

Mjerenje mase plina neutralnog vodika u dalekim galaksijama

LANA CERAJ

Fizički odsjek Prirodoslovno – matematičkog fakulteta

Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska

Mentorice: doc. dr. sc. Jacinta Delhaize, doc. dr. sc. Vernesa Smolčić

30.01.2015.

Sažetak

Koristeći podatke snimljene Parkes radio teleskopom na kutnoj rezoluciji 15 arcmin, analizirali smo svojstva spektara neutralnog vodika HI uzorka galaksija na crvenim pomacima $0.0391 < z < 0.1337$. Za lociranje crvenih pomaka galaksija u snimljenim podacima koristili smo SDSS optički katalog. U analizi smo koristili metodu slaganja, relativno novu metodu čiji je temelj kombiniranje spektara mnogo galaksija sa svrhom postizanja statističke detekcije. Izmjerena je prosječna masa plina neutralnog vodika HI: $\langle M_{HI} \rangle = 3.484 \cdot 10^9 h^{-2} M_{\odot}$. Dobivena masa bliska je vrijednosti karakteristične mase M^ predviđenoj u (Zwaan et al. 2005) te masama M_{HI} koje su dobili (Delhaize et al. 2013)*

1. UVOD

1.1. Razvoj galaksija

Galaksije su kompleksni sustavi s mnogo komponenata koji su se uvelike promijenili od trenutka formiranja nakon Velikog praska (Cole et al. 2000). Varijacije u raspodjeli materije Svemira potječu od kvantnih fluktuacija u vrlo ranom Svemiru koje su započele, a potom i brzo rasle tijekom inflacije. Gravitacijska nestabilnost dovela je do kolapsa pregustih dijelova što rezultiralo formiranjem haloa tamne tvari. Na temelju hijerarhijskog formiranja strukture ti halo i su spajanjem formirali još masivnije sustave (Springel et al. 2005). Plin koji je padao u te gravitacijske potencijalne jame zagrijavao se do virijalne temperature, a potom hladio (Binney, 1997). Plin je padao prema središtu potencijalne jame i formirao proto-galaksiju. Ukoliko je, po završetku tog procesa, postojao rezidualni angularni moment, plin je formirao disk oko tih proto galaksija (Fall & Efstathiou, 1980).

Ako je hlađenje dovoljno efikasno, plin se može razdijeliti na mnogo manjih područja velike gustoće. Unutar tih velikih molekularnih nakupina tlak i temperatura mogu narasti dovoljno da omoguće stvaranje zvijezda. Metali se sintetiziraju unutar zvijezda i mogu biti izbačeni u međuzvjezdani medij (eng. interstellar medium – ISM). Promijenjen metalicitet galaksije može utjecati na efikasnost hlađenja plina, promijeniti opaženu boju i atenuirati svjetlost putem apsorpcije na česticama prašine. Brzina kojom se mijenja metalicitet galaksije ovisit će o funkciji početne mase (eng. initial mass function – IMF) i efikasnosti stvaranja zvijezda u galaksiji. Najmasivnije zvijezde svoj će život završiti u eksploziji supernovae koja će obogatiti međuzvjezdani medij i zagrijati, komprimirati i ispuhati plin iz galaksije. Navedeni procesi mogu priječiti ili povećati stvaranje zvijezda u različitim djelovima galaksije i na različitim vremenskim skalama (Efstathiou, 2000).

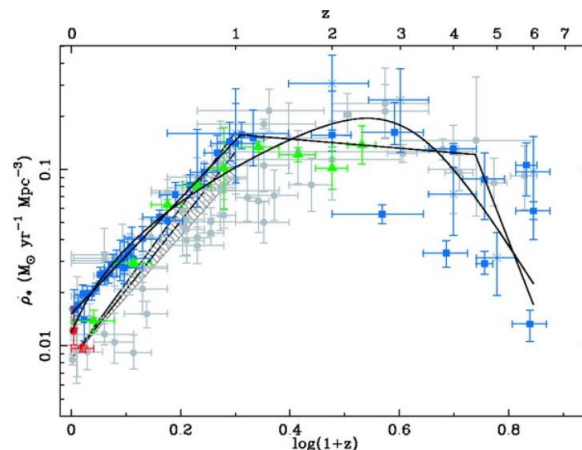
Spajanjem više galaksija s mnogo plina, plin se može komprimirati i povećati brzinu stvaranja zvijezda u galaksiji (Mihos & Hernquist, 1996). Spajanja također mogu izazvati akreciju tvari u supermasivnu crnu rupu koja često obitava u središtima galaksija (Di Matteo et al. 2005). Akrecija izaziva aktivnost aktivne galaktičke jezgre. To zračenje može imati velik utjecaj na brzinu stvaranja zvijezda u galaksijama.

Svaka komponenta galaksije (zvijezde, prašina, neutralni i molekularni plin, crna rupa, ...) može utjecati na proces razvoja galaksije. Svaku od tih komponenti možemo pratiti na različim valnim duljinama jer imaju različita emisijska svojstva. Stoga, za dobivanje prave slike o evoluciji galaksije, potrebno je provesti kompletnu analizu zračenja galaksije, od radio do UV zračenja.

1.2. Metoda slaganja

Za kompletno poznavanje evolucije galaksija treba provesti kompletnu analizu zračenja galaksije na uzorku velikog volumena. Budući da će galaksije na većim crvenim pomacima imati manju prividnu magnitudu, ključno je da se opažanja provode s instrumentima velike osjetljivosti kako bi mogli detektirati udaljene sustave. No, s obzirom na ograničenja današnjih teleskopa u analizi se koristimo metodama osmišljenim da nadiđu tehnološka ograničenja. Tu nam pomaže metoda slaganja (eng. stacking) koje je snažan alat za proučavanje evolucije galaksija i ima potencijala istražiti do sad još neistražene epohe razvoja Svemira. Metoda slaganja, umjesto izravne detekcije, radi statističku detekciju ansambla galaksija s visokim omjerom signala i šuma (eng. signal-to-noise ratio, dalje označeno kao S/N). Ova analitička metoda koristi se kako bi ekstrahirala informaciju na samim granicama crvenih pomaka u mjerenju i time povećala efektivni volumen. Sam proces bit će opisan u dijelu 3.1.

Za provođenje metode slaganja nužno je na raspolaganju imati veliki ansambl galaksija u velikom volumenu kako bi se minimizirao efekt kozmičke varijance (Moster et al. 2009). Za to je potrebno da opažanja budu ne samo „površinski velika“ ($dec \times ra$), nego i da pokrivaju velik raspon crvenih pomaka što omogućava proučavanje evolucije raznih svojstava galaksija. Opažanjima na više valnih duljina na rasponu crvenih pomaka $0 < z < 6$ (Hopkins & Beacom, 2006) pokazano je da brzina stvaranja zvijezda (eng. star formation rate – SFR) u galaksijama značajno varira u kozmičkom vremenu (Madau et al. 1996). SFR je brzina kojom se plin pretvara u zvijezde po jedinici volumena, a kao funkcija crvenog pomaka.



Slika 1: Gustoća brzine formiranja zvijezda kao funkcija crvenog pomaka.

Preuzeto iz Hopkins & Beacom, 2006.

Na slici 1 može se vidjeti da je SFR imala maksimum na $z \sim 2 - 3$, a potom se smanjila za red veličine u proteklih 10 milijardi godina. Moguće je da pad od $z \sim 2 - 3$ do danas $z = 0$ reflektira smanjenje količine plina HI u galaksijama. Za detaljno objašnjenje toga potrebno je još mnogo istraživanja.

1.3. Plin neutralnog HI vodika

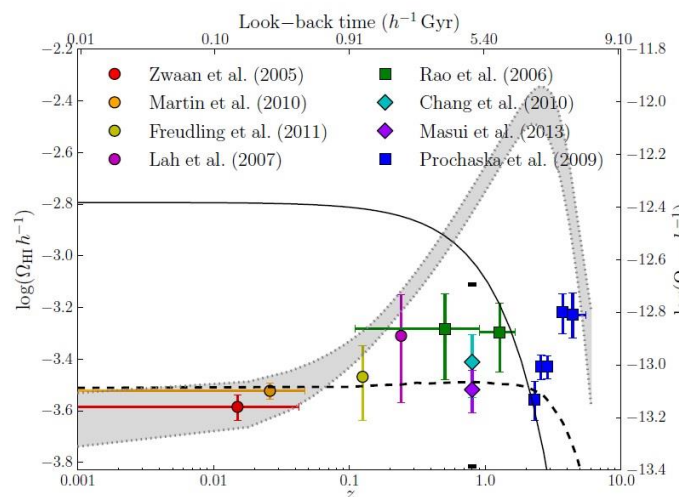
Na niskim crvenim pomacima ($z \approx 0$) HI u galaksijama možemo detektirati preko emisijske linije na 21 cm . U osnovnom stanju neutralnog vodikovog atoma, spinovi elektrona i protona mogu biti paralelni ili antiparalelni. To rezultira time da možemo imati dva stanja, gdje je energija paralelnog stanja za $6 \cdot 10^{-6}\text{ eV}$ veća od energije antiparalelnog stanja. Prijelaz elektrona iz stanja više u stanje niže energije odgovara emisiji fotona frekvencije 1420.406 MHz čija je valna duljina 21.105 cm (radio valovi). Taj prijelaz je „zabranjen“, sa srednjim vremenom života u paralelnom stanju $1.1 \cdot 10^7$ godina. Doduše, međuatomni sudari omogućuju da je spinska temperatura u ravnoteži s kinetičkom temperaturom. Koristeći Einsteinovu relaciju za atomske prijelaze u Rayleigh-Jeans režimu (ovdje primjenjivo jer vrijedi $h\nu \ll kT$) te uz pretpostavku da imamo optički tanko sredstvo, masa neutralnog vodika galaksije može se izravno izračunati iz opaženog spektra gustoće toka kao:

$$M_{HI} = \frac{16\pi m_H}{3h\nu_0 A} D_L^2 \int S(\nu) d\nu, \quad (1)$$

gdje je m_H masa atoma vodika, h Planckova konstanta, ν_0 frekvencija emisijske linije u sustavu mirovanja ($\nu_0 = 1420.406\text{ MHz}$), A Einsteinov koeficijent za spontanu emisiju, D_L luminozitetna udaljenost, a $S(\nu)$ opažena gustoća toka po kanalu.

1.4. Uloga plina HI u evoluciji galaksija

Hladan plin ($T < 10^4\text{ K}$) osnovna je komponenta u životu galaksija. Velik dio ovog plina nalazi se u obliku neutralnog atomskog vodika HI . Ovaj plin je osnovna građevna jedinica galaksija jer se kondenzira u gigantske molekularne nakupine u obliku H_2 plina koje su gorivo za stvaranje zvijezda. Kao što smo već spomenuli u poglavlju 1.2., gustoća SFR je imala maksimum na $z \sim 2 - 3$ i značajno se mijenjala tokom kozmičkog vremena. Gustoća zvjezdane mase u Svemiru se povećava sa starošću Svemira. Budući da je stvaranje zvijezda usko povezano s dostupnim HI , kako bi mogli objasniti opaženu krivulju, moramo razumijeti i kako se relativna gustoća mase neutralnog vodika (Ω_{HI}) mijenjala s crvenim pomakom. HI je bio dominantna barionska komponenta



Slika 2: Evolucija relativne gustoće mase HI (Ω_{HI}) prikazana je punom crnom crtom.

Preuzeto iz Delhaize, 2013.

u ranom Svemiru, a danas je tek 1% ukupnog barionskog sastava (Prochaska & Tumlinson, 2009). Stoga je očito da se gustoća HI znatno mijenjala tokom kozmičkog vremena. Na slici 2 prikazana je evolucija relativne gustoće mase HI (Ω_{HI}) (Delhaize, 2013).

Također, komponenta plina HI u galaksijama ne ovisi samo o kozmičkom vremenu, već i mnogim drugim fizikalnim svojstvima kao što su gustoća okoline, morfologija galaksije i boja (Haynes et al. 1984).

Analiza HI komponente galaksija dati će nam korisne informacije o fizikalnim procesima u galaksijama i utjecaju koji oni imaju na evoluciju galaksija. Stoga je ključno ispitati HI sastav galaksija tijekom kozmičkog vremena i na velikom uzorku galaksija kako bi mogli razumjeti evoluciju galaksija.

2. O PODACIMA

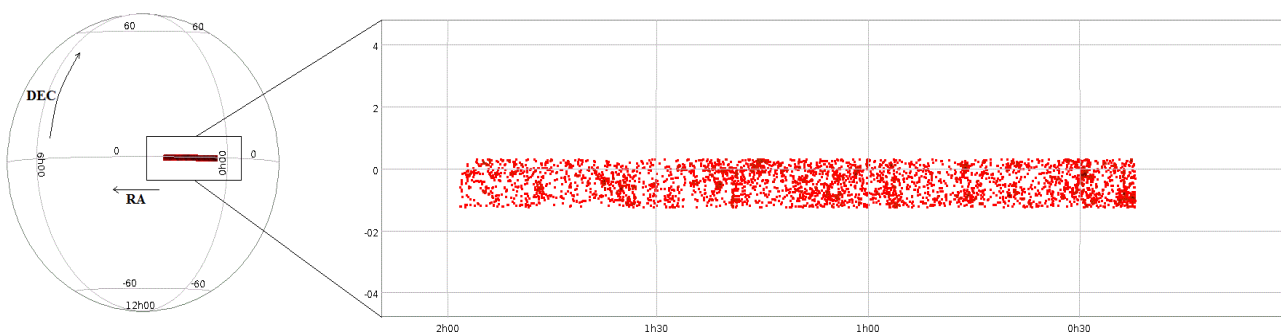
2.1. Promatrani dio nebeskog svoda – Stripe 82

Stripe 82 (s82) je dio nebeskog svoda površine 300 deg^2 pozicioniran oko nebeskog ekvatora (Abazajian et al., 2009). U našoj analizi koristili smo podatke koje je snimila J. Delhaize 2009. godine Parkes radio teleskopom (promjer antene 64 m) frekventne rezolucije 62.5 kHz (About 'the Dish', 2013). Ti podaci (slika 3) obuhvaćaju dio s82 u rasponima danim u tablici 1. Crvene pomake izračunali smo iz rubnih frekvencija koristeći relaciju:

$$v = \frac{v_0}{1+z}. \quad (2)$$

Veličina	Interval
DEKLINACIJA	$[-01^{\circ}32'36.52'' , 00^{\circ}35'23.93'']$
REKTASCENZIJA	$[00 \text{ h } 17 \text{ min } 41.73 \text{ s}, 02 \text{ h } 02 \text{ min } 0.91 \text{ s}]$
FREKVENCIJA	$[1.25289, 1.36694] \text{ GHz}$
CRVENI POMAK	$[0.039, 0.1337]$

Tablica 1: Rasponi veličina korištenih u analizi.



Slika 3: Promatrani dio s82 – podaci korišteni u ovom istraživanju.

2.2. SDSS optički katalog

Osim podatkovne kocke (ra, dec, ν) snimljene Parkes radio teleskopom, za provođenje metode slaganja trebaju nam dodatni podaci koji će nam reći gdje se u našoj podatkovnoj kocki nalaze galaksije, tj. crveni pomaci. Te podatke nalazimo pomoću SDSS optičkog kataloga (Sloan Digital Sky Survey / SkyServer, 2013) koji pokriva raspon valni duljina (3800 – 9200) Å na području od 9380 deg^2 . Crvene smo pomake, za područje od našeg interesa (s82), dobavili sa SDSS SkyServer-a koristeći sljedeći SQL upit:

```
SELECT
  p.objid,p.ra,p.dec,p.u,p.g,p.r,p.i,p.z,
  s.specobjid, s.class, s.z as redshift
FROM PhotoObj AS p
  JOIN SpecObj AS s ON s.bestobjid = p.objid
WHERE
  s.z>0.0391 AND s.z<0.1337
  AND p.ra>4.423875 and p.ra<30.516217
  AND p.dec>-1.54348 and p.dec<0.58998
  AND s.class='galaxy'
```

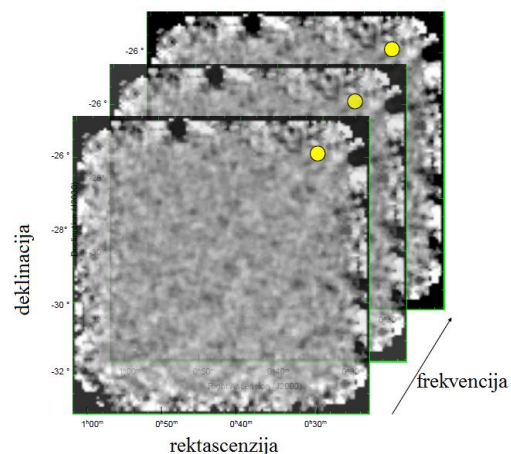
Taj upit je iz velike baze podataka SDSS SkyServera izdvojio tražene podatke za 4042 galaksije koje se, prema podacima izmjenjenim u sklopu SDSS-a, nalaze na području s82.

3. ANALIZA I REZULTATI

3.1. O metodi slaganja

Metoda slaganja (eng. stacking) relativno je nova metoda analize podataka. „Slaganje“ se odnosi na proces kombiniranja mnogo spektara različitih objekata kako bi se postigla statistička detekcija. Informacija o svakoj pojedinoj galaksiji se gubi, no saznajemo usrednjena svojstva ukupne populacije koju smo promatrali. Prednost ove metode je da ne zahtjeva pojedinačne detekcije objekata te se stoga može dobiti informacija koja nadilazi granice osjetljivosti podataka.

Slaganje spektara HI zahtjeva dva nezavisna seta podataka: podatkovnu kocku i vanjski katalog koji sadrži podatke o položajima i crvenim pomacima galaksijama u snimanom području. Podatkovna kocka snimljena je na Parkes radio teleskopu (About 'the Dish', 2013), a vanjski katalog je dobavljen iz baze podataka SDSS (SkyServer-a Sloan Digital Sky Survey / SkyServer, 2013). Podatkovna kocka sadrži osi rektascenzije (RA), deklinacije (DEC) i frekvencije (ν) kao što je ilustrirano na slici 4.



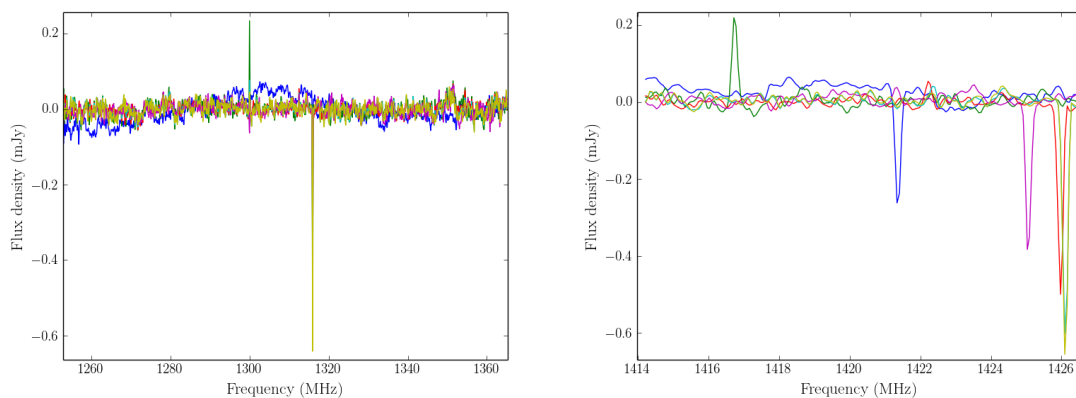
Slika 4: Podatkovna kocka. Žuta točka predstavlja položaj galaksije. Modificirano iz Delhaize, 2013.

Žuta točka na slici predstavlja lokaciju galaksije čiji HI spektar ekstrahiramo iz podatkovne kocke na pikselu odgovornom za taj položaj.

Jednom kada ekstrahiramo spektre svih galaksija u izmjerenom području, spektre moramo pomaknuti u sustav mirovanja koristeći podatke o crvenom pomaku svake pojedine galaksije preko relacije:

$$v_{em} = v_{obs}(1 + z), \quad (3)$$

gdje je v_{em} frekvencija koju je galaksija emitirala (gledano iz njezinog sustava mirovanja), a v_{obs} frekvencija koju smo mi opazili. Poravnanjem osiguravamo da će se HI emisijske linije svih galaksija, prilikom preklopa njihovih spektara, nalaziti na istom „mjestu“, tj. frekvenciji od 1420.406 MHz. Na slici 5 može se vidjeti primjer preklopa 6 spektara prije (lijevo) i nakon (desno) poravnavanja. Na slici se mogu vidjeti i „šiljci“ u spektru koji odgovaraju radio-frekventnoj interferenciji (RFI) o kojoj će više govora biti u dijelu 3.3.



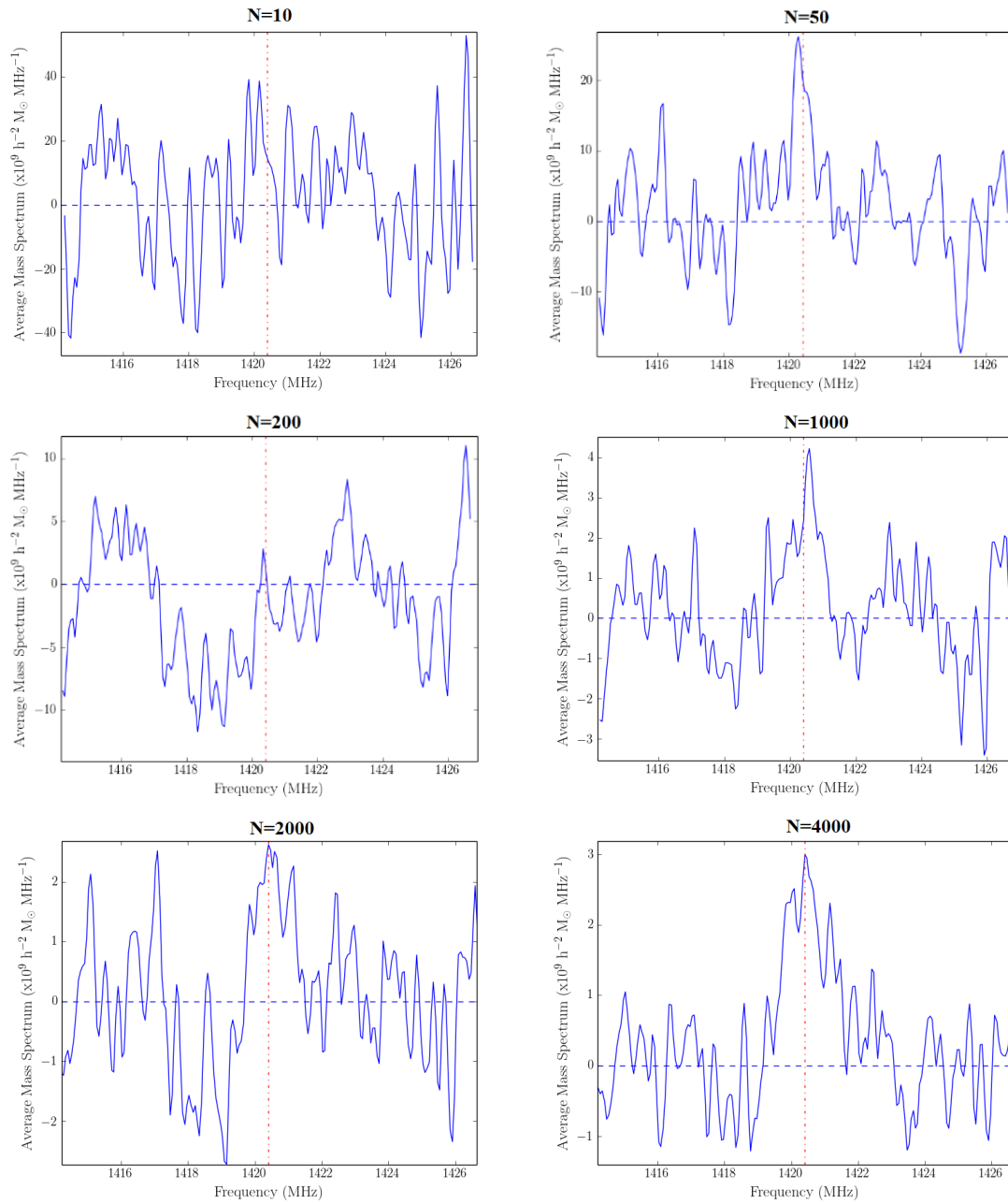
Slika 5: Primjer slaganja 6 spektara. Lijeva slika pokazuje slaganje prije poravnavanja, a desna nakon poravnavanja u sustav mirovanja.

Konačni korak metode je upravo slaganje N ekstrahiranih poravnatih spektara uzimajući težinski usrednjenu vrijednost:

$$\langle S \rangle_\nu = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i S_{\nu,i}}{\sum_{i=1}^N \omega_i}, \quad (4)$$

gdje je $S_{\nu,i}$ spektar i -tog poravnatog spektra, $\langle S \rangle_\nu$ usrednjena gustoća toka po kanalu, odnosno složeni spektar (eng. stacked spectrum), a ω_i težinski faktor primjenjena na svaki od i spektara.

Slika 6 ilustrira proces slaganja spektara i kako se oblik konačnog spektra mijenja dodavanjem sve većeg broja spektara. Za mali broj spektara, prevladava šum i nema statističke detekcije. Kako povećavamo broj spektara, šum se smanjuje i počinje se nazirati detekcija.



Slika 6: Ilustracija procesa slaganja spektara. Za mali N prevladava šum i nema statističke detekcije. Povećanjem N , šum se smanjuje i dobivamo sve bolju detekciju.

Pretpostavili smo Λ_{CDM} kozmologiju s reduciranom Hubbleovom konstantom

$$h = \frac{H_0}{100 \text{ kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1}} = 1.0, \quad (5)$$

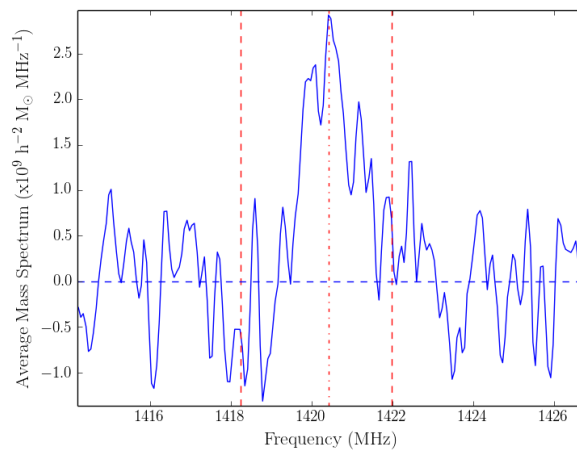
$$H_0 = 100 \text{ kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1}, \quad \Omega_\Lambda = 0.7 \text{ i } \Omega_M = 0.3.$$

3.2. Rezultati

Složeni spektar 4042 galaksije koristeći Parkes (ra, dec, v) kocku i SDSS crvene pomake prikazan je na slici 7, gdje se uočava detekcija HI emisijske linije. Integrirajući spektar u dijelu koji sadrži detekciju, tj. između $\nu_{cm_1} = 1418.23 \text{ MHz}$ i $\nu_{cm_2} = 1421.97 \text{ MHz}$ (slika 7), računamo usrednjenu masu HI u našem uzorku:

$$\langle M_{HI} \rangle = \int_{\nu_{cm_1}}^{\nu_{cm_2}} \langle M_{HI} \rangle_{\nu_{cm}} d\nu_{cm}. \quad (6)$$

Dobivena srednja vrijednost mase HI je $\langle M_{HI} \rangle = 3.484 \cdot 10^9 h^{-2} M_{\odot}$.



Slika 7: Usrednjeni spektar 4042 galaksije dobiven metodom slaganja. Na slici je prikazan usrednjeni spektar 4042 galaksije dobiven metodom slaganja. Vertikalne crtkane (---) linije označavaju granice integriranja, a vertikalna (-·-) linija $\nu_0 = 1420.406 \text{ MHz}$.

Vrijednost mase dobivena metodom slaganja manja je od karakteristične mase $M^* = (3.55 \pm 0.04) \cdot 10^9 h^{-2} M_{\odot}$ (Zwaan et al., 2005) i $M_{HI} = (6.93 \pm 0.17) \cdot 10^9 h^{-2} M_{\odot}$, a veća od $M_{HI} = (1.48 \pm 0.03) \cdot 10^9 h^{-2} M_{\odot}$ (Delhaize et al., 2013). Mogući razlog za razliku u podacima je taj što su Delhaize et al. u svom radu koristili optički katalog 2dFGRS koji ima drugačije granice detekcije u optičkim granicama nego naš, SDSS.

3.3. Ponašanje šuma i konfuzija

S obzirom da metoda slaganja koristi spektre koji sami za sebe nemaju detekciju, rezultat dobiven slaganjem takvih spektara jako je osjetljiv na bilo koji signal koji ne dolazi od željenog izvora. Analiza je jako osjetljiva na prisustvo radio-frekventne interferencije (RFI) i rezidualne emisije od snažnih izvora, što su u našem slučaju bili kvazari.

RFI može ograničiti dostupne spektralne kanale, ograničiti S/N omjer, smanjiti kvalitetu konačne detekcije ili ju čak i onemogućiti. Dio RFI koji smo susreli u mjerenju dolazi od zemaljskih izvora, a manifestira se putem šiljaka u spektru na frekvencijama: 1312 i 1316 MHz, te na rubovima podatkovne

kočke: 1254 i 1366 MHz. Osim zemaljskih izvora, RFI nastaje i od svemirskih objekata koji svojom emisijom mogu nadjačati željene izvore (galaksije) i time kontaminirati naše podatke. Kada se jedan od takvih izvora nađe u području promatranja, generira se stojni val što se u spektralnim podacima javlja kao mrlja (eng. ripple). Najbolji omjer S/N dobiva se kada je šum Gaussian i smanjuje se sa korištenom broja sлаганих спектара. Doduše, svemirski objekti s jakom emisijom uzrokuju to da šum više nema oblik Gaussiana, što nije idealna okolina za provođenje metode sлаганја. Kako bi minimizirali utjecaj tih izvora šuma, prvo ih lociramo i iz daljnje analiza isključimo bilo koju galaksiju koja se nalazi na tom području. Budući da svemirski objekti nisu bili glavni izvor RFI, ovakva metoda rješavanja šuma od tih izvora bila je dovoljno dobra i spriječila je znatniju kontaminaciju konačnog spektra dobivenog metodom sлаганја.

Dodatni utjecaj na spektralnu analizu metodom sлаганја može imati preciznost spektroskopskih crvenih pomaka. Točno poravnavanje spektra u sustav mirovanja ovisi o tome koliko je velika razlika između optičkih crvenih pomaka i pravih crvenih pomaka plina u galaksijama. Ako je ta razlika prevelika, može se dogoditi da se spektri pogrešno poravnaju što u potpunosti onemogućuje statističku detekciju.

Na točnost usrednjenih veličina (flux i masa) koje mjerimo metodom sлаганја jako utječe efekt „konfuzije“ (eng. confusion) koji se javlja zbog kutne rezolucije teleskopa. Parkes radio teleskop ima kutnu rezoluciju (eng. beam size) jednaku 15 *arcmin*, što znači da jedan piksel sadrži informaciju o svim objektima (a ne samo jednoj galaksiji) koji se nalaze unutar površine neba čiji je signal on primio. To dovodi do toga da mi zapravo precijenjujemo flux u toj točki što pak može dovesti do toga da precijenjujemo ukupni flux.

4. ZAKLJUČAK

Plin neutralnog vodika *HI* osnovna je građevna jedinica galaksija kao preteča molekule H_2 koja je gorivo za stvaranje zvijezda. Tijekom vremena udio *HI* u Svemiru se mijenja te je, od dominantne barionske komponente u ranom Svemiru, njegov udio danas opao na svega 1% ukupnog barionskog sastava (Prochaska & Tumlinson, 2009). Stoga, da bi razumjeli tijek evolucije galaksija, potrebno je znati i kako se *HI* sastav galaksija mijenjao tijekom kozmičkog vremena.

Kako bismo saznali masu vodika u području neba poznatom kao „stripe 82“ koristimo noviju analitičku metodu „sлаганја“ koja se bazira na procesu sлаганја спектара velikog broja galaksija što omogućuje statističku detekciju usrednjene vrijednosti mase *HI*.

U radu je dobiven rezultat koji je svojim iznosom manji od karakteristične mase $M^* = (3.55 \pm 0.04) \cdot 10^9 h^{-2} M_\odot$ (Zwaan et al., 2005) i između $M_{HI} = (6.93 \pm 0.17) \cdot 10^9 h^{-2} M_\odot$ i $M_{HI} = (1.48 \pm 0.03) \cdot 10^9 h^{-2} M_\odot$ (Delhaize et al., 2013).. Sljedeći korak u analizi bio bi određivanje pogrešaka za što, u predviđenom vremenskom okviru, nije bilo vremena.

5. REFERENCE

- Abazajian et al., 2009, *The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey, The Astrophysical Journal Supplement Series*, 543-558
- About 'the Dish', 2013, <http://www.csiro.au/portals/education/programs/parkes-radio-telescope/about-the-dish>
- Binney J., 1977, *The Astrophysical Journal*, 215, 483
- Cole S., Lacey C. G., Baugh C. M., Frenk C. S., 2000, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 319, 168
- Delhaize (2013), *PhD Thesis*, University of Western Australia
- Delhaize, J., Meyer, M. J., Staveley-Smith, L., & Boyle, B. J., 2013, *MNRAS*, 433, 1398
- Di Matteo T., Springel V., Hernquist L., 2005, *Nature*, 433, 604
- Efstathiou G., 2000, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 317, 697
- Fall S. M., Efstathiou G., 1980, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 193, 189
- Haynes M. P., Giovanelli R., Chincarini G. L., 1984, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 22, 445
- Hopkins A. M., Beacom J.F., 2006, *On the normalisation of the cosmic star formation history*
- Madau P., Ferguson H. C., Dickinson M. E., Giavalisco M., Steidel C. C., Fruchter A., 1996, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 283, 1388
- Mihos J. C., Hernquist L., 1996, *The Astrophysical Journal*, 464, 641
- Moster, B.P., Somerville, R.S., Newman, J.A., Rix, H.W., 2009., *A Cosmic Variance Cookbook*
- Prochaska J. X., Tumlinson J., 2009, *Baryons: What, When and Where?*
- Sloan Digital Sky Survey / SkyServer, 2013, <http://skyserver.sdss.org/dr7/en/tools/search/sql.asp>
- Springel V. et al., 2005, *Nature*, 435, 629
- Zwaan, M. A., Meyer, M. J., Staveley-Smith, L., & Webster, R. L., 2005, *MNRAS*, 359, L30