

Kutatási beszámoló 2018 tavasz

ELTE TTK Fizika Doktori Iskola

KIS-TÓTH ÁGNES

Téma: Kozmológiai ionizált buborékok spektruma és struktúrája

Témavezetők: Frei Zsolt és Haiman Zoltán

1 Bevezetés

A témám a doktori képzés első két éve során a kozmológiai méretű, kvazárok és galaxisok által ionizált régiók modellezéséről szólt. Az univerzum első, nagy méretű csillagai, valamint a korai kvazárok és galaxisok által ionizált buborékok lehettek a felelősek a $z \sim 6$ körülre datálható reionizáció bekövetkezéséért, melynek során a galaxis közti tér anyagának túlnyomó része ionizálódott. A kozmológiai ionizált régiók kutatását az motiválta első körben, hogy a modellek segítségével megbecsüljük az ilyen, reionizáció kora előtti régiók vonalas spektrumát, elő sorban a Lyman és Balmer vonalaik általunk mérhető intenzitását.

Az alap modellben a csillagok által ionizált homogén és izotróp, hidrogént tartalmazó Strömgen-gömbök leírását módosítottam az eltérő ionizáló spektrum és átlagos anyagsűrűség, valamint a tőlünk vett nagy távolságok és az univerzum tágulásának figyelembe vételével. Később ezt a hélium jelenlétének modellbe illesztésével fejlesztettem tovább, valamint vizsgáltam az ionizált anyag sűrűségének átlagtól való eltéréseinek hatását, hiszen a galaxisok környezetében sűrűség-többlettel rendelkező régiók feltételezhetőek.

A James Webb Space Telescope frekvencia tartománya és érzékenysége miatt várhatóan alkalmas lesz ezen buborékok megfigyelésére, azonban problémát jelent, hogy a kiterjedt objektumok részletes lefedésére alkalmas "Integral Field Unit" eszköz látószöge viszonylag kicsi a nagyméretű, 1–10 Mpc nagyságrendű ionizált régiók lefedéséhez a nagy távolságuk ellenére is. A csak részleges lefedettség miatt fontos volt a várható intenzitás számítását az összintenzitás helyett a felületi fényességprofil megadására finomítani. A megfigyelhetőség mellett ez a módosítás jelentősen pontosítja a nebula által kibocsájtott Lyman és Balmer fotonok számának előrejelzését is.

A kvazárok körüli ionizált buborékok nem csak a reionizációt megelőzően várhatóak. Az elmúlt években a Very Large Telescope MUSE spektrográfjának segítségével $3 < z < 4$ közötti kvazárok körül sikerült megfigyelni kiterjedt Lyman-alfa felhőket. Ezek a megfigyelések arra ösztönöztek, hogy a modelletem a segítségükkel teszteljem és alakítsam tovább.

2 Aktuális kutatás

Elsősorban Borisova és Cantalupo 2016-ban publikált eredményeit vettem figyelembe, melyben 19 kvazár körül igazolták kiterjedt Lyman-alfa nebulák jelenlétét $z \sim 3.5$ távolságban a MUSE segítségével. A jelenség legvalószínűbb forrásának tekintik a galaxisközi anyag fluoreszcens sugárzását melyet a központi kvazár ionizáló sugárzása indukál, ez pedig azonos az általam modellezett folyamattal, így célszerűnek tűnt az eredmények összehangolása.

A gyakorlati eredmények párosítása az elmélettel azonban korántsem bizonyult egyszerű feladatnak és több fontos tényező újragondolására hívta fel a figyelmet. Egyik ilyen a központi forrás által ionizált anyag sűrűségeloszlásának kérdésére. Borisova és Cantalupo megfigyeléseinek egyik fontos eredménye volt az, hogy a vizsgált Lyman-alfa felületi intenzitás profil radiális átlagfüggvénye a központi forrástól távolodva egy $\sim r^{-1.8}$ hatványfüggvénnyel jellemezhető. Ez az eredmény egy radiálisan változó sűrűség profilt feltételez a kiválasztott kvazárok körül (ráadásul minden esetben azonos profilt) így az ionizált régió belsejének anyageloszlását nem tekinthetjük homogénnek.

Gronke és Bird egy 2017-es cikkben a MUSE által megfigyelt nebulákra reflektálva az Illustris programban szimulált kvazárok és galaxisok körüli Lyman-alfa sugárzó régiókat $z \sim 2$ vöröseltolódás mellett. A szimuláció eredményei jó összhangba állíthatóak a megfigyelésekkel. Ez számunkra is iránymutatást adott, hogy az Illustris szimulációban keressünk $\sim 10^{12} M_{Nap}$ tömegű galaxisokat, és illesszünk körülöttük lévő sűrűség eloszlásra megfelelő profilt.

Azonban az ionizált galaxis körüli anyag eloszlásának nem csak a radiális átlagsűrűsége a meghatározó. A MUSE által megfigyelt nebulák is alátámasztják azt a feltételezést, hogy az anyag eloszlását a sugár irányú gradiens mellett kisebb léptékű perturbációk is jellemzik. Ezért nem csak a forrástól mért r távolságtól függő átlagsűrűség profil: $\rho(r)$ érdekel minket, hanem egy adott r távolságnál az átlagos sűrűségtől való eltérést, tehát az anyag csomósodását jellemző úgynevezett "clumping factor": $C(r)$ is.

$$C(r) = \frac{\langle \rho(r)^2 \rangle}{\langle \rho(r) \rangle^2}$$

A központi forrás által ionizált régiókban a fotoionizációval az ionizációt követő rekombinációs folyamatok tartanak fent egyensúlyt. Bár a fotoionizáció mértéke a jelen lévő anyag sűrűségével arányos, azonban a rekombinációs ráta a sűrűség négyzetével. Emiatt válik fontos tényezővé a "clumping" mértéke. A korábbi számolásokban az anyag eloszlás perturbációit első megközelítésként elhanyagoltuk, azonban a már megfigyelt Lyman-alfa nebulák eredményeinek rekonstruálásához és így a jövőbeli megfigyelések előrejelzésének pontosításához szükség van rájuk.

Az Illustris szimulációt felhasználva a "clumping factor" értéke is becsülhető. A minél pontosabb $C(r)$ meghatározáshoz a képletben szereplő $\langle \dots \rangle$ átlagolás alatt nem csak azt értjük, hogy egy adott szimulált galaxis körül átlagolunk adott térszögben, rögzített r esetén, hanem, hogy hasonló méretű galaxisokra is átlagoljuk a kapott $C(r)$ értékeket. Bár várhatóan még az Illustris sem fogja tudni megadni az legjobb választ mert a gáz olyan kis léptékeken is fluktuál, mely meghaladja a szimuláció felbontását. Emiatt elképzelhető, hogy a jövőben szükség lesz még a "clumping factor" további finomítására, azonban a Gronke és Bird (2018) eredményei azt mutatják, hogy az Illustris felbontásának nagyságrendje elegendő a MUSE eredmények illesztéséhez

A MUSE segítségével megfigyelt és az Illustris szimulációban kapott Lyman-alfa felhők eredményeinek hatására úgy döntöttünk, hogy új alapokra kell helyeznünk egy másik fontos tényező, a radiatív transzfer folyamatok leírását is. Hagyományos csillagok körüli Strömgren-gömbök vonalas spektrumának becslésére az egyik alap ötlet az úgynevezett "Case A" eset, mely optikailag átlátszó nebulát feltételez, vagyis azt, hogy a rekombinációt követő kaszkád folyamatokban keletkező karakterisztikus fotonok akadálytalanul szöknek el a régióból. A másik szélsőséges feltételezés a "Case B" eset, amikor feltesszük, hogy a nebula optikailag olyan sűrű, hogy a kibocsájtott Lyman fotonok a keletkezési helyükhöz közel mind elnyelődnek. Persze az igazság legtöbbször valahol a kettő között van és a szökési valószínűség:

$$0 < P_{esc} < 1$$

A Lyman fotonok látóirányunkba vett optikai mélységét az ionizált régió egy adott pontján a semleges hidrogén oszlopsűrűsége adja meg. A szökési valószínűség becslésére én azt a megközelítést használtam korábban ami egy adott pontban kisugárzott fotonra úgy tekint, mintha egy, az optikai mélységének megfelelő konstans optikai sűrűségű gömb belsejéből próbálna kijutni. Azonban arra jutottunk, hogy a kvazárok körüli nagy méretű és inhomogén nebulák esete ennél részletesebb radiatív transzfer leírást igényel ha szeretnénk a Borisova és Cantalupo által apott eredményeket ezzel a modellel értelmezni. A Gronke és Bird által használt Monte Carlo módszer tűnik helyette ígéretesnek, melyet az Illustrisban szimulált Lyman-alfa felhők esetében már kipróbáltak.

Az elmúlt időszak észleléseinek és a szimulált Lyman-alfa felhők eredményeinek hatására sok szempontból alapjaiban kellett átértékelnünk és újragondolnunk a kozmológiai ionizált buborékok kutatását. Az összetett szimulációk technikai fejlődése ráadásul azt a kérdést is felveti, hogy egy, az összképből kiemelt és jól definiált folyamatot leíró egyszerűbb modell tud-e érdemben hozzájárulni a teljes kép megértéséhez. Mindezek miatt az eredményeink tudományos folyóiratban történő publikálása eltolódott az eredetileg tervezetthez képest, de természetesen nem véglegesen. Arra a megállapításra jutottunk, hogy bár sok szimuláció van már, melyek az univerzum működésének megértését segítik, de ezekben a rendszer összetettsége miatt az egyes folyamatokban ténylegesen meghatározó mechanizmusok nem mindig követhetőek és értelmezhetőek részleteiben, ezért létjogosultsága van az olyan modelleknek is, ahol specifikusan egy-egy konkrét jelenség működését és hatásait írjuk le, még akkor is, ha közben esetleg más hatásokat elhanyagolunk.

A terv amit végül megfogalmaztunk a születő publikációhoz magában foglalja az ionizálandó anyag sűrűségprofiljának és a keletkező karakterisztikus fotonok szökési valószínűségét meghatározó radiatív transzfer folyamatoknak a részletesebb kidolgozását, ahogy azt ebben a részben leírtam. Ezekkel a módosításokkal a végső cél lépései:

A központi forrás bekapcsolása után, ahogy eddig is, kiszámolni az ionizációs profilt, n_{HI} , n_{HII} , n_{HeI} , n_{HeII} , n_{HeIII} részecske-számsűrűségek értékeit a forrástól vett r távolság függvényében. Ezek alapján kiszámolni a Lyman-alfa, Balmer-alfa, Lyman-béta, Balmer-béta vonalak fluxusát, figyelembe véve a nem elhanyagolható optikai mélységet. Megadni a felületi fényesség profilokat és annak radiális átlagfüggvényét.

A fentieket meg lehet csinálni $z = 2 - 4$ valamint $z = 7 - 10$ körüli buborékokra is. Az első esetben az lenne a cél, hogy a Gronke és Bird (2018) cikk Illustris szimulációban kapott eredményeit leredukáljuk egy egyszerűbb modellre, melyben a fotoionizációt követő fluoreszcens folyamatok jobban átláthatóak. Valamint a kapott eredményeket összevessük Borisova és Cantalupo (2016) MUSE megfigyelésekből levont következtetéseivel, külön tekintettel az általuk bemutatott hatványfüggvényvel jellemezhető radiális felületi fényesség profillal.

A második esetben a cél, hogy kiszámoljuk a profilokat, és megbecsüljük, hogy a JWST-vel milyen észleléseket várhatunk. Kiterjedt objektumok megfigyelésére alkalmas IFU módban mekkora részét fedhetjük le ezeknek a buborékoknak, várhatunk-e, és ha igen a forrás mekkora környezetében szignifikáns jelet. Valamint, hogy egy nebula számunkra látható mérete hogyan függ a felületi fényesség intenzitásának általunk mérhető alsó határától. Ebben az esetben azonban figyelembe kell vennünk, hogy a $z = 2 - 4$ esettel ellentétben itt a Lyman-alfa fotonok miután kirepülnek a buborékból belépnek a teljesen semleges (nem ionizált) galaxisközi anyagba, ezért nem elhanyagolhatóak a buborékon kívüli radiatív transzfer folyamatok sem.

Az újratervezésnek köszönhetően az új alapokról építkező számolásoknak még nem sikerült a végére érniük, a publikáció befejezését így a nyár folyamán tervezzük.

3 Tanulmányi tevékenységek

A negyedik szemeszter alatt a Tóth L. Viktor által tanított "Intersztelláris anyag fizikája" tantárgy keretein belül a Galaxisunkban található csillagközi anyag fázisairól, perturbációiról, termális folyamatairól, valamint megfigyeléséről tanultam. Szegő Dávidnál a "Fizika és geometria" tárgyat végeztem, ami a téridők fizikájának matematikai megalapozásával foglalkozott. Emellett belehallgattam Vasúth Mátyás "Általános relativitáselmélet 2." óráiba is.

4 Konferenciák

Júniusban a Eötvös Loránd Fizikai Társulat által létrehozott "Fizikus Doktoranduszok Hetedik Országos Konferenciáján" fogok előadást tartani a kutatási eredményeimről. Augusztusban pedig hasonló, de természetesen angol nyelvű előadással készülök az idén Helsinkibe költöző "International Conference for Physics Students 2018" konferenciára is.

5 Szakmai közéleti tevékenységek

Az őszi félévhez hasonlóan ebben a szemeszterben megint részt vettem az "Atomoktól a csillagokig" tudományos ismeretterjesztő előadás sorozat szervezésében. A kéthetente megtartott előadásokat követő kísérletek demonstrátora voltam. Az áprilisban országosan megrendezett "A fizika mindenkié" programsorozat keretein belül a Lágymányosi kampuszon megtartott esemény megszervezésében és előkészítésében segítettem a Mafihe munkáját.

6 Elismerések

Idén először Magyarországon is megrendezésre került a Famelab tudománykommunikációs verseny. Az áprilisi előválogatón, majd az azt követő elődöntőn túljutva sikerült bekerülnöm a 12 fős döntős csapatba. A verseny keretein belül részt vehettünk egy hétvégi kommunikációs mesterkurzuson. A májusban megtartott országos döntőn első helyezést értem el, így én képviselhetem Magyarországot június elején Angliában a "Cheltenham Science Festival" alatt megrendezésre kerülő nemzetközi döntőn.

7 Hivatkozások

- [1] 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)
- [2] Gronke, M.; Birde, S. "Giant Lyman-alpha Nebulae in the Illustris Simulation" *The Astrophysical J.*, Vol. 835, I. 2, art. id. 207, 9 pp. (2017)
- [3] Hutter, A. "The accuracy of seminumerical reionization models in comparison with radiative transfer simulations" *MNRAS*, Volume 477, Issue 2, p.1549-1566 (2018)
- [4] Vogelsberger, m. et al. "Introducing the Illustris Project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the Universe" *MNRAS* 444, 1518–1547 (2014)
- [5] Alam, S. M. Khairul; Miralda-Escudé, Jordi "Self-Absorption of Ionizing Radiation and Extended Narrow-Line Emission in High-Redshift Quasi-stellar Objects" *The Astrophysical J.*, Vol. 568, I. 2, pp. 576-580. (2002)
- [6] Haiman, Z.; Rees, Martin J. "Extended Ly α Emission around Young Quasars: A Constraint on Galaxy Formation" *The Astrophysical J.*, Vol. 556, I. 1, pp. 87-92. (2001)
- [7] Loeb, A.; Rybicki, G. B. "Scattered Ly α Radiation around Sources before Cosmological Reionization" *The Astrophysical J.*, Vol. 524, I. 2, pp. 527-535 (1999)