

Kutatási beszámoló 2017 ősz

ELTE TTK Fizika Doktori Iskola

KIS-TÓTH ÁGNES

Téma: Kozmológiai ionizált buborékok spektruma és struktúrája

Témavezetők: Frei Zsolt és Haiman Zoltán

1 Bevezetés

A kutatási témám a kozmológiai ionizált buborékok spektrumának és struktúrájának megértése, modellezése, valamint ezen modellek alkalmazása megfigyelt Lyman-alfa felhők esetére. Korábbi munkám során a forró csillagok által ionizált H II régiók elméletét alapul véve és a szükséges módosításokkal ellátva alkottam modellt a kozmológiai méretű, kvazárok és galaxisok által ionizált nebulák esetére. A rendszer paramétereit, az ionizáló forrás spektruma és intenzitása, életkora és z vöröseltolódása, valamint a forrást körülvevő nebula összetétele és sűrűségeloszlása tetszőlegesen megválasztható, és kiszámolható a kialakuló ionizált buborék mérete, struktúrája és az általunk megfigyelhető várható vonalas spektruma. A jövőben a JWST segítségével remélhetően távoli, reionizáció kora előtti ($6 < z$) kozmológiai buborékok megfigyelésére és megértésére is felhasználhatóak lesznek ezek az eredmények, azonban jelenleg még csak közelebbi kvazárok ($z < 4$) körül tudunk megfigyelni Lyman-alfa felhőket. A korábban leírt modell felhasználására és tesztelésére azonban ez egy jó alapot ad. A félév során azon dolgoztam, hogy Cantalupo, Borisova et al. 2016-os cikkében bemutatott Lyman-alfa nebulák eredményeit és a kozmológiai ionizált buborékok modelljét összekapcsoljam.

2 Aktuális eredmények

Még nem tekinthetjük teljesen biztosnak, hogy a kvazárok körül megfigyelt kozmológiai méretű nebulák Lyman-alfa sugárzásának egyetlen kiváltó oka a központi kvazár sugárzásának fluoreszencia hatása. Azonban az OB csillagok körüli Strömgren régiók elméletének sikeressége arra utal, hogy a forrás ionizáló hatását követő rekombinációs folyamatok részét képezik a jelenségnek. Az én célom az volt, hogy megvizsgáljam milyen következtetésekre juthatok a modellem segítségével, ha felteszem, hogy elhanyagolható bármilyen más hatás, ami a nebulák Lyman-alfa kibocsátásáért felelős lehet. Ezzel a feltevessel élve szerettem volna az ionizált buborékok spektrumának modelljét megfordítani. Tehát a korábbi eredmények, mint a sugárzás intenzitása, a fluoreszencia nebula mérete és szerkezete lettek a kezdeti paraméterek és a modell korábbi meghatározó feltételei, mint a nebula sűrűségeloszlása és az ionizáló forrás intenzitása és életkora lettek az értékek melyekre becslést szeretnénk adni.

A Strömgren-gömbök modelljének egyik fontos eredménye, hogy amikor egy központi forrás a környezetét ionizálja, akkor minden időpillanatban a forrás egy adott sugarú környezetében az felhő szinte tökéletesen ionizált, az adott sugáron kívül azonban teljesen semleges. Az ionizált régió belsejében az egységnyi térfogatra jutó Lyman-alfa intenzitás csak az ionizált hidrogén mennyiségétől függ, ami viszont így megegyezik a jelenlévő teljes hidrogén mennyiségével. Tehát az általunk megfigyelhető sugárzás összintenzitása kizárólag a nebulában

található hidrogén összmenyiségétől függ, a felületi fényesség profil pedig a hidrogén térbeli eloszlásának a látóirányunkra vett merőleges vetületétől.

Korábbi eredményeim alapján első körben feltehető, hogy a vizsgált ionizált felhőkben a Balmer fotonok elnyelődése elhanyagolható, azonban a Lyman fotonoké nem. Emiatt az egységnyi térfogatból elszökni képes Lyman-alfa fotonok száma egy olyan egyenletrendszerrel írható le, ami nem csak az ionizációt követő rekombinációs folyamatok valószínűségeit veszi figyelembe, hanem a Lyman fotonok elnyelődésének és ennek hatására bekövetkező foton kibocsátások valószínűségeit is. A számításokat könnyíti, hogy az egyenletrendszer a hidrogén sűrűségének négyzetére nézve lineáris, így levezethető, hogy egy adott térfogat egységéből elszökő Lyman fotonok száma (E_{L_α}) arányos a helyi sűrűség (N_H) négyzetével:

$$E_{L_\alpha} = E_{L_\alpha,0} \cdot (N_H)^2$$

$E_{L_\alpha,0}$ az egységnyi hidrogén sűrűség esetén kibocsátott Lyman-alfa fotonok száma. Ennek értéke a modell alapján megadható, azonban nehézséget jelent, hogy függ a Lyman-alfa fotonok optikai mélységétől, ami térfogategységről térfogategységre változik a nebula belsejében. Az optikai mélység értéke:

$$\tau(\lambda_m, z_f) = \int_{z_0}^{z_f} dz c \frac{dt}{dz} N_{H^0}(z) \sigma \left(\frac{\lambda_m}{1+z} \right)$$

ahol λ_m a mért hullámhossz és z_f a forrás vöröseltolódása. Látható, hogy az optikai mélység értéke függ a vizsgált térfogategység és megfigyelő közötti látóirányban a semleges hidrogén oszlopsűrűségétől. A nebula belsejében a semleges hidrogén mennyisége megadható, a központi forrástól távolodva a távolság négyzetével arányosan nő, bár végig nagyon alacsony marad. Az ionizált felhő közvetlen környezetében jelen lévő semleges hidrogén mennyisége nehezebben becsülhető. A reionizáció kora óta a galaxisközi tér ionizáltnak tekinthető, azonban sűrűbb helyeken, például a kvazárok, galaxisok környezetében a rekombinációs folyamatok felülkerekedhetnek az ionizáción. Még ha fel is tesszük, hogy újabb ionizációs hatás nincs jelen az adott helyen, a hidrogén sűrűségének eloszlására szükség van a kvazár környezetében a semleges hidrogén oszlopsűrűségének számolásához.

Az optikai mélység értékét a semleges hidrogén mennyiségén kívül befolyásolja az ionizált nebula fizikai mérete valamint z vöröseltolódása is, ugyanis ilyen távolságoknál a Lyman-alfa fotonoknak az univerzum tágulása miatt bekövetkező vörösödését is figyelembe kell vennünk. Ez azonban előnyünkre van, mert amikor a Lyman-alfa fotonok hullámhossza megnő, az energiájuk lecsökken és már nem nyelődhetnek el a semleges hidrogének által.

Magának az ionizált régióknak a mérete három paramétertől függ. Az ionizáló forrás intenzitásától és életkorától, valamint a forrás környezetének sűrűségeloszlásától. Legegyszerűbb megközelítésben, gömbszimmetriát, izotróp forrást és átlagos sűrűségeloszlást feltételezve az ionizált Strömgren-gömb sugara megbecsülhető:

$$R(Q, t_Q, N_H) = \left(\frac{3 \cdot Q \cdot t_Q}{4\pi \cdot N_H} \right)^{\frac{1}{3}}$$

A forrás intenzitása, pontosabban ami számunkra szükséges, a forrás által egységnyi idő alatt kibocsátott ionizáló fotonok száma, a forrás megfigyelt spektruma alapján becsülhető. A mért Lyman-alfa spektrum alapján a nebula sűrűségeloszlását becsülhetjük és ezzel együtt az átlagos sűrűséget is. Így ezek segítségével első körben az ionizáló forrás életkorára is tudunk egy közelítő értéket adni.

Természetesen a modell bonyolultsága és pontossága számos dologtól függ. Csak hidrogén jelenlétét feltételezzük, vagy a hélium részvételét is figyelembe vesszük. Feltételezzük-e, hogy a forrás izotróp, a rendszer gömbszimmetrikus vagy keresünk ettől való eltérésre utaló jeleket. Átlagos sűrűséget használunk a nebulában, vagy figyelembe vesszük a sűrűség térbeli eloszlását és változását akár a forrástól való távolság függvényében, akár még pontosabban a látóirányunkra vett merőleges síkbeli vetület mentén nem csak radiálisan, hanem azimutálisan is. Ezek a lehetőségek számos vizsgálandó területet nyitnak meg számunkra, a félév során én megpróbáltam minél több oldalról megközelíteni a kérdést, és megtalálni a megfigyelt nebulákra ebben a modellben legjobban illeszkedő paramétereket.

A MUSE segítségével Borisova és Cantalupo által megfigyelt nebulák között 17 rádió csendes és 2 rádió hangos kvazár körüli régió kapott helyet. Minden esetben a tapasztalat az volt, hogy a központi kvazár környezetében Lyman-alfa sugárzó felhők találtak. A nebulák első megközelítésben centrálisan szimmetrikusnak tekinthetők, főleg a kisebbek esetén, mert a nagyobbaknál kivehető összetettebb, filamentumos belső szerkezet is. Tehát első megközelítésben a rendszer izotrópikusságának feltevése mindenképpen indokolt.

Általánosságban még elmondható, hogy látszólag nincs különbség a rádiócsendes és rádió hangos források körüli nebulák között. A megfigyelt Lyman-alfa felhők mérete $100 - 300 \text{ kpc}$ között változik, a luminozitásuk pedig a $10^{36} - 10^{37} \text{ J/s}$ nagyságrendbe esik. Érdekes viszont, hogy a centrumtól való távolság függvényben megadott átlagos felületi fényesség profil minden esetben teljesen hasonló alakot ölt, függetlenül a felhő méretétől, morfológiájától, luminozitásától. Az átlagos felületi intenzitás a központi forrástól távolodva egy ≈ -1.8 kitevőjű hatványfüggvényel jellemezhető. A tény, hogy minden vizsgált nebula felületi intenzitása radiálisan hasonlóan változik arra utal, hogy hasonló mechanizmus áll a sugárzás hátterében minden esetben.

Mint korábban már írtam, adott helyen a Lyman-alfa vonalban kisugárzott intenzitás ebben a modellben csak az ott jelenlévő hidrogén mennyiségétől függ, az általunk mérhető intenzitás pedig az adott hely és közöttünk megtalálható semleges hidrogén mennyiségétől. Ezért ha továbbra is feltesszük, hogy központi kvazár fénye okozta ionizációt követő rekombinációs folyamatok jelentik a sugárzás fizikai hátterét, akkor ez azt jelenti, hogy a radiális felületi fényességet a radiális sűrűség profil határozza meg.

Ha konstans sűrűséget feltételezünk a nebula teljes térfogatában, a radiális fényesség profil csak az ionizált gömb geometriájától függ. Bár a centrumtól távolodva valóban csökken a felület intenzitás, de $\sim \sqrt{R^2 - r^2}$ szerint (ahol r a központtól mért távolság és R a nebula sugara) és nem $\sim r^{-1.8}$ függvény szerint. Tehát mindenképpen érdemes a modellben a hidrogén sűrűségét nem konstansnak tekinteni, hanem figyelembe venni a sűrűség eloszlásának radiális változását. Bár több nebulánál megfigyelhető a felületi fényesség profilban összetett, filamentumos szerkezet is, ami a hidrogén eloszlásának komplexebb szerkezetére utal, vagyis arra, hogy nem csak radiális irányban érdemes a sűrűség változásait figyelni, azonban ez látszólag elég egyedi az egyes nebulákra nézve. Viszont a radiális felületi fényességprofilok hasonlósága arra utal, hogy a sűrűség sugár irányú megváltozása nem egyedi, hanem jellemző tulajdonsága a kvazárok körüli régióknak.

Jelenleg szeretném megtalálni azt a radiális sűrűségprofilot aminek a segítségével a legjobban visszakapható a megfigyelt Lyman-alfa felhők radiális felületi fényesség profilja. A legjobban illeszkedő függvény megtalálásával a kozmológiai ionizált buborékokra felállított általános modell nem csak a már megfigyelt nebulák eredményeire illeszthető majd rá jobban, de pontosabb előrejelzést ad a jövőben a JWST-vel reményeink szerint megfigyelhető távoli, reionizáció kora előtti ionizált régiók várható spektrumára is. Terveim szerint mindez a korábbi eredményeimmel együtt egy tudományos cikkben lesz a közeljövőben összefoglalva.

3 Tanulmányi tevékenységek

Az őszi félévben a fekete lyukak fizikájáról tanultam. Ebben benne szerepelt a fekete lyukak elméletének megalapozása az általános relativitás elmélet oldaláról, naptömegű és szupermasszív feketelyukak keletkezésének leírása, az aktív galaxis magok vizsgálata valamint a fekete lyukak mint gravitációs hullámforrások modelljeinek és eredményeinek összefoglalása. Emellett hallgattam órákat az algebrai térelméletről. Ezek az alkalmak betekintést engedtek a részecskefizikában használt térelmélet matematikai megalapozásába.

4 Konferenciák és egyéb szakmai közéleti tevékenységek

A nyár folyamán részt vettem az "International Conference of Physics Students 2017" konferencián, amit az olaszországi Torinóban rendeztek meg. A konferencián a saját kutatási eredményeimet két alkalommal mutathattam be egy poszter segítségével.

A félévben megint alkalmam nyílt segíteni az European Physics Society fiatalokat támogató szervezetének hazai képviselőjében a Budapest Young Minds Section munkáját. Az egyik általuk támogatott rendezvénynek, a 2017-es Kutatók éjszakája keretein belül megrendezett "Interaktív Fizika Kísérletek" eseménynek a kísérletekért felelős szervezője és előadója is voltam. Emellett a Náboj nemzetközi fizikaverseny magyarországi fordulójának megszervezését és lebonyolítását vállaltam el. A versenyen 150 hazai középiskolás számára tudtunk lehetőséget biztosítani egy érdekes és országokon átívelő megmérettetéshez.

A 2017-18-as évadban becsatlakoztam az "Atomoktól a csillagokig" előadássorozat szervező csapatába is. Így most ősszel én tartottam a kéthetente megrendezésre kerülő előadásokat követő kísérleti bemutatókat. Egy másik fizikát népszerűsítő rendezvényen, az "ÁzsiaCenter Kozmosz Kalauz"-on pedig a kísérletekért felelős demonstrátor voltam.

5 Oktatási tevékenységek

A félév során környezettudományi szakos hallgatóknak tartottam Vektorszámítás gyakorlatot. A gyakorlat célja a hallgatók megismertetése volt az elemi vektorműveletekkel és felhasználási lehetőségeikkel, a mátrixalgebra alapjaival, általános lineáris egyenletrendszerek megoldhatóságával, valamint az óra bevezetést jelentett a vektorterek elméletébe. A gyakorlatot előadás nem kísérte így az óráknak az elméleti megalapozás is részét képezte.

6 Hivatkozások

- [1] Donald E. Osterbrock "Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei" University Science Books 1989
- [2] 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
- [3] 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.
- [4] 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)
- [5] Vanzella, E.; Balestra, I. et al.; "Illuminating gas inflows/outflows in the MUSE deepest fields: Ly α nebulae around forming galaxies at $z \approx 3.3$ " MNRAS, Vol. 465, I. 4, p.3803-3816 (2017)
- [6] Cai, Z.; Fan, X.; "Discovery of an Enormous Ly α Nebula in a Massive Galaxy Overdensity at $z = 2.3$ " The Astrophysical Journal, Vol. 837, I 1, art. id. 71, 11 pp. (2017)