

Kutatási beszámoló 2017 tavasz

ELTE TTK Fizika Doktori Iskola

KIS-TÓTH ÁGNES

Téma: Kozmológiai ionizált buborékok spektruma és struktúrája

Témavezetők: Frei Zsolt és Haiman Zoltán

1 Bevezetés

Az első félévhez hasonlóan a kutatási témám a kozmológiai ionizált buborékok modellezése volt, melyek galaxisok és kvazárok fénye által ionizált régiók a galaxisközi térben. A nagy energiájú fotonok okozta ionizációt rekombinációs folyamatok követik, melyek eredményeként ezek a területek vonalas spektrumban világítanak.[1] Ebben a fluoreszencia folyamatban a hidrogén Lyman alfa sugárzás a legjelentősebb. Az általam elsősorban modellezett ionizált buborékok nagyon távoli ($z = 7 - 10$ közötti) kvazárok körüli nebulák, melyek növekedése és átfedése lehet felelős a $z = 6$ táján bekövetkezett reionizációért. Ilyen buborékokat ez idáig nem tudtunk megfigyelni, azonban a várhatóan 2018-ban startoló James Webb Space Telescope (JWST) már képes lehet.[2]

A félév során közelebbről megismerkedtem a JWST-n helyet foglaló műszerekkel és azok kapacitásával mind térbeli, mind spektrális felbontás terén[3,4], és ez néhány új kérdést vetett fel a kutatásaimban. A általam korábban felállított modellek bár jó közelítéseit adják az ionizált felhők teljes spektrumának, azonban szükséges volt a felületi fényesség eloszlás leírásával is kibővíteni a számításaimat ahhoz, hogy a JWST műszereinek jövőben lehetséges eredményei ezzel a modellel megmagyarázhatóak legyenek.

Bár első körben a számításaimat a reionizáció kora előtti kvazárok körüli buborékokra alkalmaztam a modellek használhatóak ennél közelebbi objektumokra is. A Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE) teleszkóp segítségével sikerült kimutatni, hogy $z = 3 - 4$ vöröseltolódásnál található kvazárok körül mindig megfigyelhetőek Lyman-alfa vonalban világító úgynevezett Lyman-alfa felhők.[5,6] Ezzel a megfigyeléssel konzisztens a központi sugárzás által ionizált buborékok fluoreszencia sugárzásának elmélete, így az eredményeimet érdemes volt összevetni ezekkel a megfigyelésekkel is.

2 Aktuális félév kutatási eredményei

A kezdeti modell, aminek a segítségével a kozmológiai méretű ionizált buborékok időbeli fejlődését és várható spektrumát vizsgáltam, teljesen homogén és izotróp környezetet feltételez, valamint az ionizáló forrás izotróp sugárzását, tehát gömbszimmetriát. A csillagok által ionizált úgynevezett HII régiók esetén teljesen hasonló gömbszimmetria figyelhető meg, emiatt kapták az ilyen, pontforrás körüli ionizált régiók a Strömgren-gömb elnevezést.[1]

Ennek köszönhetően ez a leírás egy egydimenziós lineáris megközelítésre épül, amit a gömbszimmetriának köszönhetően bővíthetünk ki a háromdimenziós térre. A modell kezdeti paraméterei az ionizáló fotonok spektruma és intenzitása, az ionizálandó közeg sűrűsége és összetétele, valamint a távolság és az optikai mélység a megfigyelő és a buborék között. Ezek a

paraméterek határozzák meg a kialakult ionizált gömb méretét és látható spektrumát. A modell linearitásából adódóan első körben érdemes volt a vonalas spektrum teljes gömbre vonatkozó felbontás nélküli intenzitását ez alapján megbecsülni.

A modell pontosítására volt szükség, hogy a kapott Strömgren-gömb vonalas spektrumának kétdimenziós felületi fényesség eloszlása is leírható legyen. Egy szinte végtelen távoli megfigyelőpontot feltételezve, az adott irányból látható síkvetülete az intenzitásnak csak a gömb geometriájától függ. A buborék minden egyes térfogatelemének járulékat a szokásos kezdeti paraméterek mellett, melyeket a gömb egészében egységesnek tekinthetünk, a forrástól illetve a megfigyelőtől való távolsága határozza meg. A forrástól mért távolság az ionizáció mértékét befolyásolja, a megfigyelőtől mért távolság pedig hatással van az optikai mélység értékére valamint a vöröseltolódásra.

Ezek figyelembe vételével, és megfelelő irányú integrálással, tetszőleges paraméterek esetén megadható a spektrum kétdimenziós vetülete. Egy adott irányban mind az integrált intenzitás értéke, mind a vöröseltolódás mértékének alsó és felső határa a gömb belejéből érkező fotonokra így megadható. Ráadásul a teljes gömbre nézve az intenzitás és hullámhossz értékek pontosabban becsülhetőek így, mint a korábbi lineáris modell segítségével. Számításaimat első sorban Lyman alfa és Balmer alfa fotonokra fókuszáltam, mert ezen fotonokál várható, hogy a vöröseltolódott hullámhosszuk és az intenzitásuk a JWST érzékelési tartományába esik.

A JWST mérőműszerei között lesz a Near-Infrared Camera (NIRCam), a Near-Infrared Spectrograph (NIRSpec) és a Mid-Infrared Instrument (MIRI). A NIRCam, az elsődleges képalkotó eszköz a $0.6 - 5 \mu m$ hullámhossz tartományban. A NIRSpec alkalmas lesz közepes felbontású spektroszkópiára a $1 - 5 \mu m$, és kis felbontású spektroszkópiára a $0.6 - 1 \mu m$ intervallumokban. A MIRI az $5 - 28.3 \mu m$ hullámhossz tartományban lesz képes képalkotásra és közepes felbontású spektroszkópiára, valamint kis felbontású spektroszkópiára az $5 - 10 \mu m$ intervallumban.[3,4] A hidrogén Lyman-alfa vonalának hullámhossza $121.6 nm$, így a $z = 7 - 10$ távolságból érkező fotonok a $0.9 - 1.4 \mu m$ hullámhossz intervallumban lesznek "láthatóak", vagyis a NIRCam és NIRSpec érzékelési tartományában. A Balmer-alfa vonalhoz tartozó hullámhossz $656.3 nm$, ezért egy $z = 7 - 10$ távolságban kibocsájtott Balmer-alfa foton általunk mérhető hullámhossza $5.2 - 7.2 \mu m$ között mozog így beleesik a MIRI által mérhető intervallumba.

Bár a hullámhosszak megfelelnek, a tényleges detektálhatóságot az egyes mérőműszerek látószöge, felbontása és a várható jel/zaj arány határozza meg. A általam modellezett kozmológiai méretű ionizált régiók $z = 7 - 10$ távolságban található, $Q = 10^{56} - 10^{57} (1/s)$ intenzitású, és $t = 10^6 - 10^8 (yr)$ életkorú kvazárok körül helyezkednek el. Sztenderd ΛCDM kozmológiai modellt $((\Omega_\Lambda, \Omega_0, \Omega_b) = (0.7, 0.26, 0.04)$ és $H_0 = 72 km s^{-1} Mpc^{-1}$) és átlagos intergalaktikus sűrűséget feltételezve az őket körülvevő Strömgren-gömbök sugara az $1 - 10 Mpc$ nagyságrendbe esik, bár a galaxisok és kvazárok körül várható túlsűrűsödést is figyelembe véve ezek a méretek jelentősen csökkenhetnek. Tekintve az adott távolságokat és lehetséges méreteket, ezen buborékok $1' - 5'$ szögperc nagyságrendű látószög alatt lesznek láthatóak.

A MIRI-n található, kiterjedt területek közepes felbontására képes, négy darab "Integral Field Unit (IFU)" spektrográf mindössze $3'' - 7.7''$ látószög tartományt képes lefedni.[4] Így ennek segítségével csak a vizsgálni kívánt kozmológiai buborékok egy-egy kisebb szelete mérhető, például a központi galaxis körüli sűrűbb térfogatrész Balmer-alfa spektruma.

Ehhez hasonlóan a NIRSpec IFU egysége is csak $3'' \times 3''$ látószögterületet fed le, mely még mindig csak a buborék egy $10 - 100 kpc$ átmérőjű részének spektroszkópiái vizsgálatát jelenti. Azonban a NIRSpec egyedülálló módon rendelkezni fog egy úgynevezett "multi-object spectroscopy (MOS)" üzemmóddal is, melynek segítségével több száz célpont egyidejű spek-

truma vehető fel egy $3.6' \times 3.4'$ méretű látószög tartományban.[3,4] Ennek segítségével a vizsgált távolságokban akár Mpc méretű régiók nem folytonos, de kiterjedt területet lefedő spektroszkópai vizsgálata is lehetséges.

A részleges, illetve nem folytonos lefedettség miatt mindenképpen szükséges volt a felületi fényesség profil részletes modellezése. Ennek segítségével azonban már becsülhető tetszőlegesen megadott irányokban és látószögtartományokban a Lyman és Balmer spektrumvonalak erőssége. Természetesen az eredmények továbbra is függenek a kvazár és környezete kezdeti paramétereitől, a vizsgált térfogatelem látószögétől és a felületi vetületen elfoglalt helyzetétől, valamint a detektor típusától és üzemmódjától is. Ezeket az eredményeket, és a paraméterektől való függésüket szeretném egy tudományos cikkben részletesen körüljárni és összefoglalni még a James Webb Space Telescope várható indítása előtt.

A kozmológiai ionizált buborékok leírására felállított modell egy másik lehetséges felhasználását, és ezzel együtt a rendszer próbáját jelentheti a MUSE által megfigyelt Lyman-alfa felhőkkel való összevetés. Több hasonló eredmény közül érdemes kiemelni Borisova és Cantalupo egy 2016-os cikkét.[5,6] Ebben 17 rádiócsendes és 2 rádióhangos, $z = 3 - 4$ vöröseltolódásnál található kvazárt vizsgáltak a MUSE "integral field" spektrográffal, és minden esetben kimutatták olyan kiterjedt nebula jelenlétét, ami a Lyman-alfa vonalban világít. Legvalószínűbb lehetőségként jelölik meg, hogy ezt elsősorban a központi kvazárok ionizáló hatását követő rekombinációs folyamatok okozzák, bár felvetnek más lehetőségeket is.

Az O és B típusú forró csillagok körül megfigyelt ionizált Strömgren-gömbök létezése, valamint a kozmológiai megfelelőjükre alkotott modell eredményei is azt támasztják alá, hogy a kvazárok sugárzásának fluoreszens hatása mindenképpen szerepet játszik a látható Lyman-alfa spektrum kialakulásában. Ha feltesszük, hogy minden más hatás elhanyagolható, akkor az általam leírt modellt fordított irányú becslésre is használhatjuk. A mért spektrum alapján becsülhetjük a változók értékét, melyek korábban a kezdeti paramétereket jelentették. Ilyen például legelső megközelítésben az ionizáló sugárzás intenzitása és sűrűség átlagos eloszlása. Pontosabb megközelítéssel azonban illeszthető paraméter a sugárzás spektruma és a környező anyag összetétele is. Ha mindezek mellett a spektrális felbontást is figyelembe vesszük akkor háromdimenzióban is becsléseket tehetünk. Jellemezhetjük a galaxisközi anyag sűrűségének térbeli egyenetlenségeit, valamint tesztelhetjük mind az ionizáló forrás, mind a ionizált közeg izotrópiáját is.[7]

Az első körben kapott eredményeket kibővítve tervezem ezeknek a lehetőségeknek a minél részletesebb kidolgozását a MUSE által már megfigyelt Lyman-alfa felhők esetén. A jövőben természetesen érdeklődésre adhat okot a JWST által mérhető spektrumok hasonló célú elemzése is.

3 Tanulmányi tevékenységek

Ebben a félévben a "Csillagrendszerek dinamikája" tárgy keretein belül kettős és többes csillagrendszerek együttes mozgásának leírásáról tanultam. Az "Infrared astronomy II." elnevezésű tantárgy pedig az infravörös spektroszkópia csillagászati célú felhasználásának gyakorlati oldalával ismerttetett meg egy önállóan kidolgozandó példán keresztül.

4 Konferenciák és egyéb szakmai közéleti tevékenységek

A félév során számos az ELTE-n, a BME-n illetve a Wigner kutatóközpontban rendezett szemináriumon és szakmai programon vettem részt, a teljesség igénye nélkül ilyen például a "2017 Fúziós Plazmafizika Téli Iskola" valamint az Ortvay Kollokvium sorozat.

A nyár folyamán tervezek részt venni a Mafihe nemzetközi nyári iskoláján, melynek témája a gravitációs hullámok fizikája lesz. Valamint szeretném az eddigi eredményeimet egy poszteren bemutatni az "International Conference of Physics Students 2017" konferencián, amit idén az olaszországi Torinóban rendeznek meg.

5 Oktatási tevékenységek

A tavaszi félévben a harmadéves környezettudományi szakos hallgatóknak tartott Környezetfizikai Módszerek Laboratóriumi Gyakorlatok demonstrációjában segítettem. Az általam vezetett heti négy órás laborgyakorlat témája "Vizek tríciumtartalmának meghatározása" volt folyadékszcintillációs spektroszkópia segítségével.

6 Hivatkozások

[1] Donald E. Osterbrock "Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei" University Science Books 1989

[2] Gardner, J. P. et al. "The James Webb Space Telescope" Astrophysics in the Next Decade, ISBN 978-1-4020-9456-9. Springer Netherlands, 2009, p. 1

[3] Gnata, X.; Ferruit, P. "Algorithms to Model the Multi-Object Spectrograph JWST/NIRSpec Instrument" Astronomical Data Analysis Software and Systems ASP Conference Series, Vol. 394

[4] James Webb Space Telescope homepage jwst.nasa.gov

[5] Wisotzki, L. et al. "Extended Lyman α haloes around individual high-redshift galaxies revealed by MUSE" Astronomy and Astrophysics, Volume 587, id.A98, 27 pp.

[6] Borisova, E.; Cantalupo, S. et al.; "Ubiquitous Giant Ly α Nebulae around the Brightest Quasars at $z \sim 3.5$ Revealed with MUSE" The Astrophysical J., Vol. 831, I. 1, art. id. 39, 19 pp. (2016)

[7] Borisova, E.; Lilly, S.J. et al.; "Constraining the Lifetime and Opening Angle of Quasars using Fluorescent Lyman α Emission: The Case of Q0420-388" Astronomy and Astrophysics, Volume 587, id.A98, 27 pp.