755 Å i [SIII] na 6312 Å, a samim tim ni odrediti T_e i n_e . Da bi se odredilo koji je par linija bolje koristiti datom slučaju, urađene su mape pokrivenosti za [NII] i za [SIII] linije. Utvrđeno je da su u konkretnom slučaju linije [NII] imaju značajno veću pokrivenost, pa ih je efikasnije koristiti od linija [SIII] u delovima sa visokom ekstinkcijom pri određivanju T_e i n_e .

Uvod

HII regioni su oblasti jonizovane međuzvezdane materije u kojima se nalaze mlade zvezde spektralnih klasa O i B. Najvećim delom, HII regioni su sačinjeni od jonizovanog vodonika ($\sim 90\%$), po čemu su i dobili ime (Pimbert *et al.* 2017). Do jonizacije okolne sredine dolazi usled prisustva zračenja mladih zvezda u UV domenu, koje je dovoljno visokih energija da izvrši jonizaciju vodonikovih atoma u procesu:



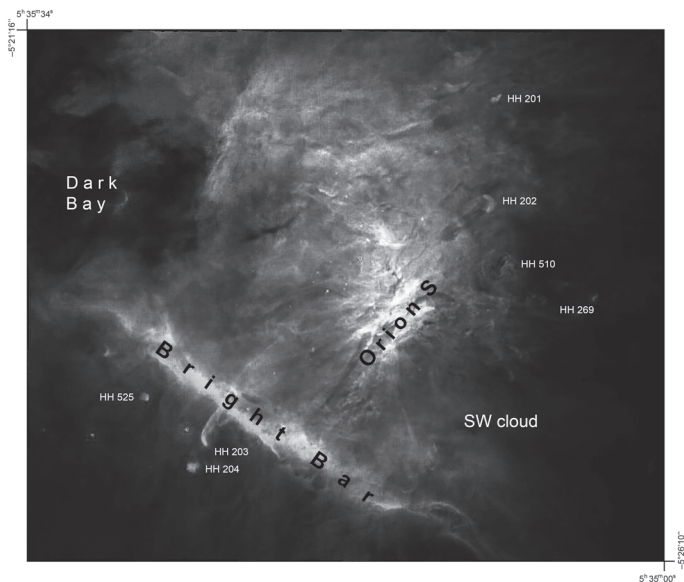
gde neutralni vodonik u interakciji sa jonizujućim fotonom prelazi u jonizovano stanje uz emisiju slobodnog elektrona. Zračenje zvezda, pored vodonika, jonizuje i druge prisutne atome (najčešće su prisutni He, N, O, S, C, Cl, Ar), pri čemu se mogu javiti i viša stanja jonizacije (SII, OIII, CIV). Jonizovana materija se prostire u regionima oko zvezda do neke granice, nakon koje je materija neutralna. Granica između jonizovane i neutralne sredine je nagla, jer broj jonizujućih fotona eksponencijalno opada sa brojem procesa jonizacije u maglini (Vukičević-Karabin i Atanacković 2010).

Izučavanje sastava i odlika HII regiona je značajno iz više razloga: Posmatranjem HII regiona, određuju se udaljenosti do galaksija u kojima se oni nalaze (Melnick *et al.* 1987), kao i njihov hemijski sastav (Smartt i Rolleston 1997). Pored toga, na osnovu sastava HII regiona, može se predvideti evolucija zvezda koje se u njima formiraju.

Pimbert i saradnici (Pimbert 2017) su 2014. godine posmatrali centar Orion magline (slika 1)

Luka Bulaja (2000), Žitište, Mladena Stojanovića 67, učenik 4. razreda Zrenjaninske gimnazije

MENTOR: Nikolina Milanović, Matematički fakultet Univerziteta u Beogradu



Slika 1. Strukture u centru Orion magline (adaptirano prema: Weilbacher *et al.* 2015). Sever je orjentisan ka gore, istok ka levo.

Figure 1. Structures at the central Orion Nebula (according to: Weilbacher *et al.* 2015). North is oriented upward, east is oriented leftward.

metodom spektroskopije integralnog polja (eng. Integral Field Spectroscopy, na dalje IFS). Iako su struktura i fizičke karakteristike Orion magline relativno poznati, postoji motivacija za daljim izučavanjem, jer pomenuti snimak ima daleko veću rezoluciju od svih do sada napravljenih IFS snimaka centra Orion magline. To daje mogućnost za nalaženje novih struktura u centru magline, kao i za davanje boljih procena fizičkih karakteristika njenog centra.

U referentnom radu (Weilbacher *et al.* 2015) opisana je obrada snimka i njegova analiza. Date su procene elektronske temperature i elektronske koncentracije, kao i procene zastupljenosti pojedinih elemenata u formi mapa površinske raspodele (u daljem tekstu samo mapa). U pomenutom radu, elektronska temperatura određivana je na dva načina: preko odnosa intenziteta zabranjenih linija NII jona i preko odnosa intenziteta zabranjenih linija SIII jona. Elektronska koncentracija određivana je takođe na dva načina: preko odnosa intenziteta zabranjenih linija SII jona i preko odnosa intenziteta zabranjenih linija CIII jona.

Cilj našeg rada je reprodukovanje mapa **elektronske temperature** određene: (1) preko odnosa intenziteta zabranjenih linija NII jona i (2) preko odnosa intenziteta zabranjenih linija SIII jona, i mapa **elektronske koncentracije** dobijene preko odnosa intenziteta zabranjenih linija SII jona. Pored toga, u ovom radu poredena

je pokrivenost (procenat piksela koji imaju utvrđenu elektronsku temperaturu u polju 10×10 piksela) mapa elektronske temperature dobijenih na oba načina. Time je ustanovljeno koji je odnos linija bolje koristiti za dobijanje elektronske temperature u konkretnom slučaju.

Teorijske osnove

Spektar HII regiona je pretežno linijski. Javljuju se dve vrste emisionih linija: rekombinacione (pr. Balmerove linije vodonika) i sudarno ekscitovane (uglavnom zabranjene) linije kao što su [SII], [SIII], [OII], [OIII], [NII] (uglaste zagrade označavaju da je reč o zabranjenim linijama). U spektru fotojonizovanih maglina, pored spektralnih linija, moguće je uočiti i slab kontinuum u infracrvenom i optičkom domenu, koji delom nastaje usled procesa rekombinacije, a delom usled rasejanja zračenja zvezda na prašini i termalnog zračenja prašine (Osterbrock i Ferland 2006). U daljem tekstu sledi opis mehanizma nastanka linija.

Slobodni elektroni nastali u procesima jonizacije imaju određenu kinetičku energiju na osnovu koje se kreću kroz maglinu. U maglini može doći do pojave da neki jon zahvati elektron, čime elektron prelazi iz slobodnog u vezano stanje (slobodno-vezani prelaz, eng. free-bound). Ovaj proces se naziva rekombinacija. Pri zahvatu slobodnog elektrona oslobađa se energija u vidu

fotona. Kako elektron pre zahvata može imati proizvoljnu kinetičku energiju, fotoni koji nastaju ovim procesom čine kontinuum. Međutim, elektron uglavnom biva zahvaćen na neki viši nivo u jonu, odakle se kaskadnim prelazima spušta na niže energetske nivoe (vezano-vezani prelazi, eng. bound-bound). Pri kaskadnim prelazima elektron emituje fotone čija je energija jednaka razlici energije višeg i nižeg energetskog nivoa. Pošto su energetska stanja elektrona u atomu kvantovana, elektron može imati samo diskretne vrednosti energije. Samim tim se pri kaskadnim prelazima emituju fotoni tačno određenih energija, pa tako nastaju rekombinacione linije.

Pored linija koje potiču iz rekombinacionog procesa, u spektrima maglina su uočljive i linije nastale u sudarnim procesima koje najčešće predstavljaju takozvane zabranjene linije. Pri sudarnoj ekscitaciji jona sa slobodnim elektronom, moguće je da elektron u tom jonu pređe na metastabilni nivo na koji ne može preći radijativnim procesima, jer bi se time prekršila selekciona pravila (Vukićević-Karabin i Atanacković 2010). Ukoliko bi se jon radijativno deekscitovao, takođe bi došlo do kršenja selekcionih pravila, što znači da je mala verovatnoća radijativne deekscitacije. To možemo videti i iz činjenice da je vreme života jona u metastabilnom stanju $\sim 10^2$ s, što je značajno duže od vremena života jona u ekscitovanom stanju ($\sim 10^{-8}$ s; Vukićević-Karabin i Atanacković 2010). U slučaju gustih sredina, radijativna deekscitacija jona iz metastabilnog stanja se uglavnom ne dešava, jer je prosečno vreme između dva sudara kraće od života jona u metastabilnom stanju, pa je sudarna deekscitacija verovatnija. Međutim, u slučaju maglina, koje su retke sredine, prosečno vreme između dva sudara je $\sim 10^6$ s (Vukićević-Karabin i Atanacković 2010), tako da joni uspevaju radijativno da se deekscituju, zbog čega nastaju zabranjene linije.

Intenzitet spektralne linije proporcionalan je koncentraciji emitera (jona), a koncentracija emitera zavisi od fizičkih uslova u sredini, kao što su elektronska temperatura i elektronska koncentracija. Zbog zavisnosti koncentracije jona od intenziteta njihovih zabranjenih linija, odnosi intenziteta zabranjenih linija raznih jona mogu se koristiti za određivanje fizičkih karakteristika magline.

Procena elektronske temperature i koncentracije

Elektronska temperatura se može odrediti iz odnosa intenziteta linija jednog jona koje kreću sa različitih gornjih energetskih nivoa, a završavaju na osnovni, čije se ekscitacione energije značajno razlikuju, pa odnos intenziteta takvih linija ima veliku osetljivost na elektronsku temperaturu. U ovom radu su za određivanje elektronske temperature u jednom slučaju korišćene linije [NII], a u drugom slučaju linije [SIII]. Ove linije su izabrane jer su najizraženije u spektru. Jednačine za odnose intenziteta su (Osterbrock i Ferland 2006):

$$[\text{NII}]: \frac{I_{\lambda 6548} + I_{\lambda 6583}}{I_{\lambda 7555}} = \frac{8.23 \exp\left(2.5 \cdot 10^4 \frac{1}{T_e}\right)}{1 + 4.4 \cdot 10^{-3} n_e \frac{1}{\sqrt{T_e}}} \quad (1)$$

$$[\text{SIII}]: \frac{I_{\lambda 9069}}{I_{\lambda 6312}} = \frac{5.44 \exp\left(2.28 \cdot 10^4 \frac{1}{T_e}\right)}{1 + 3.5 \cdot 10^{-4} n_e \frac{1}{\sqrt{T_e}}} \quad (2)$$

gde je $I_{\lambda\lambda}$ intenzitet zračenja na talasnoj dužini λ (ovde datoj u angstromima).

Elektronska koncentracija može biti određena iz odnosa intenziteta linija koje kreću sa bliskih gornjih elektronskih nivoa, a završavaju na osnovnom, pa im se energija ekscitacije ne razlikuje mnogo. Zbog toga je odnos tih linija osetljiv na elektronsku koncentraciju. U ovom radu korišćen je odnos intenziteta [SII] linija za određivanje elektronske koncentracije (Osterbrock i Ferland 2006):

$$[\text{SII}]: \frac{I_{\lambda 6176}}{I_{\lambda 6731}} = \frac{n_e}{\sqrt{T_e}} \quad (3)$$

Rešavanje sistema jednačina (1) i (3), odnosno (2) i (3), po T_e i n_e , vrši se iterativno. Pretpostavi se neka inicijalna elektronska temperatura. Iz početne vrednosti elektronske temperature, izračunava se inicijalna elektronska koncentracija izrazom (3). Vrednost inicijalne elektronske koncentracije se ubaci u izraz (1), odnosno (2), koji se jedino numerički može rešiti. Kao rešenje dobija se korigovana elektronska temperatura. Ovaj postupak se ponavlja dok niz dobijenih

elektronskih koncentracija i elektronskih temperatura ne iskonvergira.

Treba imati u vidu da se za računanje elektronske temperature, odnosno elektronske koncentracije, moraju koristiti jednačine u koje ulaze odnosi linija osetljivi na elektronsku temperaturu, odnosno elektronsku koncentraciju. Ukoliko bi se, na primer, za računanje elektronske koncentracije koristila jednačina (1), dobili bismo veliku neodređenost elektronske koncentracije. Do toga bi došlo jer je odnos linija iz (1), slabo zavisian od elektronske koncentracije (što se može videti iz parcijalnog izvoda odnosa intenziteta linija po elektronskoj koncentraciji), pa bi mala neodređenost u merenju odnosa, dovela do velike neodređenosti elektronske koncentracije. Jednačina (1) je pogodna za računanje elektronske temperature, jer je odnos intenziteta linija iz (1) jako zavisian od elektronske temperature (što se može videti iz parcijalnog izvoda odnosa linija po elektronskoj temperaturi), pa bi se mala neodređenost odnosa linija preslikala u malu neodređenost elektronske temperature.

Ekstinkcija

Pri prolasku zračenja poteklog iz magline kroz međuzvezdanu sredinu, dolazi do slabljenja (ekstinkcije) zračenja. To uzrokuje promenu inteziteta spektralnih linija koje se koriste za dobijanje elektronske temperature i elektronske koncentracije, pa treba izvršiti korekciju za

ekstinkciju. Polazi se od jednačine (Cardelli 1989):

$$I_{\lambda}^0 = I_{\lambda}^m e^{aS_{\lambda}},$$

gde I_{λ}^0 očekivani intenzitet linije na talasnoj dužini λ , I_{λ}^m mereni intenzitet linije na istoj talasnoj dužini, a konstanta normalizacije ekstinkcione krive, S_{λ} vrednost ekstinkcione krive na talasnoj dužini λ (preuzeto iz Cardelli 1989). Treba imati u vidu da je $S_{\lambda} = S(\lambda, R)$, gde je R totalna ekstinkcija i ona za Orionovu maglinu iznosi 5.5 (Cardelli 1989). Pri korigovanju ekstinkcije, cilj je odrediti I_{λ}^0 na osnovu I_{λ}^m i a .

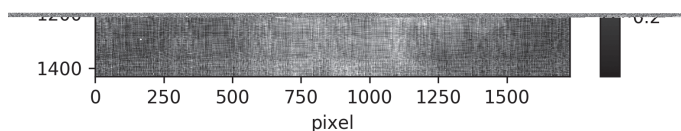
Za kvantifikovanje ekstinkcije koristi se parametar $c_{H\beta}$ (Blagrove *et al.* 2007), koji raste sa porastom ekstinkcije: $c_{H\beta} = aS_{H\beta} \log_{10} e$. $H\beta$ je druga linija vodonika u Balmerovoj seriji (prelaz sa četvrtog na drugi nivo). Odgovara talasnoj dužini od 4861 angstroma. Suštinski, parametar $c_{H\beta}$ opisuje kako se intenzitet te linije menja od očekivanog. Na slici 2 data je mapa parametra $c_{H\beta}$.

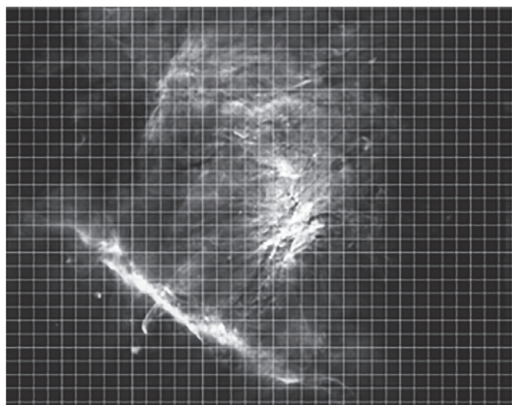
Podaci

Spektri Orionove magline dostupni su na MUSE Science sajtu (<http://muse-vlt.eu/science/m42/>). Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE) je instrument koji vrši snimanje IFS metodom i koji se nalazi na Very Large Telescope-u u Čileu. IFS metod omogućava da se vidno polje podeli na mnogo manjih oblasti (slika 3) čiji se spektar snima, što kasnije omogućava dobijanje mape fizičkih karakteristika magline.

Slika 2. Mapa parametra $c_{H\beta}$

Figure 2. The $c_{H\beta}$ parametar map





Slika 3. Ilustracija IFS metode (Weilbacher *et al.* 2015)

Figure 3. Illustration of the IFS method (Weilbacher *et al.* 2015)

Podaci koji su korišćeni obuhvataju Hajgensov region u Orionovoj maglini, jer je zračenje u ovom delu najintenzivnije, pa je pogodan za analiziranje. Vidno polje je dimenzija $5.9' \times 4.9'$. Snimljeno je IFS polje sa centrom na rektascenziji $\alpha = 5^{\text{h}}35^{\text{m}}17^{\text{s}}$ i deklinaciji $\delta = -5^{\circ}23'43''$. Spektar je snimljen u opsegu od 4595.25 do 9366.05 angstroma sa korakom od 1.25 angstroma. Prostorna rezolucija snimka je $0.2''$.

Podaci koji su preuzeti već su imali izvršene bias, flat i baricentričku korekciju. Telurska korekcija nije bila izvršena, te su izbegavane spektralne linije kod kojih može da se javi kontaminacija telurskim linijama.

Metod

Detekcija linija

Za određivanje elektronske temperature i koncentracije, treba naći intenzitete odgovarajućih spektralnih linija. Intenziteti spektralnih linija mereni su fitovanjem Gausove funkcije na profil spektralne linije. Kao izlazni parametri fitovane funkcije dobijaju se maksimalni intenzitet linije, talasna dužina maksimuma intenziteta merene linije i neodređenosti za obe prethodne veličine. Gausova funkcija izabrana je po uzoru na rad Weilbacher *et al.* (2015).

Pored standardnog gausijana u referentnom radu (Weilbacher *et al.* 2015) je za fitovanje ko-

rišćena i asimetrična Gausova funkcija. Fitovanje asimetričnim gausijanom sastoji se od fitovanja dvema Gausovim funkcijama koje se nadovezuju jedna na drugu u maksimumu. Iako se grafičkim poređenjem moglo zaključiti da je fit asimetrične Gausove funkcije bolji od fita Gausove funkcije, u značajnom broju slučajeva izlazni parametri asimetrične Gausove funkcije imali su relativnu grešku mnogo veću od 100%, dok fitovanje standardnim gausijanom daje relativnu grešku uglavnom manju od 5%.

Za potrebe analize spektara i izrade mapa, napisan je kod u programskom jeziku Python 2, a za rad sa podacima korišćena je biblioteka koju sugeriše tim koji je objavio podatke – MPDAF (MUSE Python Data Analysis Framework; <https://mpdaf.readthedocs.io>).

Maskiranje zvezda

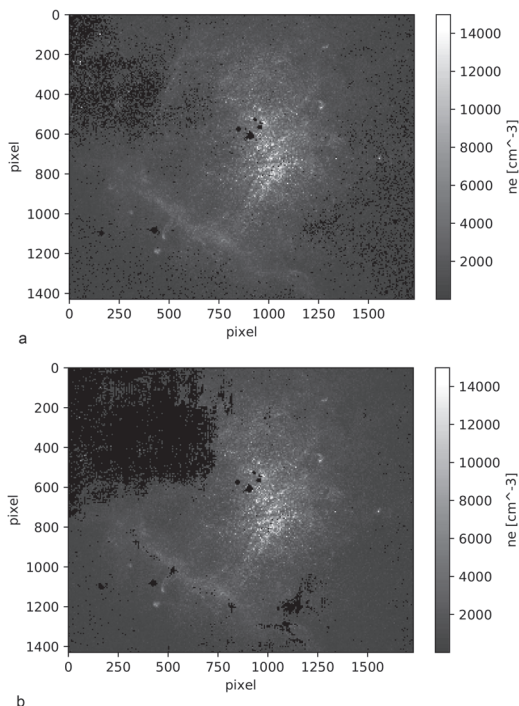
Zračenje zvezda je mnogo većeg intenziteta od zračenja jonizovane sredine, pa su spektri koji se snimaju u bliskoj okolini zvezda potpuno kontaminirani zračenjem zvezda, te nije moguće izmeriti spektralne linije same magline. Stoga je napravljena maska koja prekriva piksele kontaminirane zračenjem zvezda, i na njima nisu računati T_e i n_e . Kriterijum za maskiranje nekog piksela bio je da srednji intenzitet zračenja datog piksela bude veći od $5 \cdot 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$, jer je procenjeno da toliko iznosi srednji intenzitet zračenja u spektru. Dalja okolina zvezde nije maskirana, jer intenzitet zračenja eksponencijalno opada sa udaljenošću od zvezde, pa se i kontaminacija spektra naglo smanjuje.

U slučaju najsjajnijih zvezda (θ^2 A Ori i θ^1 C Ori) javljaju se i artefakti u obliku krsta koji potiču od difrakcije, sa centrom u centru snimljenog lika zvezde (na engl. diffraction spikes). Korišćeni kriterijum za maskiranje zvezda bio je dovoljan za maskiranje i tih artefakata.

Rezultati i diskusija

Mape elektronske temperature i koncentracije

Kako bismo dobili mape elektronske temperature i koncentracije, sistemi jednačina (3) i (1), odnosno (3) i (2), rešavani su iterativno, upotrebom PyNeb biblioteke. Na slici 4 su prikazane

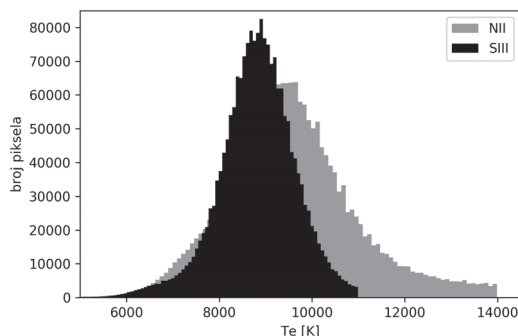


Slika 4. Mape elektronske temperature centra Orion magline dobijena preko [NII] linija (a) i [SIII] linija (b). Potpuno crne oblasti na mapama označavaju mesta gde nije bilo moguće izračunati T_e .

Figure 4. Electron temperature maps of central Orion nebula derived using [NII] lines (a) and [SIII] lines (b). Totally black areas represent regions where it was not possible to derive T_e .

mape elektronske temperature koje su dobijene preko [NII] linija (a) i [SIII] linija (b). Na mestima gde su potpuno crni pikseli, nije bilo moguće izračunati elektronsku temperaturu. U svrhu bolje vizuelizacije, programski kod koji je nalazio mape je crnim pikselima dodeljivao usrednjenu vrednost temperature susednih piksela (ova procedura vršena je samo kod prikazanih mapa, za dalju analizu korišćene su prvobitne mape). Time su se otklonile manje grupe belih piksela, a veće su ostale uočljive. Isto je urađeno i pri izradi mapa elektronske koncentracije.

Mapa elektronske temperature dobijena upotrebom [NII] linija (slika 4a), kao najtopliji region prikazuje Trapezium klaster i centar regiona Orion-S sa elektronskom temperaturom od oko 13000 K. Najhladniji region je oblast ispod



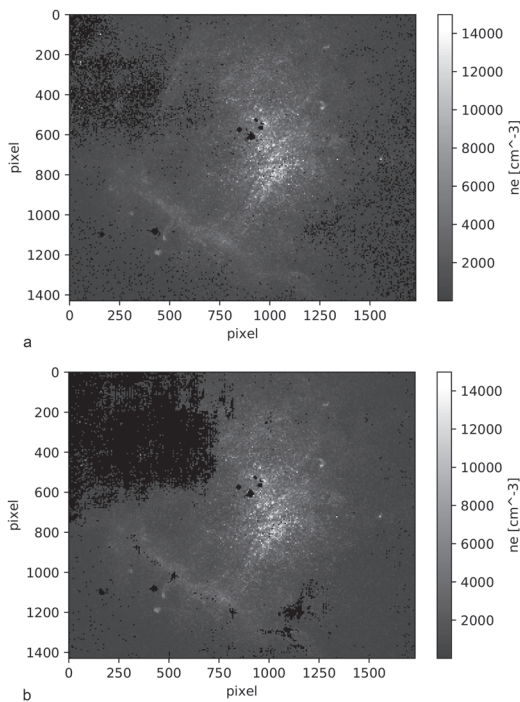
Slika 5. Raspodela broja piksela po elektronskoj temperaturi za [NII] i [SIII] linije.

Figure 5. Distribution of number of pixels per electrons' temperature derived using [NII] and [SIII] lines.

Bright Bar-a sa elektronskom temperaturom od oko 7000 K. Uočava se da je prosečna temperatura cele magline oko 9500 K. Mapa elektronske temperature dobijena upotrebom [SIII] linija (slika 4b), kao najtopliji region prikazuje širu okolinu regiona Orion-S, Trapezium klaster i region iznad njega sa elektronskom temperaturom od oko 10000 K. Najhladniji region je oblast ispod Bright Bar-a sa elektronskom temperaturom od oko 6000 K. Prosečna temperatura izmerenog dela je oko 8500 K.

Na slici 5 uočljiva je razlika u prosečnim temperaturama i širinama raspodela za [NII] i [SIII] linije. Nije utvrđeno zašto do toga dolazi. Uočava se da su najniže merene temperature oko 5500 K, što odgovara graničnoj temperaturi nastanka jonizovane sredine (Osterbrock i Ferland 2006). Obe raspodele su pozitivno asimetrične – do toga dolazi usled pogrešnog fitovanja spektralnih linija koje se koriste za određivanje elektronske temperature, usled čega se dobija veća vrednost od realne, pa imamo više piksela na visokim temperaturama nego što ih zapravo jeste. U najvećem broju slučajeva, pogrešno se izmeri intenzitet linija [NII] $\lambda 5755$ i [SIII] $\lambda 6312$, jer te linije imaju daleko slabiji intenzitet od ostalih linija koje se koriste za određivanje elektronske temperature.

Oblast sa najvećom elektronskom koncentracijom je u oba slučaja centar regiona Orion-S i klaster Trapezium sa koncentracijom od oko



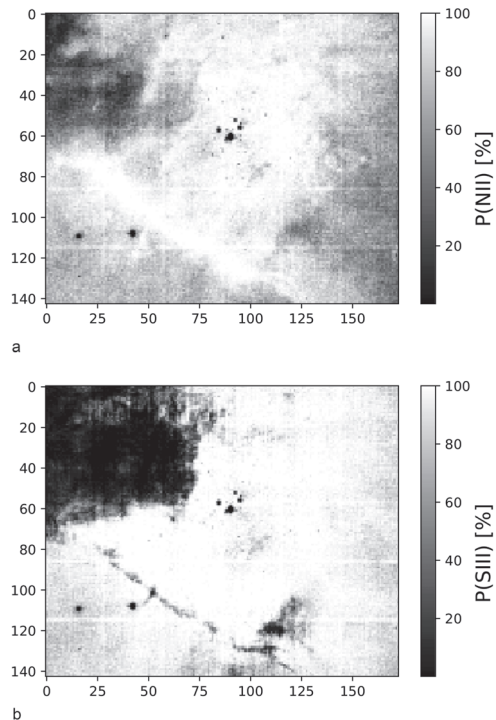
Slika 6. Mape elektronskih koncentracija centra Orion magline. Za mapu (a) u iterativnoj šemi su korišćeni izrazi (1) i (3), a za mapu (b) izrazi (2) i (3). Potpuno crne oblasti na mapama označavaju mesta gde nije bilo moguće izračunati n_e .

Figure 6. Electron density maps of central Orion nebula. (a) is map derived using iterative scheme with equations (1) and (3), (b) is map derived using iterative scheme with equations (2) and (3). Totally black areas represent regions where it was not possible to derive n_e .

13000 cm^{-3} . Region sa najmanjom koncentracijom (oko 2000 cm^{-3}) je oblast ispod Bright Bar-a i zapadno (desno) od regiona Orion-S (slika 6). Utvrđeno je da nema značajnih razlika elektronske koncentracije pri upotrebi različitih parova linija.

Pokrivenost [NII] i [SIII]

Nezavisno od izbora linija za određivanje elektronske temperature, javlja se više od 20% crnih piksela. Na mestima crnih piksela elektronska temperatura nije izračunata, jer spektralna linija nije mogla biti detektovana i izmerena. U radu (Weilbacher *et al.* 2015), pored izrade



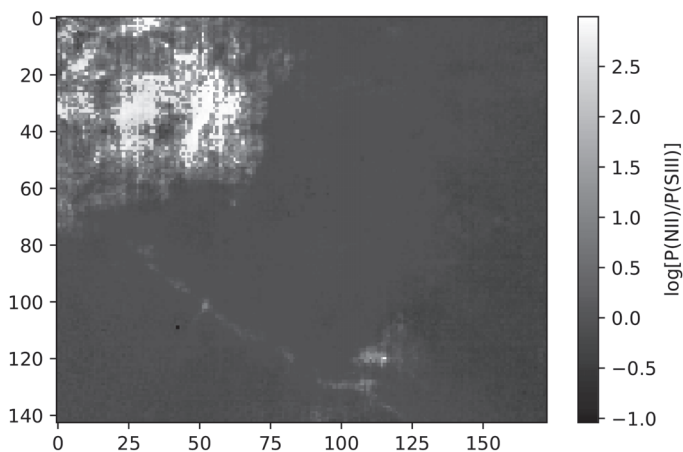
Slika 8. Mapa pokrivenosti: a) mapa pokrivenosti za [NII] linije, b) mapa pokrivenosti za [SIII] linije.

Figure 8. Coverage maps: a) [NII] lines, b) [SIII] lines.

mapa elektronske temperature za različite parove linija, nije diskutovano da li postoje pikseli za koje nije mogla biti određena elektronska temperatura i koncentracija i koliko ih ima. Stoga su izrađene mape pokrivenosti za [NII] linije (PNII) i [SIII] linije (PSIII) (slika 8).

Dark Bay region ima malu pokrivenost u oba slučaja, jer velika količina prašine (vidi se iz c_{HB} parametra – slika 2) apsorbuje skoro sve zračenje, pa su samim time intenziteti linija u nivou slabog kontinuuma i linije ne mogu biti detektovane. Smanjena pokrivenost se može uočiti i u regionima ispod Bright Bar-a i desno od SW Cloud-a. Na mestima maskiranih zvezda, pokrivenost je 0% zbog toga što na tim mestima elektronska temperatura i koncentracija nisu računane.

Pri visokoj ekstinkciji, zbog niskog intenziteta spektralne linije dolazi do fitovanja Gau-



Slika 8. Mapa odnosa pokrivenosti [NII] linija i [SIII] linija

Figure 8. Map of coverage ratio of [NII] lines and [SIII] lines

sove funkcije uz veliku grešku, pa se i intenzitet spektralne linije određuje uz veliku grešku. Zbog toga, postoji korelacija mapa pokrivenosti i mapa relativnih grešaka za intenzitet spektralne linije odgovarajućeg jona.

Sa slike 6 uočava se da su crni pikseli raspoređeni po celoj mapi pri upotrebi [NII] linija. U slučaju upotrebe [SIII] linija gustina crnih piksela je veća u oblastima koje imaju veću ekstinkciju (slika 2). Slika 8 prikazuje mapu odnosa pokrivenosti za [NII] linije i [SIII] linije. Sa te slike se vidi da je u Dark Bay regionu pokrivenost $P(\text{NII})$ oko 800 puta veća od pokrivenosti $P(\text{SIII})$, a u Bright Bar-u i SW Cloud-u oko 100 puta. Pokrivenost $P(\text{SIII})$ je veća oko 10 puta od $P(\text{NII})$ u regionu zapadno od SW Cloud-a i regiona Orion-S. U proseku, pokrivenost $P(\text{NII})$ je oko 230 puta bila veća od $P(\text{SIII})$.

Zaključak

U ovom radu su za utvrđivanje fizičkih svojstava centra Orion magline korišćeni odnosi intenziteta zabranjenih linija koji su prethodno korigovani na uticaj ekstinkcije međuzvezdanom prašinom. Korišćenim metodom dobijena su dva para mapa elektronskih temperatura i elektronskih koncentracija (par mapa dobijen iz para linija [NII] i [SII] i par mapa dobijen iz para linija [SIII] i [SII]). Mape elektronske temperature se značajno razlikuju, dok kod mapa elektronske koncentracije nema značajnih razlika. Dobijeni rezultati su u skladu sa rezultatima ranijih radova koji su se bavili mapiranjem centra

Orion magline (Weilbacher *et al.* 2015). Pored toga, urađene su mape pokrivenosti za [NII] linije i [SIII] linije, jer u oba slučaja, na više od 20% mape, nije bilo moguće izmeriti intenzitete odgovarajućih linija zbog visoke ekstinkcije. Zaključeno je da je za centar Orion magline, u regionima sa visokom ekstinkcijom bolje koristiti [NII] linije, jer daju i do 800 puta veću pokrivenost od [SIII] linija (u proseku 200 puta).

Zahvalnost. Autor se zahvaljuje mentoru, Nikolini Milanović za pomoć u izradi projekta i Lazaru Živadinoviću za pomoć pri optimizaciji koda.

Literatura

- Blagrove K. P. M. 2007. Deviations from He I case B recombination theory and extinction corrections in the Orion nebula. *The Astrophysical Journal*, **655**: 229.
- Cardelli J. 1989. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. *The Astrophysical Journal*, **345**: 245.
- <https://mpdaf.readthedocs.io/en/latest/start.html>
- <http://muse-vlt.eu/science/m42/>
- Melnick J., Terlevich R., Moles M. 1987. Giant H II regions as distance indicators. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, **14**: 158.
- Osterbrock D., Ferland G. 2006. *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*. Sausalito: University Science Books

Pimbert M. 2017. Nebular Spectroscopy: A Guide on HII Regions and Planetary Nebulae. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **129** (978): 082001.

Vukićević-Karabin M, Atanacković O. 2010. *Opšta astrofizika*. Beograd: Zavod za udžbenike

Weilbacher P. M., Monreal-Ibero A., Kollatschny W., Ginsburg A., Mcleod A. F., et al. 2015. A MUSE map of the central Orion Nebula (M 42). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01238614/document>.

Luka Bulaja

The Mapping of Electron Temperature and Density of Central Orion Nebula Using Integral Field Spectroscopy

In this paper the maps of electron temperature T_e and electron concentration n_e in the center of the Orion Nebula were made. The data used was recorded with the MUSE instrument from VLT. When shooting, the field of view was divided into a pixel network (integral field spectroscopy) and the spectrum of each pixel was recorded in the domain from a near ultraviolet to the infrared region of the spectrum.

In order to obtain T_e and n_e , the lines of two different ions are used, whereas the ratio of the intensity of the line of one ion is more sensitive to T_e , and the other to n_e . Since the equations for line intensity relations for these two ions are cou-

pled, T_e and n_e are obtained by the iterative solving of these equations. In one case, the [NII] lines (more sensitive to T_e) and [SII] (sensitized to n_e) were used, and in the other, the [SIII] lines (more sensitive to T_e) and [SII]. Two maps of T_e and n_e were determined by that. On all maps, the familiar structures visible in the center of the nebula (e.g. Dark Bay, Light Bar) are noticed. Maps of n_e differ slightly, while the maps of T_e have more prominent differences.

For both maps, the distribution (histogram) of the number of pixels per T_e was plotted. The histograms are slightly shifted in relation to each other, therefore two different dominant temperatures (temperatures with the largest number of pixels) are read. On the map where the [NII] pair was used, dominant T_e is ~ 9500 K, and on the map where the [SIII] pair is used, dominant T_e is ~ 8500 K. This difference was expected because the observed system is not ideal and does not fulfill the full conditions under which the equations were used.

All measured intensities of the lines were, prior to calculating T_e and n_e , corrected for the extinction of dust within the nebula. In high extinction regions, it was not possible to measure the intensities of the [NII] $\lambda 5755$ and [SIII] $\lambda 6312$ lines, and therefore calculate T_e and n_e . In order to determine which combination of ions is more effective in determining T_e and n_e in high extinction regions, maps of coverage for both temperature maps were made. By comparing the coverage of these two maps, it was found that in this case, the [NII] lines are more efficient than the [SIII] lines in high extinction areas, giving up to 800 times more coverage. 