

## Promatranje gustog molekularnog plina u asimetričnoj galaksiji NGC 2276

NOA VIDOVIC<sup>1</sup> AND MENTOR: DR. SC. NEVEN TOMIČIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet,  
Sveučilište u Zagrebu, Bijenička cesta 32, 10000 Zagreb*

### Sažetak

Obližnja asimetrična spiralna galaksija NGC 2276 pripada malenoj grupi kojom dominira eliptična galaksija NGC 2300. NGC 2276 je odličan galaktički laboratorij jer snažno interagira s međugalaktičkim plinom i sa susjednom galaksijom NGC 2300. Prijasna su istraživanja utvrdila da NGC 2276 ima veliku varijaciju u stopi formiranja zvijezda (SFR) i efikasnosti formiranja zvijezda (SFE = SFR/ $M_{plin}$ ) po svom disku, no nije još poznato točno zašto. U ovom istraživanju korištena su NOEMA i IRAM 30m promatranja emisijskih linija HCN (1-0), HCO<sup>+</sup> (1-0) i HNC (1-0) da bi se ustanovila količina gustog molekularnog plina prisutnog u NGC 2276 s ciljem da se izmjeri SFE<sub>dense</sub> i ovisnost SFR o udjelu gусте frakcije u molekularnom plinu  $f_{dense}$ . Šum u promatranju bio je previšok da bi se precizno izmjerila prostorna distribucija gustog molekularnog plina u disku galaksije, te su detekcije visoke sigurnosti prisutne jedino u centru galaksije. Detektirana je jedna nakupina gustog molekularnog plina u HCO<sup>+</sup> izvan centra galaksije na lokaciji gdje se očekivalo detektirati snažan signal zbog prethodno poznate prisutnosti rijetkog molekularnog plina (CO), no ta nakupina nije vidljiva u HCN i HNC emisiji. Daljnja su istraživanja potrebna da bi se ustanovilo kako gusti molekularni plin utječe na formiranje zvijezda u NGC 2276.

### 1. UVOD

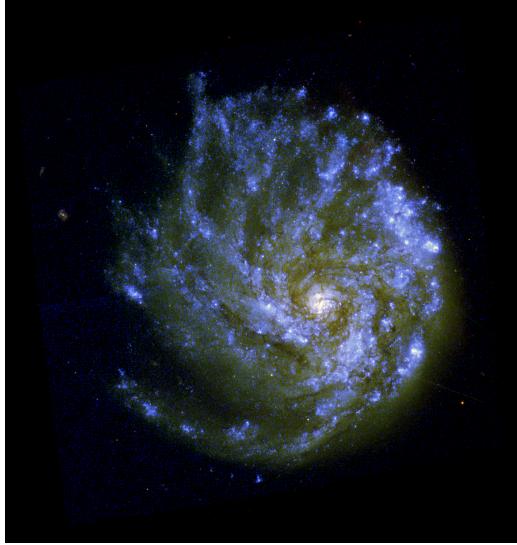
Formiranje zvijezda (eng. *star formation*, SF) ključan je proces u evoluciji galaksija, utječući i na njihovu zvjezdanu populaciju i na svojstva njihovog međuzvjezdanog medija (eng. *interstellar medium*, ISM). Stopa stvaranja zvijezda (eng. *star formation rate*, SFR; Kennicutt (1998)) ovisi o fizikalnim uvjetima unutar i van galaksija, te je jedna od ključnih mjerljivih fizikalnih veličina u galaksija. Najčešće se mjeri iz UV i optičke emisije sa mladih zvijezda, ili pomoću emisije ioniziranog plina oko mladih zvijezda, ili iz infra-crvene emisije sa vruće prašine koja okružuje mlade zvijezde.

Zvijezde se formiraju kroz gravitacijski kolaps molekularnih oblaka plina. Omjer stope stvaranja zvijezda (SFR) s količinom molekularnog plina nam je stoga ključna fizikalna veličina u astrofizici galaksija te se naziva efikasnost formiranja zvijezda (eng. *star formation efficiency*, SFE = SFR /  $M_{plin}$ ; Bigiel et al. (2008)). Molekularni plin u galaksijama se može naći u stanjima različite gustoće. Rjeđi plin se najčešće detektira emisijama H<sub>2</sub> ili CO plina, a gušći plin koristeći poglavito emisije HCN, HCO<sup>+</sup> i HNC. Moguće je, stoga, mjeriti SFE različitim frakcijama molekularnog plina, tako da imamo efikasnost formiranja zvijezda iz rijetkog molekularnog plina, SFE<sub>mol</sub> = SFR /  $M_{mol}$ , i efikasnost formiranja zvijezda iz gustog molekularnog

plina, SFE<sub>dense</sub> = SFR /  $M_{dense}$  (Usero et al. (2015)). SFE može varirati prostorno kroz disk galaksije. Mjerenjem SFE u različitim galaktičkim okruženjima ili različitim područjima diska galaksije možemo mjeriti utjecaj različitih galaktičkih sila na formiranje zvijezda (plimne sile, šokovi supernova, tlak otpora, promjene kemijskog sastava plina, turbulencije, itd.).

NGC 2276 (slika 1) je asimetrična spiralna galaksija koja trenutno prolazi kroz gusti međugalaktički medij svoje grupe NGC 2300 i interagira gravitacijski s obližnjom eliptičnom galaksijom NGC 2300. Okruženje NGC 2276 je jedinstveno zbog činjenice da se nalazi u malenoj galaktičkoj grupi (5 članova, od kojih su svi osim NGC 2276 i NGC 2300 vrlo male galaksije), ali ima vrlo gust međugalaktički medij. Zbog ovoga na NGC 2276 istovremeno utječu visok tlak otpora (eng. *ram pressure*) i gravitacijska plimna sila od susjedne masivne galaksije, što je rijedak primjer. Ova galaksija opsežno je promatrana na različitim valnim duljinama (Gruendl et al. (1993), Rasmussen et al. (2006), Wolter et al. (2015)), koja ukazuju na asimetričnu i neuobičajeno visoku stopu stvaranja zvijezda za njenu zvjezdanu masu, koja bi mogla biti uzrokovana ili plimnim silama ili tlakom otpora.

Nedavna opažanja emisije molekularnog plina CO (1-0), iz koje se mjeri masa H<sub>2</sub> plina, i SFR kroz disk galaksije NGC 2276 pokazuju iznimno veliku varijaciju



**Slika 1.** RGB slika asimetrične spiralne galaksije NGC 2276 sa Hubble space teleskopa. Slika preuzeta od Luke Matijevića u privatnoj komunikaciji (Matijević et al. in prep.)

u  $\text{SFE}_{\text{H}_2}$  (Tomičić et al. (2018)). Izmjerena varijacija je veća od raspršenja vrijednosti  $\text{SFE}_{\text{H}_2}$  na uzorku od 222 lokalne galaksije (Saintonge et al. (2011)), te SFE vrijednosti postepeno rastu sa zapadne prema istočnoj strani diska. Ta neobična distribucija SFE rjeđeg molekularnog plina CO je potakla na teleskopsko promatranje gušćeg molekularnog plina, koje bi obuhvatilo linije HCN (1-0),  $\text{HCO}^+$  (1-0) i HNC (1-0), kako bi se odgovorilo na dva ključna pitanja za galaksiju NGC 2276: 1) varira li i efikasnost formiranja zvijezda iz gustog molekularnog plina ( $\text{SFE}_{\text{dense}}$ ) kroz disk galaksije, i 2) varira li udio guste frakcije molekularnog plina (omjer rjeđeg CO i gušćeg HCN,  $f_{\text{dense}}$ ) kroz galaksiju? Promatranjem gustog molekularnog plina bi se odredilo koja od dviju ključnih fizikalnih veličina ( $\text{SFE}_{\text{dense}}$  ili  $f_{\text{dense}}$ ) ima ključnu ulogu u varijaciji SFE ili SFR kroz disk galaksije.

Cilj ovog rada jest detekcija i mjerjenje distribucije gustog molekularnog plina na radio frekvencijama koje obuhvačaju emisijske linije HCN (1-0),  $\text{HCO}^+$  (1-0) i HNC (1-0) kroz neobičnu i asimetričnu galaksiju NGC 2276. U poglavlju 2 opisuјemo podatke i način na koji su prikupljeni, u poglavlju 3 prezentiramo i diskutiramo rezultate promatranja, a u poglavlju 4 dajemo zaključak.

## 2. PODATCI

Promatranja je galaksija NGC 2276 koja se nalazi na sjevernom nebu s koordinatama RA =  $111.8097550^\circ$  i DEC =  $85.7546618^\circ$  te ima crveni pomak  $z = 0.00797$ .

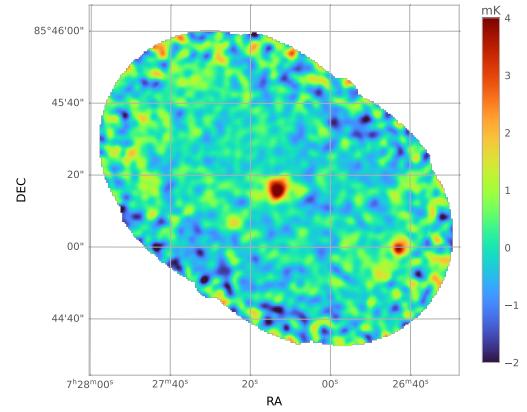
U ovome su radu korištena dva skupa podataka. Prvi skup podataka dolaze od promatranja namijenjenih za detekciju gustog molekularnog plina u ciljanoj galak-

siji. Podatci su prikupljeni koristeći NOEMA (NOrthern Extended Millimeter Array), IRAM interferometar na Plateau de Bure u Francuskoj i IRAM 30 m teleskop na Pico Veleta u Španjolskoj (Tomičić et al. (2018)). Promatranje je odobreno kroz IRAM natječaj za promatranje (S18BO, PI: N. Tomicic). Promatranje je raspon frekvencija od 87.12 GHz do 95.11 GHz, gdje se inače opažaju emisijske linije HCN (1-0),  $\text{HCO}^+$  (1-0) i HNC (1-0). Spektralna rezolucija ovih podataka je 68 km/s. Drugi dio podataka su promatranja (rijetkog) molekularnog plina, koristeći CO (1-0) emisijsku liniju kao trejser. Podatci su prikupljeni koristeći NOEMA interferometar (project ID: w14cg001) i IRAM 30 m teleskop (project ID: 246-14) (Tomičić et al. (2018)).

## 3. REZULTATI I DISKUSIJA

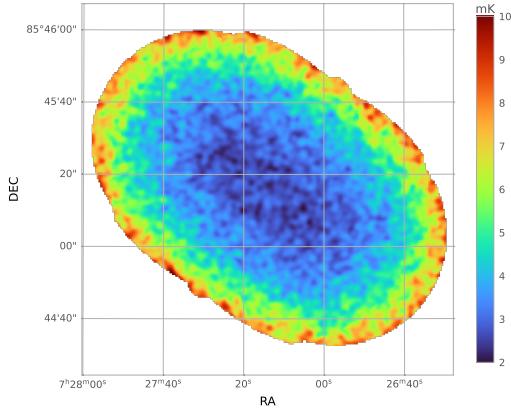
### 3.1. Promatranja gustog molekularnog plina

Da bi se precizno izmjerila amplituda emisijskih linija, treba se oduzeti razina kontinuuma. Kontinuum na frekvencijama u kojima promatramo gusti molekularni plin dolazi većinom od termalne emisije međuzvjezdane prašine i može se precizno aproksimirati kao konstanta. Na slici 2 prikazana je srednja razina tog kontinuiranog signala, mjerena u milikelvinima.



**Slika 2.** Amplituda kontinuiranog signala u milikelvinima.

Najjači signal kontinuirane emisije je u centru galaksije, kako bi se i očekivalo. S obzirom da ovaj kontinuum proizlazi iz termalne emisije prašine, očekivalo bi se da se vidi spiralna struktura koju slijedi prašina u ovoj galaksiji, no ona nije prisutna. Moguće objašnjenje jest da je šum prevelik u odnosu na slabu emisiju kontinuuma na ovom rasponu frekvencija, što bi objasnilo i područja na rubovima promatranog područja gdje je kontinuirani signal negativan. U ovu svrhu pravimo mapu šuma, prikazana na slici 3, mjerenoj kao standardna devijacija kontinuirane emisije.



Slika 3. Razina šuma u milikelvinima.

Šum raste prema rubu promatranog područja, od razine oko 2-3 mK u centru galaksije sve do 8-10 mK na rubu (slika 3). Ovo je veliko u usporedbi s kontinuiranom emisijom od 1-4 mK, pa nije ni čudo da se ne vidi spiralna struktura.

Nakon mjerjenja kontinuiranog signala, možemo oduzeti tu kontribuciju i precizno izmjeriti amplitude spektralnih linija koje se koriste kao trejseri gustog molekularnog plina - HCN (1-0) na 88.62 GHz, HCO<sup>+</sup> (1-0) na 89.19 GHz, HNC (1-0) na 90.68 GHz, kao što je prikazano na slici 4.

Korištena skala boje je odabrana tako da su svi negativni signali prikazani tamnoplavom bojom, a svi signali iznad 12 mK žutom bojom, jer ovo je razina koja bi trebala biti pouzdana detekcija s visokim omjerom signala i šuma (SNR - eng. *signal-to-noise ratio*) u svim dijelovima promatranog područja osim samoga ruba gdje šum prekoračuje 4 mK. Nažalost, HCN i HNC signali ne pokazuju snažnu detekciju izvan samog centra galaksije, no u HCO<sup>+</sup> signalu vidi se potencijalna detekcija nakupine molekularnog plina izvan centra galaksije, oko RA = 7h28m20s, DEC = 85°45'20". Da bismo bolje izmjerili značajnost detekcije, ovu mapu dijelimo s mapom šuma sa slike 3 da bismo dobili mapu omjera signala i šuma (SNR), prikazanu na slici 5.

SNR iznad 3 se generalno smatra tentativnom detekcijom, a iznad 5 je detekcija visoke sigurnosti. Pod tim standardom, imamo detekciju visoke sigurnosti gustog molekularnog plina u jednoj nakupini izvan centra galaksije, no vidljiva je samo u jednom od tri trejsera. U svakom od trejsera ima nekoliko tentativnih detekcija sa SNR > 3, no s obzirom da se detekcije u različitim trejserima ne preklapaju međusobno, ne možemo ih tvrditi kao sigurne detekcije. Mape prikazuju i područja s SNR < -3, u broju i površini usporediva s područjima sa 3 < SNR < 5, što bi ukazalo na to da su i jedna i druga područja proizvod šuma.

Pokušali smo povećati značajnost detekcije promjenom prostorne rezolucije (povećanje piksela odnosno binanje) te zbrajanjem signala u određenim aperturama, no rezultati su ostali identični.

Ovo odsustvo detekcije gustog molekularnog plina izvan centra galaksije znači da se ne može obaviti analiza prostorne ovisnosti SFR o udjelu gусте frakcije molekularnog plina kao što se na početku projekta planiralo. Međutim, možemo proispitati prirodu ovog odsustva - je li razlog zašto nema detekcije prevelik šum u promatranju, ili zapravo fizikalno nema gustog molekularnog plina izvan centra galaksije? U tu svrhu ćemo u sljedećem potpoglavlju usporediti dobivene rezultate s vrijednostima koje bi se očekivale iz ranijih promatranja molekularnog plina.

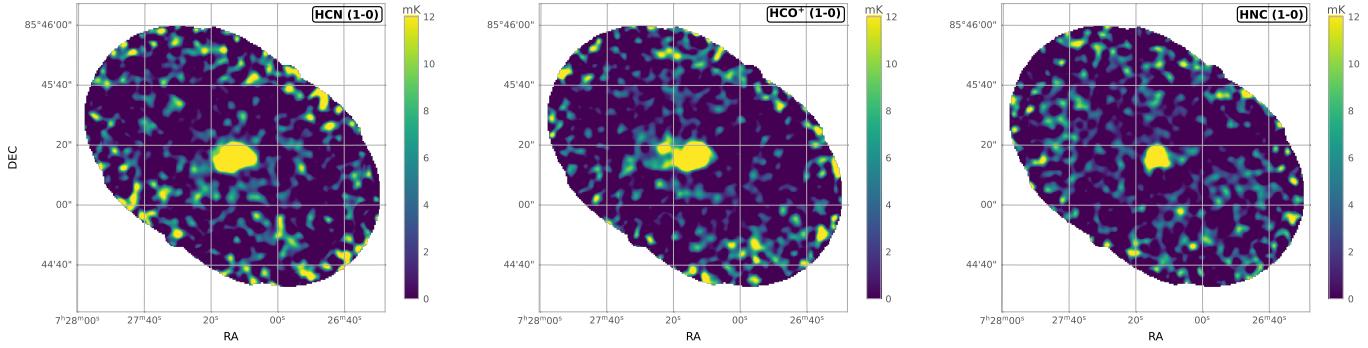
### 3.2. Molekularni plin i očekivani signal gustog molekularnog plina

Trejser koji se standardno koristi za promatranje molekularnog plina je CO, poglavito CO (1-0) emisijska linija. Prema Usero et al., 2015, omjer fluksa HCN (1-0) i CO (1-0) linije ovisi o površinskoj gustoći galaksije, a za našu galaksiju bi taj omjer trebao biti otprilike 1/100. Međutim, zbog slabe spektralne rezolucije naših podataka za gusti molekularni plin, ne možemo izmjeriti fluks emisijske linije, nego samo njezinu amplitudu. Širina spektralnih linija u međuvjezdanim molekularnim oblacima proizlazi iz brzine gibanja plina unutar tih oblaka, te pod pretpostavkom da je dinamika gustog i rijetkog plina ista, možemo pretpostaviti da imaju istu širinu linija. Pod ovom pretpostavkom, omjer fluksa linija trebao bi biti jedan omjeru amplituda linija, pa možemo izračunati očekivanu amplitudu HCN (1-0) linije na bazi izmjerene amplitude CO (1-0) linije i pretpostavljajući omjer 1/100.

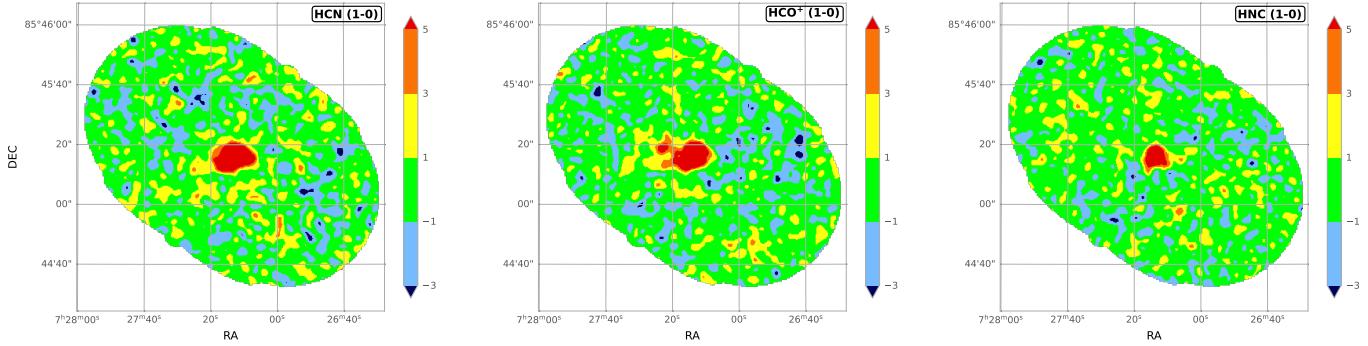
Koristimo podatke fluksa CO (1-0) emisijske linije te njezine širine. Pretpostavljajući da emisijska linija ima gausijanski profil, možemo onda dobiti amplitudu linije sa  $A = F/(\sqrt{2\pi}\sigma)$ . Fluks, širina i amplituda CO (1-0) linije prikazani su na slici 6.

Na slici 7 lijevo prikazana je očekivana amplituda HCN (1-0) linije, a desno je ta očekivana amplituda podijeljena sa šumom koji smo dobili u mjerjenjima gustog molekularnog plina, sa svim područjima s (očekivanim) SNR < 2 obojanima tamnoplavo. Vidimo da se očekuje visok SNR u centru galaksije, kao što i imamo, no vrlo malen dio izvan centra ima dobar očekivani SNR. Ovo potvrđuje da je šum u promatranju bio previšok da bi se mogla dobiti detekcija gustog molekularnog plina visoke sigurnosti izvan centra.

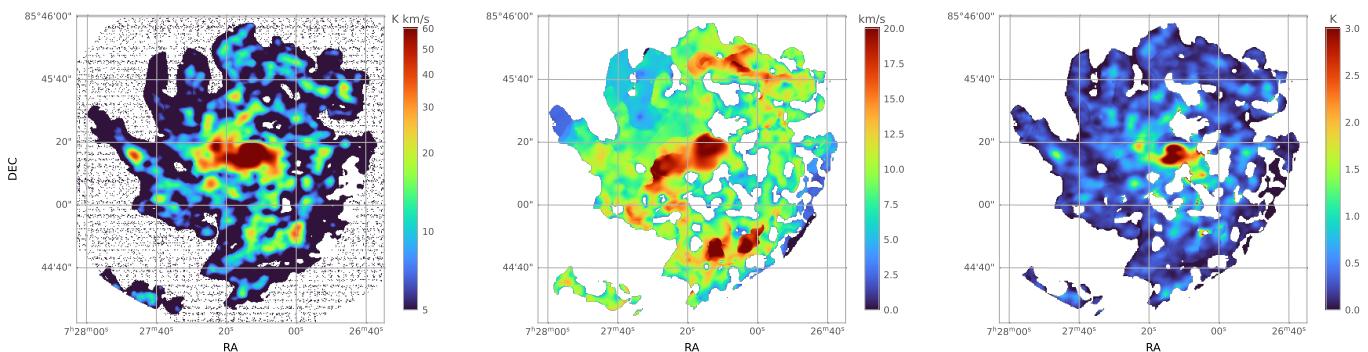
Valja, međutim, primjetiti visok očekivan SNR na istom mjestu oko RA = 7h28m20s, DEC = 85°45'20" gdje



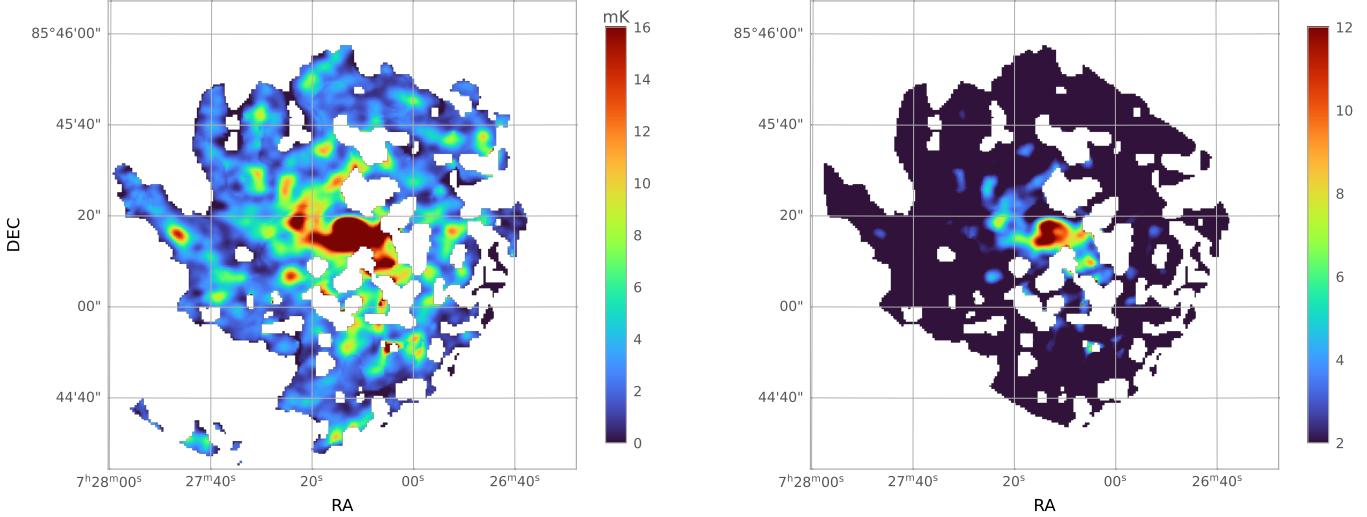
**Slika 4.** Detektirana amplituda signala u milikelvinima za 3 različite emisijske linije, slijeva nadesno: HCN (1-0) na 88.62 GHz, HCO<sup>+</sup> (1-0) na 89.19 GHz, HNC (1-0) na 90.68 GHz.



**Slika 5.** Omjer signala i šuma za 3 različite emisijske linije, slijeva nadesno: HCN (1-0) na 88.62 GHz, HCO<sup>+</sup> (1-0) na 89.19 GHz, HNC (1-0) na 90.68 GHz.



**Slika 6.** Mape različitih podataka za mjerenja signala CO (1-0) emisijske linije. Slijeva nadesno: (a) ukupni fluks emisijske linije u K km/s, (b) širina emisijske linije u km/s, (c) amplituda emisijske linije u K.



**Slika 7.** Lijevo: očekivana amplituda signala HCN (1-0) linije na bazi amplitude CO (1-0) linije. Desno: Omjer očekivanog signala i izmjerene razine šuma. Sva područja ispod 2 su prikazana istom tamnoplavom bojom.

smo vidjeli detekciju u  $\text{HCO}^+$ . Ovo bi potvrdilo da se tu nalazi nakupina gustog molekularnog plina, no nije još jasno zašto se vidi samo u jednom od tri trejsera. Daljnja istraživanja su potrebna za odgovor na to pitanje.

#### 4. ZAKLJUČAK

Promotrili smo galaksiju NGC 2276 koristeći IRAM 30m teleskop da bismo proučili njezin gusti molekularni plin koristeći trejsere HCN (1-0) na 88.62 GHz,  $\text{HCO}^+$  (1-0) na 89.19 GHz i HNC (1-0) na 90.68 GHz. SNR je

nizak za sva tri trejsera, osim u centru galaksije. Detektirana je jedna nakupina gustog molekularnog plina u blizini centra galaksije u  $\text{HCO}^+$ , no potrebno je daljnje istraživanje da bi se ustanovilo zašto ona nije vidljiva u HCN i HNC signalima.

Usporedili smo rezultate s promatranjima molekularnog plina koristeći CO kao trejser. Potvrdili smo tom usporedbom da je razlog manjku detekcija visoke sigurnosti u trejserima gustog molekularnog plina uzrokovano previsokim šumom promatranja. Također je potvrđeno da se na lokaciji nakupine gustog molekularnog plina detektiranog u  $\text{HCO}^+$  nalazi i CO molekularni plin.

#### LITERATURA

- Bigiel, F., Leroy, A., Walter, F., et al. 2008, AJ, 136, 2846, doi: [10.1088/0004-6256/136/6/2846](https://doi.org/10.1088/0004-6256/136/6/2846)
- Gruendl, R. A., Vogel, S. N., Davis, D. S., & Mulchaey, J. S. 1993, ApJL, 413, L81, doi: [10.1086/186964](https://doi.org/10.1086/186964)
- Kennicutt, Jr., R. C. 1998, ApJ, 498, 541, doi: [10.1086/305588](https://doi.org/10.1086/305588)
- Rasmussen, J., Ponman, T. J., & Mulchaey, J. S. 2006, MNRAS, 370, 453, doi: [10.1111/j.1365-2966.2006.10492.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10492.x)
- Saintonge, A., Kauffmann, G., Kramer, C., et al. 2011, MNRAS, 415, 32, doi: [10.1111/j.1365-2966.2011.18677.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18677.x)
- Tomičić, N., Hughes, A., Kreckel, K., et al. 2018, ApJL, 869, L38, doi: [10.3847/2041-8213/aaf810](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaf810)
- Usero, A., Leroy, A. K., Walter, F., et al. 2015, AJ, 150, 115, doi: [10.1088/0004-6256/150/4/115](https://doi.org/10.1088/0004-6256/150/4/115)
- Wolter, A., Esposito, P., Mapelli, M., Pizzolato, F., & Ripamonti, E. 2015, MNRAS, 448, 781, doi: [10.1093/mnras/stv054](https://doi.org/10.1093/mnras/stv054)