

2017/2018/2

Féléves beszámoló

Kovács Orsolya Eszter, PhD hallgató

Fizika Doktori Iskola, Részecskefizika és csillagászat program

Témavezető: Vida Krisztián, MTA CSFK KTM CSI
Társ-témavezető: Forgácsné Dajka Emese, ELTE TTK

2018. június

A félévet Cambridge-ben töltöttem, kutatásomat a Harvard–Smithsonian Center for Astrophysics pre-doktori programjának keretei között folytattam Bogdán Ákos irányításával. Jelen félév végére befejeztem az itt megkezdett kutatást, melynek eredményeit cikkbe foglaltam, amit a *The Astrophysical Journal* referált folyóiratba küldök be június végéig.

A kutatásom témáját a hiányzó barionos anyag problémája adja. A hiányzó anyag feltárását a röntgensillagászat eszközeivel, spektroszkópiai vizsgálatokkal kíséreltem meg.

Barioncenzus: A lokális ($z < 2$) Univerzum közvetlenül megfigyelhető (barionos) anyagának tömegét összegezve arra az eredményre jutunk, hogy a barionos anyagnak csak a $\sim 2/3$ -ával tudunk elszámolni, míg a korai Univerzumban ez a hiány nem állt fenn. A korai Univerzum barionos anyagának tömeghányada alapvetően két független módszerrel becsülhető meg: a primordiális nukleoszintézissel kapcsolatos ismereteink segítségével, valamint a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás anizotrópiáinak vizsgálatával.

Közvetlenül az Ősrobbanás után, az elsődleges nukleoszintézisben keletkeztek az Univerzum könnyebb elemei, mint a hidrogén, deutérium, hélium és lítium. Ezen primordiális elemek relatív aránya erősen függ a barionos anyag akkori tömegsűrűségétől. Felmérve a lokális Univerzumban ezen elemek arányát következtethetünk a barionok akkori tömegsűrűségére. Ezenkívül a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás spektrumában is megjelenik a fotonok barionokkal való kölcsönhatása anizotrópiák formájában, melynek részletes elemzéséből szintén következtethetünk a korai Univerzum bariontartalmára. Mindkét módszer azt adja, hogy a barionos tömegsűrűség értéke $\Omega_b h^2 \approx 0.022$, amely eredmény $\sim 30\%$ -os barion-deficithez vezet a lokális Univerzumban.

A hiányzó barionok problémájának elméleti feloldása: Általánosan elfogadott az elmélet, miszerint a hiányzó barionos anyag jelenleg olyan formában létezik, amelyben még a legmodernebb csillagászati eszközök sem képesek egyértelműen kimutatni: forró, kis sűrűségű gáz formájában. Ennek lehetséges legfőbb forrása az ún. WHIM (Warm-Hot Intergalactic Medium), a galaxisközi térben húzódó, nagyskálájú (\sim több száz Mpc), szálas szerkezetű anyagkoncentrátumok, amelyek a sötét anyag eloszlását követik. Kutatásom eredménye épp ezt az elméletet erősíti.

Gyakorlati módszerek: A galaxisközi teret behálózó WHIM-filamentumok feltérképezése a jövő röntgensugárzásának egyik fontos célkitűzése. Ugyan UV tartományban detektálásuk nem újdonság, a WHIM-et alkotó anyag jelentős hányada olyan forró ($> 5 \times 10^5$ K), hogy sugárzása a röntgentartományba esik. A röntgenműszerek azonban – érzékenységüket és spektrális felbontóképességüket tekintve – jóval elmaradnak az UV műszerektől. Számos kutatás kísérlete meg a röntgengáz kimutatását, ám mindezidáig – néhány (sokszor vitatott) kivételtől eltekintve – meggyőző eredmény nem született. Tekintettel a forrás kis sűrűségű, s ezáltal halvány természetére az emisszós spektrum felvétele nem célravezető. Bevett szokás ehelyett a röntgengáz abszorpciós vonala után kutatni fényes háttérobjektum (pl. AGN) spektrumában. Szimulációk alapján kimutatták, hogy a WHIM-et alkotó röntgen hőmérsékletű gázban a leggyakoribb fém (héliumnál nehezebb elem) az oxigén, ezen belül az O VII ion, melynek hullámhossza $21,602\text{\AA}$, valamint az O VIII ion, melynek hullámhossza $18,9671\text{\AA}$. A kutatások ezért elsősorban ezen ionok detektálását tűzik ki célul. Az UV tartományban végzett Ly- α - és O VI-mérések alapján számos AGN látószögében fedeztek fel abszorpciós rendszereket, melyek pontos természete nem, de vöröseltolódása ismert. A munkám során ilyen előtér-rendszerekből származó abszorpciós vonalakat kerestem az O VII hullámhosszán.

Módszerünk sajátosságát az adja, hogy az abszorpciós rendszereket nem egyenként veszem figyelembe, hanem egy adott látószögében lévő rendszerek összegét vizsgálom, ezáltal drasztikusan növelve a jel-zaj arányt. Ehhez a spektrumok, illetve a spektrumhoz tartozó ARF és RMF fájlok kékeltozására, majd összeadására van szükség. Ezeket a mintánkra az előző félévben végeztem el, míg az eredmények kiértékelésére, illetve a végkövetkeztetések levonására jelen félévben kerítettem sort.

Eredmények: Több különböző AGN-látószög feltárása után a hangsúlyt végül a H 1821+643 jelű kvazárra fektettem. A fényes röntgenforrás előterében megelőzőleg számos abszorpciós rendszert azonosítottak, melyek közül többet sikerült kapcsolatba hozni hasonló vöröseltolódású galaxisokkal. Az ezeken a vöröseltolódásokon lévő rendszerek összegzéséből sikerült 3.3σ statisztikai szignifikanciával O VII ion abszorpciós vonalát kimutatnom. Az abszorpciós vonal ekvivalens szélességére $4.1 \pm 1.3 \text{ m\AA}$ adódott, melyből az O VII oszlopsűrűsége $1.4 \pm 0.4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. A detektált jel 17 olyan rendszer összegéből származik, melyek esetén az asszociált galaxisok nagytömegűek ($> 10^{10} M_{\odot}$), ami konzisztens azzal a képpel, amely szerint nagytömegű galaxisok kizárólag filamentumokban helyezkednek el. (Ezzel szemben a közepes és alacsony tömegű galaxisok előfordulnak filamentumokon kívül is.) A galaxisok tömegét a FAST csillagpopuláció-szintézis kód segítségével számítottam ki, az ehhez szükséges többszín-fotometriai adatokat az *SDSS*-ből kértem le.

Adott hőmérsékletű és sűrűségű röntgengázban, habár kisebb hányadban, de természetesen előfordulnak az oxigénnek egyéb ionizációs állapotai is, mint például az O VIII vagy az O VI. Mivel ezek egymáshoz viszonyított aránya a hőmérséklet és a sűrűség erős függvénye, mérésükből következtethetünk a megfigyelt anyag fizikai állapotára. Az O VI ion átlagos oszlopsűrűsége a H 1821+643 látószögében lévő rendszerekre UV mérésekből már ismert. Az O VIII ion hullámhossza a röntgentartományba esik, ám észlelhető abszorpciós vonalat nem hagyott az AGN spektrumában. Mindezek ellenére felső korlátot a detektor érzékenységének figyelembe vételével tudam rá számolni. Ezen adatok mellé a *Cloudy* spektrum-szintézis kód segítségével különböző hőmérsékletekű és sűrűségű plazmákat szimuláltam rögzített fémesség és méret mellett, mellyel kiegészítve a mérési adatokat a detektált anyag átlagos fizikai jellemzőit (pl. hőmérséklet, sűrűség, különböző elemek ionizációs foka stb.) becsültem meg.

Az abszorpciós rendszerek fizikai jellemzőin kívül azok természetére is kíváncsiak vagyunk. Itt fontos megemlíteni, hogy a hiányzó barionok problémája mind globálisan, mind pedig lokálisan, azaz az egyes galaxisokban is fennáll. Mindkét esetben a sötét anyag által keltett potenciálgödörbe történő behullás alkalmával fűtődik fel a „hiányzó” anyag UV-, valamint röntgenhőmérsékletre, részecskeütközések révén. A H 1821+643 látószögébe eső abszorpciós rendszerekhez társított galaxisok vetített távolsága az AGN-től ismert, átlagos értéke $\sim 700 \text{ kpc}$. Mivel ez az érték jóval meghaladja a galaxisok jellemző viriál sugarát ($150 - 200 \text{ kpc}$), feltételezhető, hogy a mintám nem galaxisok halóját, hanem a galaxisokat összekötő WHIM-filamentumokat reprezentálja, így az észlelt O VII abszorpciós vonal is ezekből eredhet. A WHIM-filamentumok térbeli eloszlása egyelőre rejtély, ám szimulációkból modellezhető, hogy tetszőleges látószögben, adott távolságon belül, illetve adott O VII oszlopsűrűség mellett, hány ilyen képződmény létezhet. Az H 1821+643 látószögében detektált O VII vonalat egy átlagos filamentumhoz rendelve és összehasonlítva az elméleti jóslatokkal azt kaptam, hogy az eredményem összhangban van azzal a képpel, melyben a hiányzó barionos anyag a WHIM-filamentumokban halmozódott fel az Univerzum fejlődése során.

Kitekintés: A jelenlegi röntgenműszerek érzékenysége kevésbé alkalmas a ritka ($n \lesssim 10^{-5} \text{cm}^{-3}$), forró ($T \gtrsim 10^5 \text{K}$) gáz kimutatására az O VII hullámhosszán, ahonnan a legprominensebb jelet várjuk, és ami feloldhatja a hiányzó barionos anyag problémáját. Hogy mégis sikerült detektálni az O VII abszorpciós vonalát a H 1821+643 spektrumában, annak köszönhető, hogy több potenciális forrás járulékát összegeztem, amivel eddig csak kevesen próbálkoztak. Az eddigi eredmények ráadásul „vak keresésen” alapultak abban a tekintetben, hogy semmilyen előismerettel nem rendelkeztek az abszorpciós rendszerek vöröseltolódásáról, míg én ismert vöröseltolódású rendszereket összegeztem. Eredményem az elméleti jóslatokkal összhangban van – szemben a „vak keresések” eredményeivel –, ám az egyedi források beazonosítása nem lehetséges.

Az *Arcus* röntgenműholdat, amit az elkövetkezendő években terveznek fellőni, épp erre a célra szentelik, vagyis a közeljövőben részleteiben feltárulhat előttünk a galaxisok közötti teret átszövő WHIM-filamentumok világa, ami fontos szerepet játszik az Univerzum szerkezetének alakulásában. Az O VII detektálása épp ennek a műholdnak a létjogosultságát erősíti azáltal, hogy elsőként megerősíti a hiányzó barionok problémájának feloldására vonatkozó legelfogadottabb elméletet.

A félévben a *Haladó informatika a csillagászatban 2 c.* tárgyat vettem fel, ezenkívül részt vettem egy PhD diákoknak szervezett szemináriumonsorozaton.

Augusztusban eredményeimet poszteren mutatom be a IAU (International Astronomical Union) XXX. közgyűlésén, Bécsben.