

Rádiósugárzó kvazárok eloszlása a kozmikus hálóban

Készítette:

Bogdán Ágnes

ELTE TTK Fizika BSc III. évfolyam

Témavezető:

Dr. Kovács András

tudományos munkatárs

HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont



Kivonat

A kvazárok az Univerzum legfényesebb aktív galaxismagjai, amelyek sugárzása, számos asztrofizikai alkalmazás mellett, jelentős információval szolgál a kozmikus háló szerkezetéről és az anyageloszlásról. Kozmológiai szempontból lényeges a kozmikus háló minél részletesebb feltérképezése vöröseltolódás szerint. A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás kis fluktuációi támpontot jelentenek a korai Univerzum szerkezetének elemzése szempontjából; hasonlóan, alacsony vöröseltolódás-tartományban a galaxisok és azok csoportosulásai segítségével alkothunk képet a kozmikus hálóról. Felmerül a kérdés, hogy az Univerzum e két kora között, milyen objektumok alkalmasak a nagyskálás szerkezetek vizsgálatára. A kvazárok eloszlása éppen ebben a tartományban a leggyakoribb, ezért kutatásom célja a távoli Univerzumban ($1 < z < 2$) található kvazárok csoportosulásainak statisztikai vizsgálata, illetve a lokális sűrűségük és becsült rádió fluxusuk közti kapcsolatok analízise.

A dolgozat során a WebSky szimuláció adatait használtam fel, amely lehetővé tette a kozmikus nagyskálás szerkezetek szimulációs elemzését és a kvazárok rádiósugárzási tulajdonságainak együttes modellezését. A Voronoi-tesszellációra épülő Revolver program segítségével üregeket (void) illetve halmazokat (cluster) azonosítottam a kozmikus hálóban. A program által becsült sűrűség paraméter lehetővé tette a különböző típusú voidok és halmazok sűrűségprofiljának elemzését relatív sugár szerint (így különböző méretű struktúrákat együttesen kezeltem). A mock kvazárokhoz hozzárendelt rádiófluxus értékek segítségével statisztikailag megvizsgáltam, hogy létezik-e összefüggés a galaxisok nagyskálás struktúrákban (és azokon belüli) elhelyezkedése és rádiósugárzása között. Ezt egyrészt vöröseltolódás, másrészt a struktúrák átlagnál alacsonyabb vagy magasabb sűrűségprofilja alapján végeztem el. Szimuláció alapján, az eddigi vizsgálataim értelmében, nem látható erős összefüggés a rádiósugárzó tulajdonság és a környezet között.

Hosszabb távú célom az eredmények összehasonlítása a megfigyelési adatokkal, különös tekintettel a Quia kvazár katalógusra, hiszen az is lehetséges, hogy a szimulációk nem konzisztensek minden értelemben az észlelésekkel. A dolgozatban bemutatott eredmények hozzájárulnak a kvazárok fizikai tulajdonságainak és eloszlásának jobb megértéséhez a kozmikus háló összefüggéseiben.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. Kozmológia és a táguló Világegyetem	3
1.2. Az Univerzum fejlődése	3
1.3. Kozmikus háló, sötét anyag, sötét energia	4
1.4. Aktív galaxismagok és kvazárok	6
2. Célkitűzés és eljárás ismertetése	8
2.1. A Quiaia kvazár katalógus	9
2.2. A WebSky szimuláció	9
2.3. A kozmikus háló rekonstrukciója - Voronoi tesszelláció	11
2.4. Végcél: a kvazárok sűrűsége és rádió tulajdonságai közti kapcsolat	13
3. Eredmények	14
3.1. Szimulált kvazár katalógus létrehozása és a Revolver kód futtatása	14
3.2. Sűrűségprofilok meghatározása	18
3.3. Rádió tulajdonságok meghatározása	20
3.3.1. Megközelítés λ_v paraméter szerint	20
3.3.2. Megközelítés vöröseltolódás szerint	21
4. Összefoglalás	25
Köszönetnyilvánítás	26
Hivatkozások	27

1. Bevezetés

Az alábbi fejezetben a táguló Világegyetem és annak fejlődését részletezem kozmológiai megfontolások mentén. Bevezetem a kozmikus háló fogalmát illetve feltérképezésének módszereit vöröseltolódás függvényében. Kitérek, a kvazárok által dominált, korai Univerzum nagyskálás struktúráinak vizsgálatára, kifejtve, hogy az aktív galaxismagok ritkás eloszlása miként járul hozzá a kozmikus háló akkori állapotának modellezésére. A bevezetőt Schneider (2015) könyvét felhasználva állítottam össze.

1.1. Kozmológia és a táguló Világegyetem

A ma látható Univerzum egy hozzávetőlegesen 13.8 milliárd éves folyamat eredményeként jöhetett létre, és az egyik fontos komponens a kozmikus fejlődés megértésében az Univerzum tágulása. Edwin Hubble és kutatótársai 1928 környékén felfedezték, hogy legtöbb galaxis esetén, a spektrumvonalak eltolódásából becsült radiális sebesség a távolsággal nő. Azaz fennáll a következő lineáris összefüggés:

$$v = H_0 \cdot D,$$

ahol D a távolságot H_0 pedig a Hubble-konstanst jelöli. A spektrumvonalak eltolódását, a vöröseltolódást, a következő módon lehet definiálni:

$$z := \frac{\lambda_{obs} - \lambda_0}{\lambda_0}$$

azaz az észlelt hullámhosszból kivonjuk a nyugalmi rendszerben kibocsátott fotonok hullámhosszát, majd a különbséget elosztjuk a nyugalmi értékkel. Ennélfogva egy galaxis radiális sebessége $v \approx z \cdot c$ alakba írható, ahol c a fény vákuumbeli sebessége (meg kell jegyezni, hogy ez az összefüggés csak $z < 1$ vöröseltolódásra igaz, felette relativisztikus korrekció szükséges). A Hubble törvény tehát az Univerzum tágulására enged következtetni, és a világegyetem homogenitását és izotrópiáját feltételező kozmológiai elvvel kombinálva már arra is, hogy nem vagyunk kitüntetett helyen az Univerzumban. Mások más referenciapontból is hasonlóan észlelnék a galaxisok egymástól való távolodását.

1.2. Az Univerzum fejlődése

A kozmikus tágulás miatt az anyag sűrűsége egyre csökken, azaz a múltban vélhetően még sokkal nagyobb lehetett (Génova-Santos, 2020). A táguló Univerzum „filmjét” ilyen módon visszafelé lejátszva pedig eljuthatunk az Ősrobbanás gondolatához. A nagyon korai Univerzumban a mozgási energia még kellőképpen nagy volt ahhoz, hogy atomok és atommagok se létezhesse: az atommagot alkotó protonok és neutronok is kvark-gluon plazma formájában töltötték ki a Világegyetemet. Aztán 380 ezer évvel később, a tágulás során az Univerzum átlagos hőmérséklete körülbelül 3000 Kelvin fokra hűlt le, így a nagy számban jelen levő fotonok átlagos energiája is sokkal kisebb volt a korábnál. Amikor ebben az időszakban a fotonok karakterisztikus energiája a hidrogén ionizációs energiája alá csökkent, a plazmában levő elektronok és protonok hidrogén atommá kombinálódhattak, és a közeg átlátszóvá vált a

fotonok számára (a sugárzás „lecsatolódott” az anyagról). A rekombinációnak nevezett fenti periódusban kibocsátott fotonok szabadon terjednek most is, közel $z \approx 1100$ vöröseltolódással az Univerzum tágulása miatt, ezt hívjuk kozmikus mikrohullámú háttérsugárzásnak (CMB, cosmic microwave background).

A mikrohullámú háttérsugárzás közel izotróp (miután levonjuk a Föld relatív mozgását a háttérhez képest, illetve a Tejút torzító hatásait), a megmaradó eloszlásban pedig $\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$ amplitudójú fluktuációkat tapasztalunk. Ezek az apró, de mérhető anizotrópiák, arra engednek következtetni, hogy a korai Univerzumban az anyag eloszlásában is kis inhomogenitások mutatkoztak (Spergel et al., 2003).

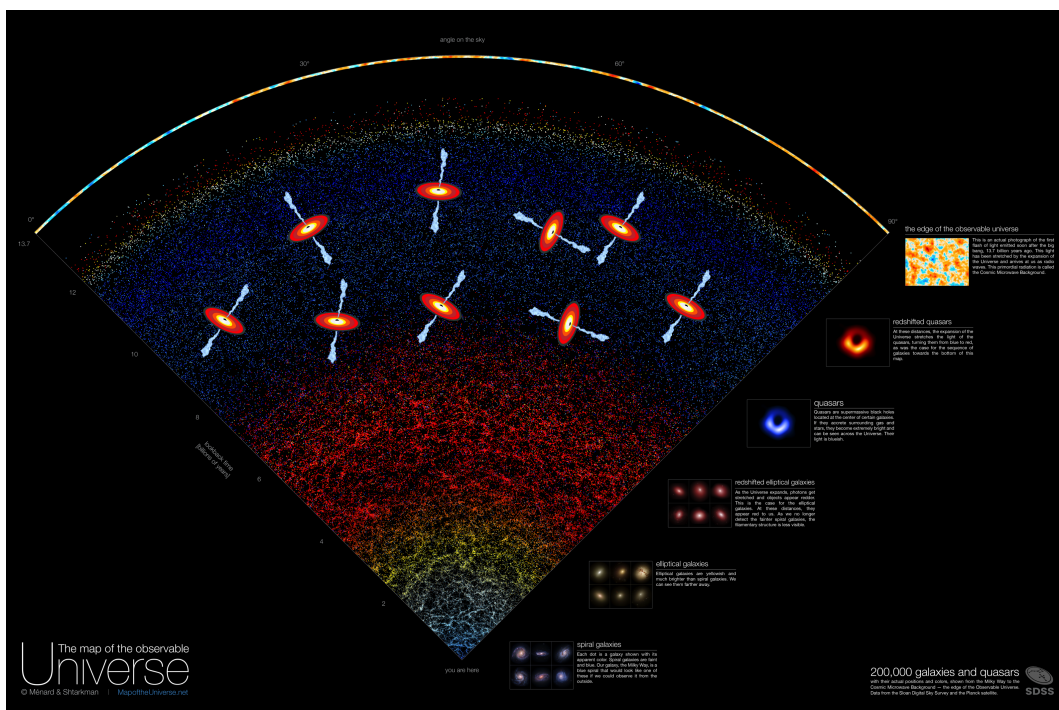
A rekombinációs korszakot követve a hidrogén semleges állapotba került, ezért ekkor még nem jönnek létre jelentős fényforrások, azonban a sötét anyag alkotta nagyskálás struktúrák (a ma látható galaxisok „csírái”) már elkezdtek kialakulni. Az Univerzum kb. 1 milliárd éves kora körül jöttek létre az első csillagok, melyek nagyenergiás sugárzásuk miatt képesek voltak újraionizálni is a környezetüket. Ezen reionizációs korszak után megjelentek a korai galaxisok, illetve aktív galaximagok (AGN, active galactic nuclei) és köztük kvazárok (QSO, quasi-stellar object) is formálódnak a központi szupernehéz fekete lyukak aktivitása révén. Létrejött tehát az Univerzum nagyskálás szerkezetét ma is meghatározó kozmikus háló (lásd 1. ábra), melyben az anyag hosszú szálakba (filamentum) rendeződik. A filamentumok kereszteződéseiben galaxishalmazokat találunk, köztük hatalmas, akár több 100 millió fényév átmérőjű kozmikus üregekkel (void), amelyek az Univerzum legalacsonyabb sűrűségű régióit jelentik (Camacho-Ciurana et al., 2024).

Összességében elmondható, hogy a napjainkra kialakuló nagyskálás galaxis struktúrák tömege és mérete szoros összefüggésben van a kozmikus háttérsugárzás mutatta korai anizotrópiákkal. A kozmológiai mérések legfontosabb célja a tágulás és a gravitációs struktúra-képződés egyensúlyának minél nagyobb tartományban végzett és minél részletesebb vizsgálata.

1.3. Kozmikus háló, sötét anyag, sötét energia

A galaxisok tehát nem véletlenszerűen oszlanak el: a tapasztalatok azt mutatják, hogy ezek az objektumok gravitációsan kötött halmazokba csoportosulnak, melyek hosszú szálak kereszteződéseiben találhatók. Bár a legnagyobb méretskálákon az Univerzum homogénnek tekinthető, a nagy sűrűségű régiók mellett-között találunk voidokat is, melyek csak néhány galaxist tartalmaznak, ezek mérete viszont sokkal nagyobb. Beszélhetünk kb. $1\text{--}2\text{ h}^{-1}\text{Mpc}$ -es, de $100\text{--}200\text{ h}^{-1}\text{Mpc}$ -es nagyságrendekről is (Kovács et al., 2022). Ebben az esetben a galaxisok közti gravitációs hatás nem olyan erős, mint a filamentumokban vagy a halmazokban elhelyezkedőké, ezért a kozmikus tágulás hatása jelentősebb lehet. Azt is meg kell említeni, hogy ezen alacsony sűrűségű területeket határolják körbe a galaxisokból felépülő csomósodások, ami egy áthaladó foton esetében például azt jelenti, hogy amíg az a void közepéig halad csökken az energiája, kifelé pedig már nő. Ez hasonló a potenciál hegy és gödör képéhez.

Korábban is említettem, hogy a galaxisok csoportosulásai szoros kapcsolatban állnak a korai Univerzum sűrűségfluktuációival, ám ez nem a teljes kép. A galaxishalmazokban levő galaxisok radiális sebességeit összehasonlítva kiderült ugyanis, hogy egymáshoz képest vett relatív



1. ábra. A Sloan Digital Sky Survey (SDSS) és Planck kozmológiai felmérések adatai alapján készült térkép-szelet a látható Univerzumból idő szerint feltüntetve. A sötétkéék sávban az a vöröseltolódás tartomány van feltüntetve, ahol a kvazárok a leggyakoribbak ($z \approx 2$). A korai Univerzum szerkezetéről a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás ad képet (ábra széle), míg napjainkhoz közelebb galaxisok csoportosulásai láthatók (ábra csúcsa). A kvazárok a két tartomány közötti rész feltérképezésében hasznosak, mivel fényességük lehetővé teszi az észlelésüket ebből a távolságból is. (Forrás: B. Ménard és N. Shtarkman, JHU)

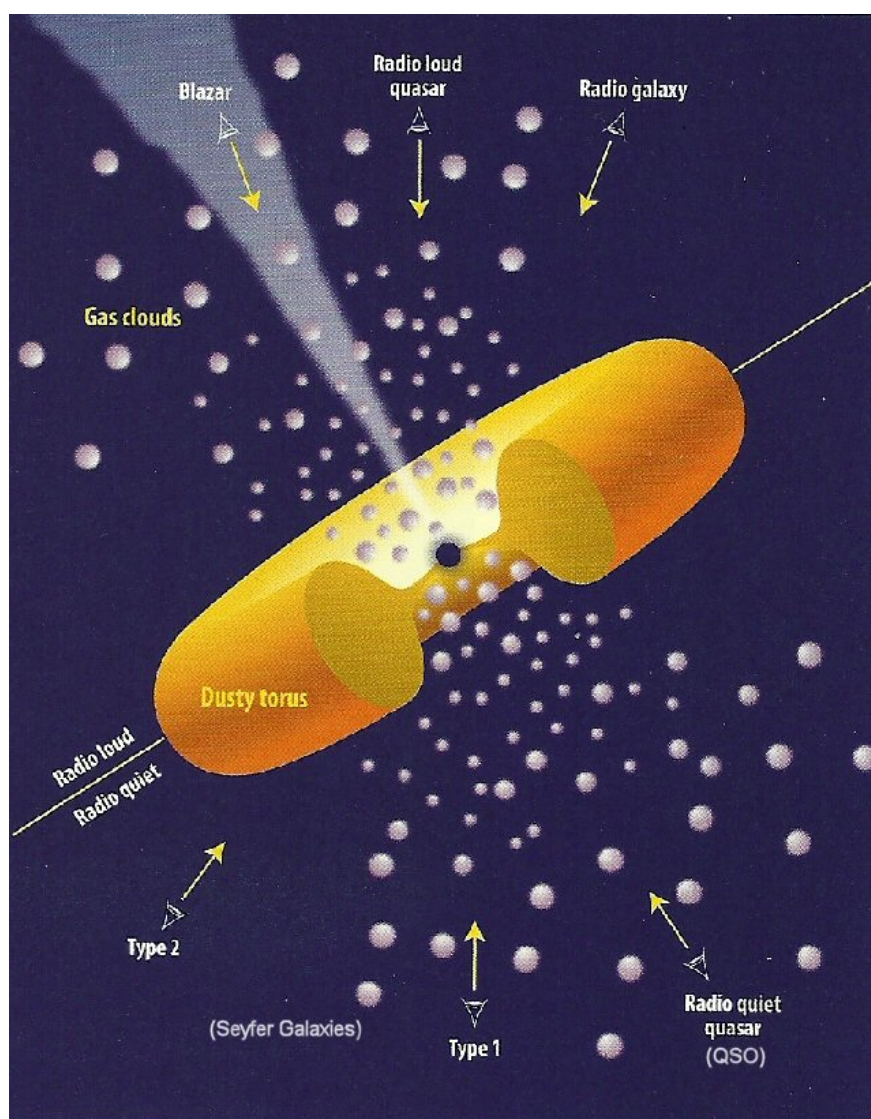
sebességük a vártnál nagyobbak adódik. A galaxisok csillagainak száma és fényessége alapján megbecsülhető a halmaz össztömege, ebből pedig kiszámítható az a sebesség, ami elegendő ahhoz, hogy egy galaxis kiszóródjon a halmazból. A mérések szerint a halmazoknak szét kellett volna már szóródniuk ezen az időskálán, azonban nem ezt tapasztaljuk. Az össztömeg tehát jelentősen nagyobbak adódik a látható anyag indikálta értéknél, és így juthatunk el a sötét anyag fogalmáig.

Az elfogadott Λ CDM (lambda-cold dark matter) lambda-hideg sötét anyag kozmológiai modell alapján azt lehet mondani, hogy a csillagok, galaxisok, és csillagközi por és gáz alkotta összes atomos (barionos) anyag csupán 5%-át teszi ki az Univerzum teljes energiasűrűségének. Ehhez jön még kb. 25% sötét anyag, amely valamilyen ismeretlen módon körülveszi a galaxisokat, és befolyásolja az atomos anyag mozgását.

Az energiaeoszlás legnagyobb hányadát (kb. 70%) pedig a még rejtélyesebb sötét energia tölti ki, amely a tér egy furcsa anti-gravitációs tulajdonsága lehet. A kozmológiai mérések szerint jelenleg gyorsulóban van a világegyetem tágulása, és ezért a sötét energia kozmikus taszítóereje lehet a felelős.

A kozmikus hálót alkotó galaxisok és a Világegyetem sötét komponensei is aktív kutatás tárgyát képezik. Az egyik érdekes terület a távoli Univerzum feltérképezése, amihez olyan objektumokra van szükség, melyek akár $z \approx 2$ vöröseltolódás környékéről is detektálhatóak.

1.4. Aktív galaxismagok és kvazárok



2. ábra. Az ábrán az aktív galaxismagok kategóriái vannak feltüntetve. Különböző típusokat különítünk el az észlelés irányának vagy a rádió tartományban mutatott jelek függvényében.

Forrás: Urry & Padovani (1995)

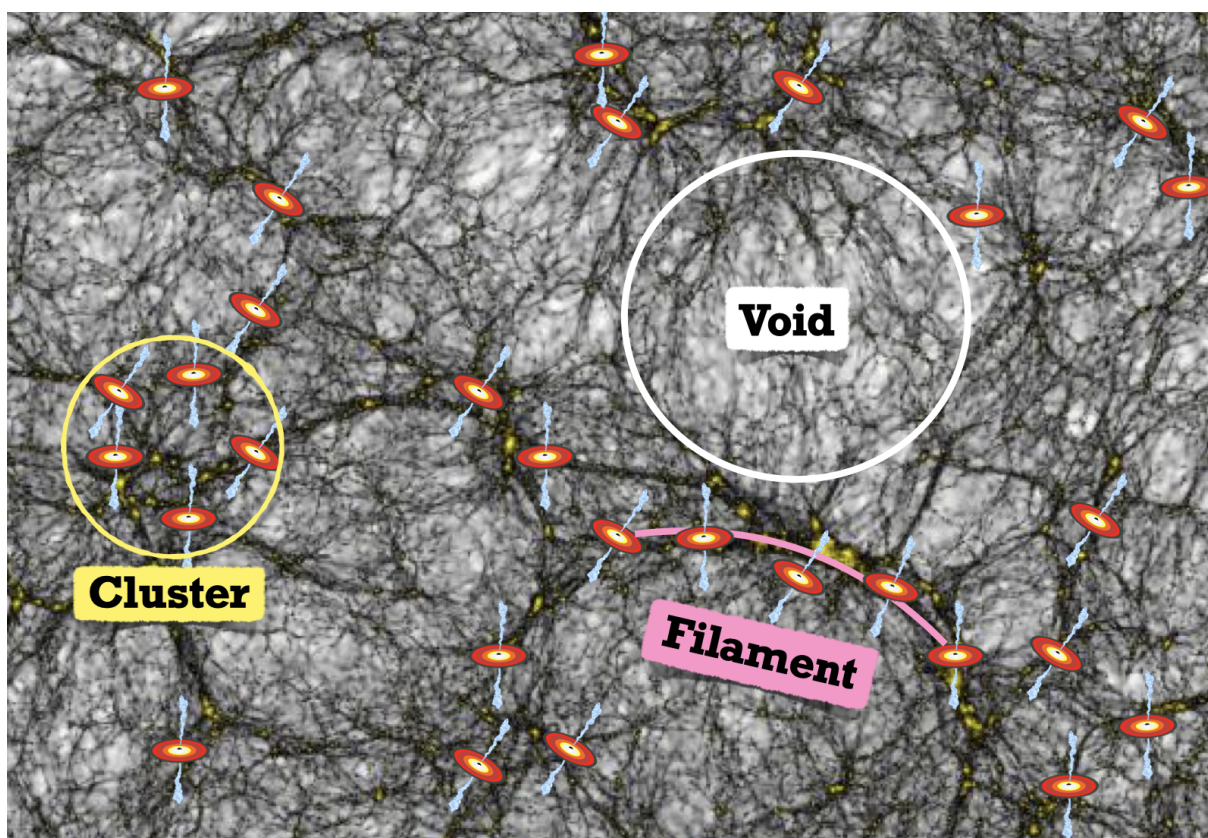
Aktív galaxisnak nevezzük azokat a galaxisokat, melyekben a központi fekete lyuk elég nagy tömegű ahhoz, hogy akkréciós korongot hozzon létre. A korai Univerzumban kedvezőek voltak a körülmények aktív galaxismagok kialakulásához (habár a későbbi korszakokban is léteznek, de gyakoriságuk kisebb). Ekkor az anyag jelentős része még ionizált formában volt jelen, csillagok kisebb számban keletkeztek, emellett többször ütközhettek a galaxisok. Tehát jelentősen több gáz áramolhatott be a fekete lyukakba és az akkréciós korongoknak köszönhetően nagyenergiájú fotonkibocsátás jellemezte az adott galaxist.

A passzívabb galaxisok fénye nagyrészt a csillagoknak köszönhető optikai és infravörös tartományban, a gáz és por kevésbé járul hozzá. A csillagok sugárzását-feketetést sugárzással közelíthetjük első rendben, galaxisok spektruma pedig jól leírható a csillagok spektrumának szuperpozíciójával. Az extrém hőmérsékletű csillagok, legyen az magas (ezekből kevesebb van)

vagy alacsony (ezek alacsony luminozitásúak), nem játszanak jelentős szerepet a spektrumot tekintve. Ezzel szemben aktív galaxismagok esetében jelentős elektromágneses sugárzás észlelhető rádióhullámhosszakon túl a nagyenergiás röntgen és gamma tartományokban is.

Az aktív galaxismagok attól függően, hogy milyen irányból észleljük őket, lehetnek blazárok, kvazárok, rádiógalaxisok, Seyfert galaxisok. Fontos kiemelni, hogy megkülönböztetünk rádió tartományban aktív és passzív galaxismagokat is energiaeloszlásuk alapján. Az aktív galaxismagok egyesített modeljét láthatjuk a 2. ábrán.

A dolgozat tárgyát is képező kvazárok az aktív galaxismagoknak egy részcsoportját alkotják, és a legnagyobb luminozitású objektumok közé tartoznak az Univerzumban. A kvazárok $z \approx 1$ vöröseltolódás fölött a leggyakoribbak, de $z \approx 6$ felett is észleltek már néhányat a legfejlettebb berendezések segítségével. Ezek az objektumok és vizsgálatuk képet alkotnak a galaxisfejlődésről és a korai Univerzum anyageloszlásáról. A dolgozat során ez utóbbi lesz kiemelkedő jelentőségű számunkra a kozmikus háló feltérképezésének szempontjából.



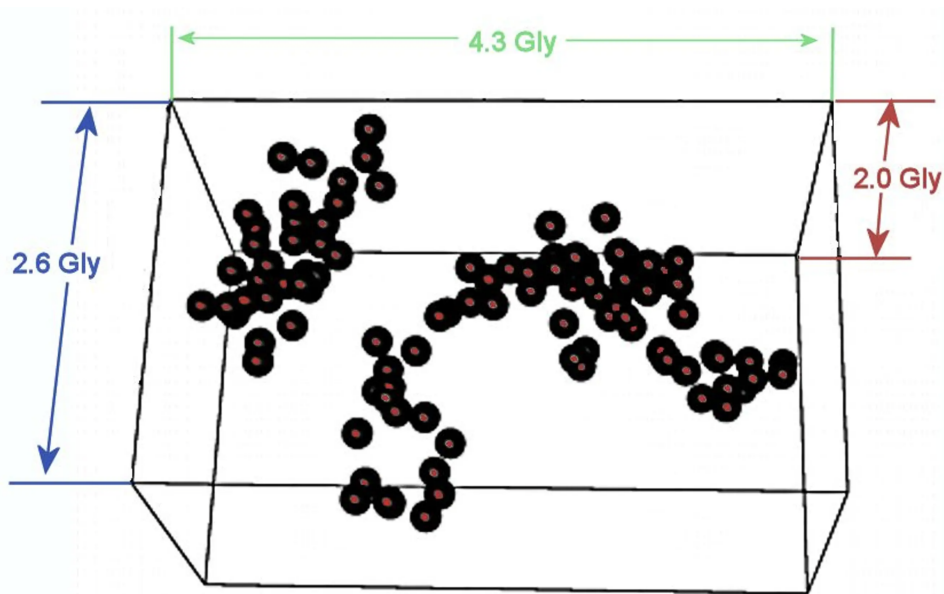
3. ábra. Kvazárok ritkás eloszlása a kozmikus hálóban, a modell alapján nagy valószínűséggel a filamentumok és halmazok által kijelölt régiókban találhatóak. Forrás: Joachim Stadel, Flagship simulation

A 3. ábrán a kozmikus galaxis háló eloszlását tekinthetjük egy N-test szimuláció alapján. A sötétebb régiókban nagyobb a galaxisok sűrűsége, a halványabb területek pedig voidoknak felelnek meg. Filamentumokba rendeződött galaxishalmazok találkozásánál szuperhalmazokat találunk. Elég távolról tekintve azonban homogén eloszlást kapunk az Univerzum szerkezetére nézve. A megjelölt kvazárok a tapasztalatok szerint jól követik az anyag eloszlását, ám ritkaságuk miatt kihívást jelent általuk képet alkotni a kozmikus háló részleteiről.

2. Célkitűzés és eljárás ismertetése

A dolgozat keretén belül fontos kérdés az Univerzum nagyskálás feltérképezése. A kozmikus háló minél részletesebb ismerete lehetővé teszi a sötét anyag eloszlásának modellezését is. Ehhez azonban meg kell fontolni a Világegyetem időbeli fejlődését is, melyet vöröseltolódás függvényében tekinthetünk. A térképezés lényegében a kozmikus háló szerkezetének és fejlődésének vizsgálata a vöröseltolódás szerint. Alacsony vöröseltolódásnál kézenfekvő a galaxisok és halmazok megfigyelése, a korai Univerzum esetében (azaz magas vöröseltolódásnál) pedig a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás kis fluktuációi jelentenek támpontot.

Tehát a kvazárok, mivel a vöröseltolódás skálán éppen olyan tartományban gyakoriak, ahol a nagy galaxishalmazokat még nem, és a korai Univerzum egyenetlenségeit a háttérsugárzás alapján már nem lehet vizsgálni, épp megfelelő objektumok a kozmikus háló korábbi állapotának feltérképezésére. Az aktív galaxismagok kompakt elektromágneses sugárzást kibocsátó források és nagy fényességű objektumok, ami lehetővé teszi az észlelésüket nagy vöröseltolódásnál is. Azt is ki kell emelni, hogy a kvazárok eloszlása elég ritka, ezért nehézséget jelent a kozmikus háló nagy részét alkotó sötét anyag csomósodásának modellezése ebben a kozmikus korszakban csupán a kvazárok segítségével (Aubert et al., 2022).



4. ábra. Az ábrán az SDSS adatokban talált Huge-LQG kvazár csoportosulás térbeli eloszlását látjuk. A távolságok milliárd fényévben vannak kifejezve, így egy valóban óriási kozmikus struktúrát mutatnak az adatok. Forrás: Jeremiah Horrocks Institute, University of Central Lancashire

Továbbá érdemes pár szót ejteni a nagy kvazárcsoportokról, illetve arról, hogy ez feszegeti-e az Univerzum homogenitására vonatkozó állítást. Példaként tekintsük a Huge-LQG kvazárcsoportot (4 ábra), amely 73 kvazárt foglal magába $z = 1.27$ (átlagos vöröseltolódás) környékén és szélessége körülbelül 1240 Mpc-es az egyik tengely irányában (Clowes et al., 2013). Ez az érték jóval meghaladja azon skála nagyságát, mely fölött már homogénnek tekintjük az Univerzumot (Yadav et al. (2010)). Ez kozmológiai szempontból kérdéses lehet a homogenitás szem-

pontjából, mivel ilyen méretű struktúrák kialakulásához több idő is kell (szimulációk alapján ez lehetséges, viszont mindenképp ritka eseményről van szó). Ehhez hasonló, további hatalmas kvazár csoportok felfedezése és analízise is a kozmológiai alkalmazások közé tartozik, és a dolgozat témájához is kapcsolódik.

2.1. A Quaia kvazár katalógus

Korábbi, már lezárt kvazár-felmérések közül érdemes megemlíteni az SDSS, eBOSS projekteket, illetve a most futó DESI projektet is. Ezek az égbolt egy kisebb részére korlátozódnak, és ebben jelent újítást a Gaia és a WISE teleszkópok észlelései alapján kombinációs módszerekkel készült Quaia kvazár katalógus (Storey-Fisher et al., 2023, 2024). Jelenleg ez a legrészletesebb felmérés a kvazárok kapcsán, nagy égterületet fed le, azaz a korábbiaknál nagyobb térfogatot lehet általa feltérképezni.

Az eredeti Gaia projekt keretén belül 6 millió kvazárjelöltet vizsgáltak meg a kutatók (Gaia Collaboration et al., 2023). A kezdeti katalógus részletes és közel homogén, de a vöröseltolódások hibája elég nagy a fényes ($G < 20$ mag) objektumokra is. Ezt összevetve unWISE infravörös felméréssel, további vágásokat végezve sajátmozgás és színindex szerint létrehozták a Quaia kvazár katalógust. Összesen 1 295 502 darab kvazár található a végső $G < 20.5$ mag magnitúdójú adatbázisban (az 5. ábrán látható az objektumok eloszlása teljes égbolton), míg 755 858 darab marad $G < 20$ mag vágás mellett. A katalógus nagy effektív térfogattal bír, ami a kozmikus nagyskálás szerkezet analizálásának szempontjából előnyös, mi is ezért választottunk munkánk alapjául.

Az észlelési adatok mellett fontos megjegyezni a szimulációk jelentőségét ezen területen. Habár megfigyeléseket csak egy Univerzumon lehet végezni, szimulációk segítségével különböző kozmológiai paraméterek beállításával tesztelni lehet a kozmikus háló fejlődését és viselkedését.

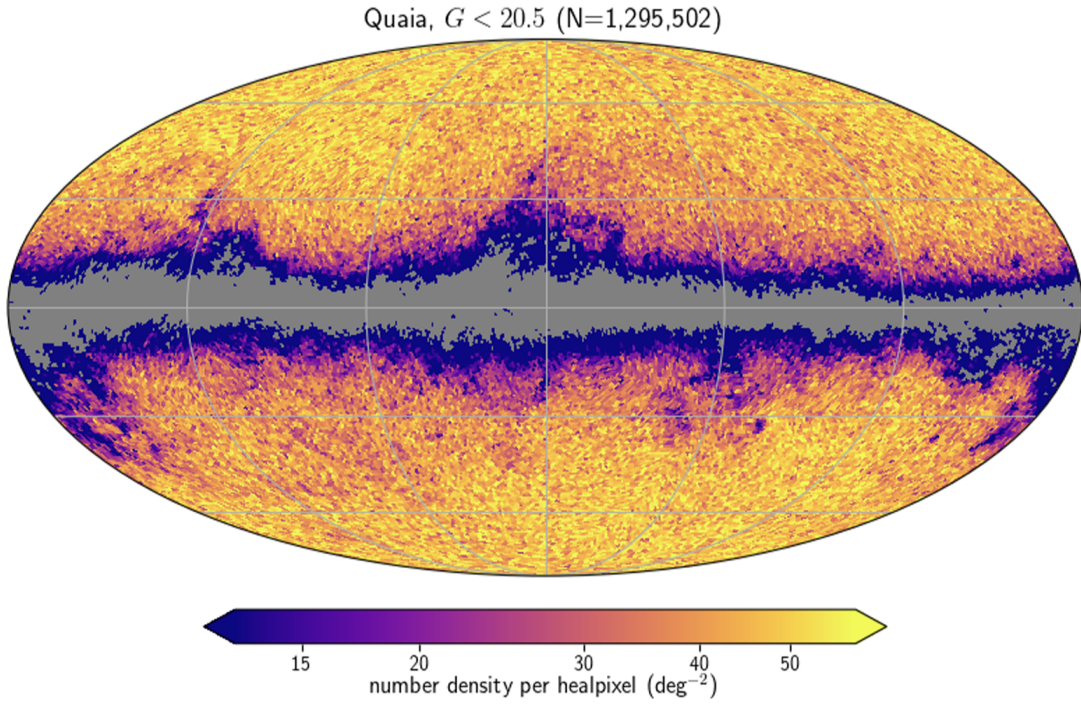
2.2. A WebSky szimuláció

A dolgozat egyik célja, hogy egy a Quaia-hoz hasonló szimulált katalógust hozzunk létre, amely ráadásul rádió tartományú modell fluxusokat is megad minden objektumra. A több kozmológiai projektben is használatos WebSky szimuláció alapján készült adatbázisok publikusan is elérhetőek (6. ábra; Stein et al. 2020)¹. Ezek nagy térfogatot lefedő sötét anyag haló katalógusok, emellett különböző rádiósávokban becsült fluxus értékeket is hozzárendeltek, az egyes szimulált galaxisokhoz (Li et al., 2022)². A munka során a 100 GHz körüli rádió sávban készült szimulációt használtam fel a számos opció közül.

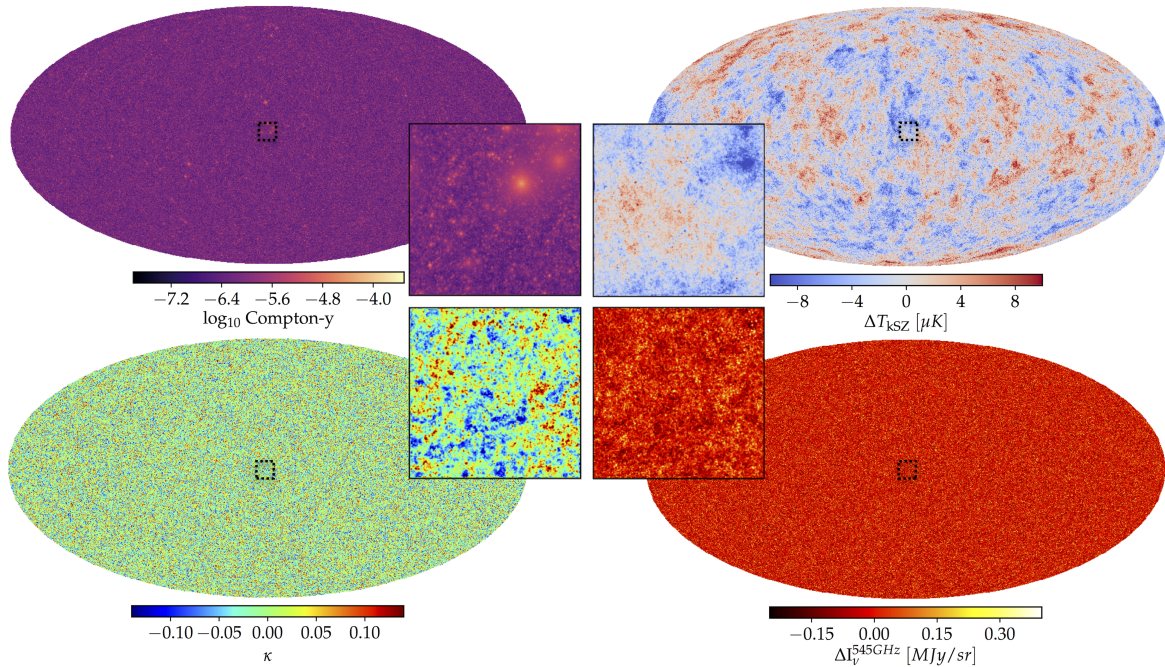
Egy kapcsolódó projekt nyomán rendelkezésünkre áll egy olyan szimulált kvazár katalógus is, amelynek vöröseltolódás-tartománya és a kvazárokat nagy valószínűséggel tartalmazó, nagy tömegű sötét anyag halók térbeli eloszlásának statisztikája is hasonló a modellezni kívánt Quaia kvazár katalóguséhoz. Mivel mindkét adatbázis a WebSky szimuláció nyomán készült, vágások bevezetésével összefésülhető-e két katalógus. Ennek elvégzésével vette kezdetét a dolgozatban bemutatott analízis.

¹<https://mocks.cita.utoronto.ca/index.php/>

²<https://github.com/xzackli/WebSkyRadioGalaxies>



5. ábra. A Quaia katalógus teljes égboltra vett eloszlása. A Tejút sávja mentén vágást végeztek az adatokon, ám így is jelentősen kisebb a kvazárok sűrűsége a galaxisunkhoz közel. Ezen kívül viszont az égbolt más részein közel homogén a katalógusban szereplő kvazárok eloszlása. Forrás: Storey-Fisher et al. (2024)



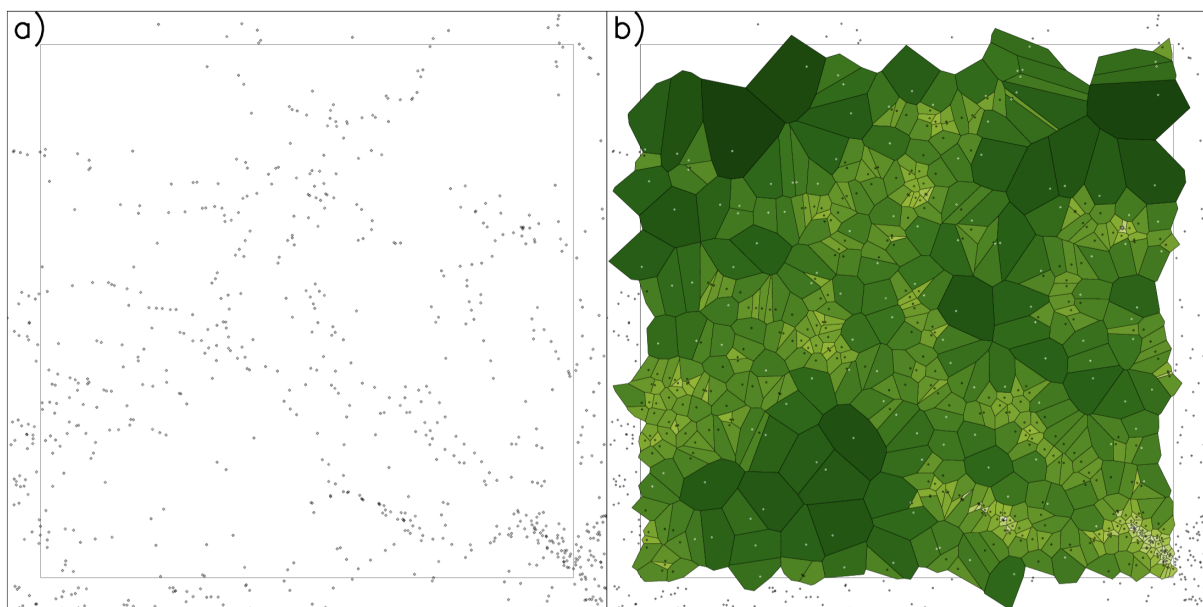
6. ábra. WebSky szimuláció alapján készített modellek a háttérsugárzás lencsehatása és egyéb kozmológiai jelek kapcsán. A szimuláció ezeken túl szintetikus rádió fluxusokat is tartalmaz.

Forrás: Stein et al. (2020)

A végső szimulált WebSky kvazár adatbázis 1.3 millió galaxist tartalmaz, ezek vöröseltolódása a $0.8 < z < 2.3$ tartományba esik. A projekt során előnyösnek tartottuk azt, hogy különböző szeleteken mintavételezzünk, ezért a fent említett végső katalógust az égbolt szerint négy kvadránsra osztottam. A további műveleteket ezen kvadránsokra külön-külön végeztem el, így lehetőségem nyílt megvizsgálni a szeletek közötti eltéréseket is. A végső eredmények ezek átlagolásából születtek, azonban azt is kiemelném, hogy egyes tulajdonságok vizsgálatakor a teljes égboltra vett katalógust vettem számításaim alapjául.

2.3. A kozmikus háló rekonstrukciója - Voronoi tesszelláció

A dolgozat célkitűzései közé tartozik az is, hogy a kozmikus nagyskálás szerkezet sűrűségeloszlását meg tudjuk becsülni a kvazárok pozícióinak környezetében. Ehhez a Revolver (Nadathur & Hotchkiss, 2015) nevű program (REal-space VOid Locations from surVEy Reconstruction)³ bemenő adataként használok fel az elkészült szimulált kvazár katalógust.



7. ábra. A Revolver kód a Voronoi tesszellációra építve meghatározza a galaxisok vagy kvazárok egyedi térfogatelemeit, azon részek alapján amelyek az adott ponthoz vannak legközelebb. A térfogatok inverzeként becsülhet aztán a lokális sűrűség, normalizációt is beleértve. Forrás: Neyrinck (2008)

A Revolver kód a Voronoi tesszelláció módszerének segítségével (lásd 7. ábra) lokális sűrűségeket rendel az adott objektumhoz (Neyrinck, 2008), illetve ezek alapján összeállít egy void és halmaz katalógust. A kimenő adatok egyrészt a struktúrák tulajdonságairól is képet adnak, mint például azok sugara és átlagos sűrűsége. A Revolver program megbecsüli az úgynevezett λ paramétert is, amely a void vagy halmaz sűrűségeloszlásáról ad képet:

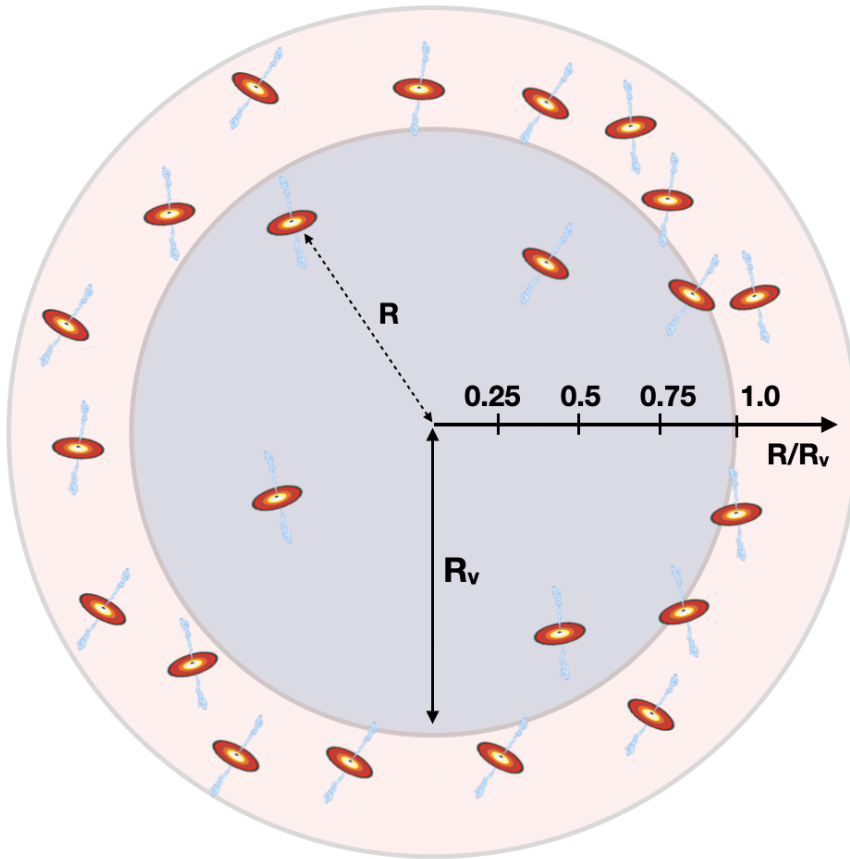
$$\lambda_v \equiv \bar{\delta}_g \left(\frac{R_{\text{eff}}}{1 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}} \right)^{1.2} \quad (1)$$

³<https://github.com/seshnadathur/Revolver>

ahol $\bar{\delta}_g$ a sűrűség, R_{eff} az effektív sugár, amely az adott struktúra becsült térfogatával megegyező térfogatú gömb sugarával egyenértékű.

A negatív λ tipikusan nagyobb és ritkább anyageloszlású voidot jelent, úgy is fogalmazhatunk, hogy egy potenciálhegyhez hasonlóan viselkedő struktúra, azaz egy áthaladó fotont a void körüli anyag erősebben „húzza” ki. A pozitív λ paraméter potenciálgödörrel magyarázható viselkedést mutat, környezetének az átlagosnál nagyobb sűrűsége miatt csak lokális minimumnak tekinthetők ezek a struktúrák a kozmikus hálóban. Az egyes voidokhoz és halmazokhoz egy középponti koordináta pár is hozzá van rendelve, ez azonban kétféle lehet. Az egyik verzió szerint a legalacsonyabb lokális sűrűségű ponthoz rendeli a program a középpontot, míg a baricentrikus (azaz tömegközépponti) verzióban a kvazárok vagy galaxisok egymáshoz való viszonyát is számításba veszi, és a teljes struktúra alapján jelöli ki a centrumot.

Tekintve a 8. ábrát, részletezem az $\frac{R}{R_v}$ „relatív sugár” paraméter definícióját, mely összefüggésre szükség van a struktúrák sűrűségprofiljának vizsgálatához. Egy szabályos void esetében a centrumtól a void széléig vett távolság lesz az effektív sugár. Az egyes szimulált kvazárok távolsága, melyek a voidhoz tartoznak, kiszámolható a centrumhoz képest, ügyelve arra, hogy a mértékegységek konzisztensek maradjanak.



8. ábra. Egy kvazárok alacsony sűrűsége által kirajzolt kozmikus void sematikus ábrázolása.

A Revolver kimeneti fájljaiban az egyes kvazárok távolsága a centrumtól (R) nem elérhető, ezért ezt ki kell számítani. A voidok és halmazok effektív sugara elérhető az elmentett fájlokból, ezekre a továbbiakban R_v és R_c jelölésekkel hivatkozok (érdeemes különválasztani a két struktúrátípust, habár az eljárás hasonlóan zajlik mindkettőre).

A számolások során $h^{-1}\text{Mpc}$ egységet használtam. Ismerve az egyes galaxisok R távolságát, elosztjuk azt az adott void effektív sugarával. Ennek értelmében, ha $\frac{R}{R_v}$ közel nulla értékű, akkor az a void centrumának közelében helyezkedik el, ha egy körüli az érték, akkor a struktúra szélén. Azt is ki kell viszont emelni, hogy a voidok térbeli alakja nem közelíthető gömbbel, ezért az effektív sugár definíciója a Revolver programban különbözik az eddig leírtaktól. A program megbecsüli az adott void össztérfogatát amit összevet egy hasonló térfogatú gömbbel, aminek a sugara lesz R_v . Az aránypár hasznos a későbbi számolások során, mivel ennek segítségével le tudjuk írni, hogy egy adott galaxis a void vagy halmaz melyik részében helyezkedik el (belső vagy külső héjakon).

Ezek ismeretében, tekintve például a voidok esetét, $\frac{R}{R_v}$ szerint feloszthatjuk az adatsort megfelelő binékra, így az egyes héjakban kiszámítható az átlagos sűrűségérték, súlyozva a kvazárokhoz tartozó cellák térfogatával. Célom tehát ezen szimulált kvazár katalógus alapján készült sűrűségprofilok megvizsgálása különböző paraméterek (például λ) szerint.

Visszatérve a középpont definíciójához, ez különbségekhez vezet, amikor az $\frac{R}{R_v}$ paramétert számoljuk. A két centrum definíció különböző előnyökkel jár, a vizsgálandó problémához mérten érdemes lehet egyiket vagy másikat használni. A munkám során azt az esetet vettem alapul, ahol a voidok vagy halmazok középpontja a legalacsonyabb vagy legnagyobb sűrűségértékkel van ellátva.

2.4. Végcél: a kvazárok sűrűsége és rádió tulajdonságai közti kapcsolat

A kvazárok tulajdonságai sok faktortól függhetnek. A jelenlegi álláspont szerint a kvazároknak körülbelül 10%-a rádiósugárzó aktív galaxismag (Arsenov et al., 2024). Ezt a statisztikát össze lehet például vetni az objektumok fényességével vagy vöröseltolódásával. Én ezzel szemben azt akarom megvizsgálni, hogy lokális és nagyskálás környezetük milyen módon befolyásolhatják ezen objektumok rádiósugárzását a WebSky szimuláció alapján.

Ezért célszerű felhasználni a sűrűségprofilokat és összevetni a szimulált rádió katalógusból származó fluxus paraméterrel. A kérdés tehát az, hogy van-e detektálható összefüggés egy kvazár rádiósugárzása és lokális sűrűségeloszlása között. A dolgozatban megvizsgálom, hogy alacsony és nagyobb sűrűségeknél milyen rádió tulajdonságokat mutatnak a szimulált (avagy *mock*) katalógus galaxisai, ezzel felkészülve a megfigyelési Quia adatok majdani analízisére is.

3. Eredmények

Az alábbiakban részletezem a dolgozat eredményeit, melynek főbb részeihez tartozik egy Quiaia-hoz hasonló szimulált kvazár katalógus létrehozása rádiótartományban értelmezett modell fluxus paraméterekkel. Emellett az elkészült katalógusban megvizsgáltam, milyen nagyskálás szerkezeteket lehet definiálni, képet alkotva ezek sűrűségeloszlásáról. Továbbá, felhasználva a fluxus értékeket, megvizsgáltam, hogy a kvazárok rádiótulajdonságai miként függhetnek lokális környezetüktől.

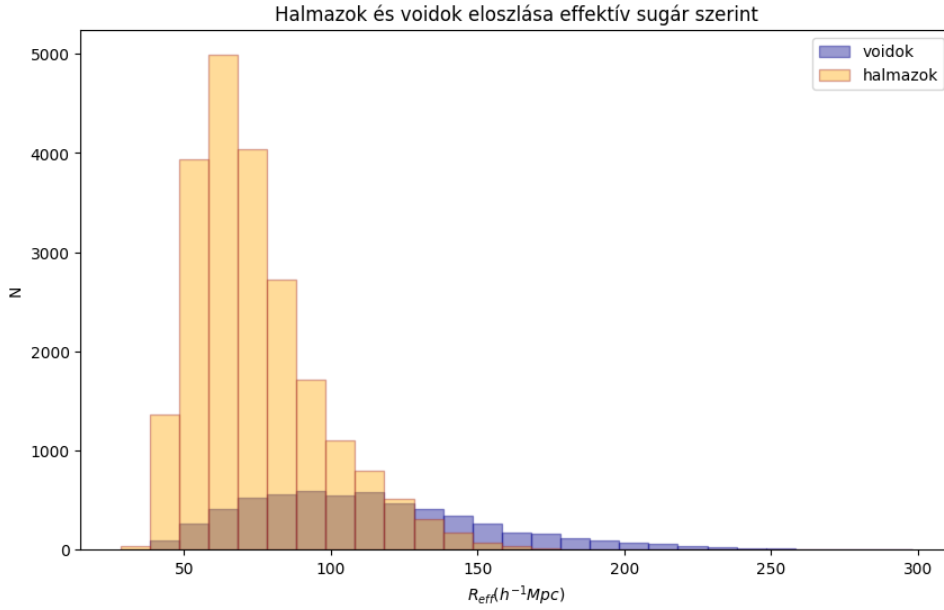
3.1. Szimulált kvazár katalógus létrehozása és a Revolver kód futtatása

A folyamat első lépése, amint azt már említettem, a szimulációk alapján létrehozott mock katalógus összeállítása volt. A WebSky rádióforrás adatbázis vöröseltolódás szempontjából jóval nagyobb tartományt ölel fel, mint a Quiaia. Ezért először a céljaimnak megfelelő 0.8 - 2.3 vöröseltolódás intervallumra redukáltam az eredeti adatbázist. Azért, hogy az égbolt különböző területein is el tudjam végezni a Revolver futtatását, négy kvadránsra (közel egyenlő darabszámú részre) osztottam a mock katalógust. Ezzel párhuzamosan egy már létező, Quiaia-hoz hasonló mock galaxis adatbázist is felosztottam kvadránsokra (itt vöröseltolódás szempontból már nem kellett vágásokat végezni). Az általam felhasznált végső katalógusok ezeknek az összefésüléséből származnak, ezt koordináták szerint végeztem el. A végső adatsorban így egy adott mock galaxishoz több paraméter is hozzá van rendelve, ebből a fontosabbakat szeretném kiemelni: vöröseltolódás, fluxus, sötét anyag haló tömeg.

A négy kvadránsra külön-külön lefuttattam a Revolver programot, melynek működési alapelve korábban kitértem. A program lefutása után szükséges volt további vágás elvégzése vöröseltolódás szerint, ennek az oka a Revolver működéséből ered. A program az általam megadott adatbázis szélét feltölti hamis mock galaxisokkal (ún. *buffer galaxisokkal*), hogy határt szabjon a talált voidok és halmazok számára. A végső katalógusok számbeli paramétereiről egy táblázatban találhatunk többet (1. táblázat). Emellett, a 9. ábrán látható, hogy mekkora effektív sugarú voidokat és halmazokat definiált a Revolver. Megfigyelhető, hogy a voidok, habár kevesebb van belőlük, sokkal nagyobb struktúrák, mint a halmazok. Az így talált nagyskálás struktúrák mérete összhangban van a korábban is említett LQG kvazár csoportosulások nagyságával, illetve a szimuláció jól tükrözi az észlelések alapján definiált üregeket és galaxiscsoportokat. A Huge-LQG kvazárcsoport nem egy szabályos gömb alakú struktúra, formája inkább elnyúlt, amit az is jelez, hogy az egyik tengely irányában jóval nagyobb a mérete. Az effektív sugarát, ha tekintenénk, hasonló lenne az általam bemutatott méretbeli eloszláshoz. Az általam készített katalógus szerint a legnagyobb void effektív sugara $306 \text{ h}^{-1} \text{Mpc}$, míg a legnagyobb halmazé közel $200 \text{ h}^{-1} \text{Mpc}$, ebből is látszik a méretbeli különbség a két struktúrátípus között.

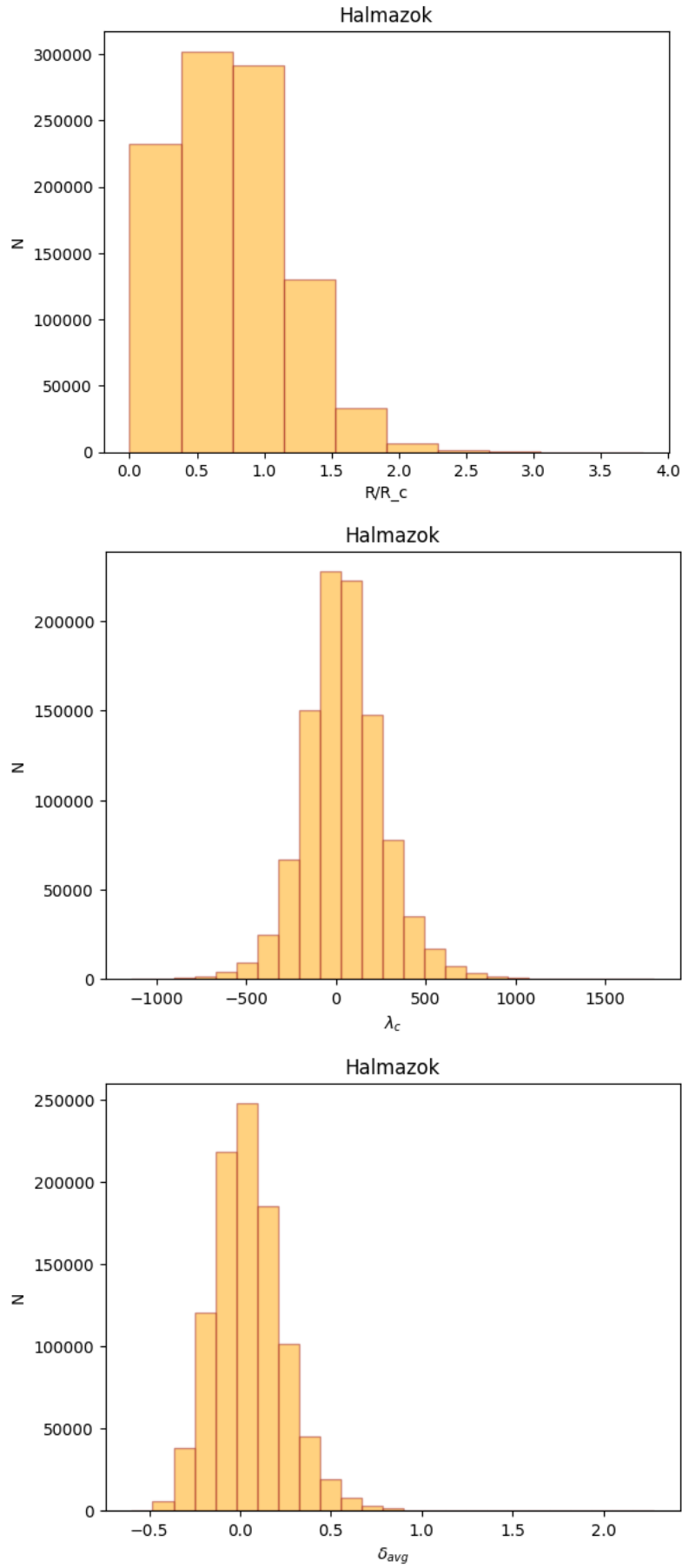
Kvadránsok	$N_{galaxis}$	N_{void}	N_{halmaz}
1	272775	5192	19477
2	245665	4635	17228
3	270004	4996	18852
4	241968	4583	17026

1. táblázat. Revolver futtatása után a kapott struktúrák száma. Az első oszlopban az adott kvadráns van megnevezve, második oszlopban a mock galaxisok száma, harmadik oszlopban a voidok száma, míg a negyedikben a halmazok száma.

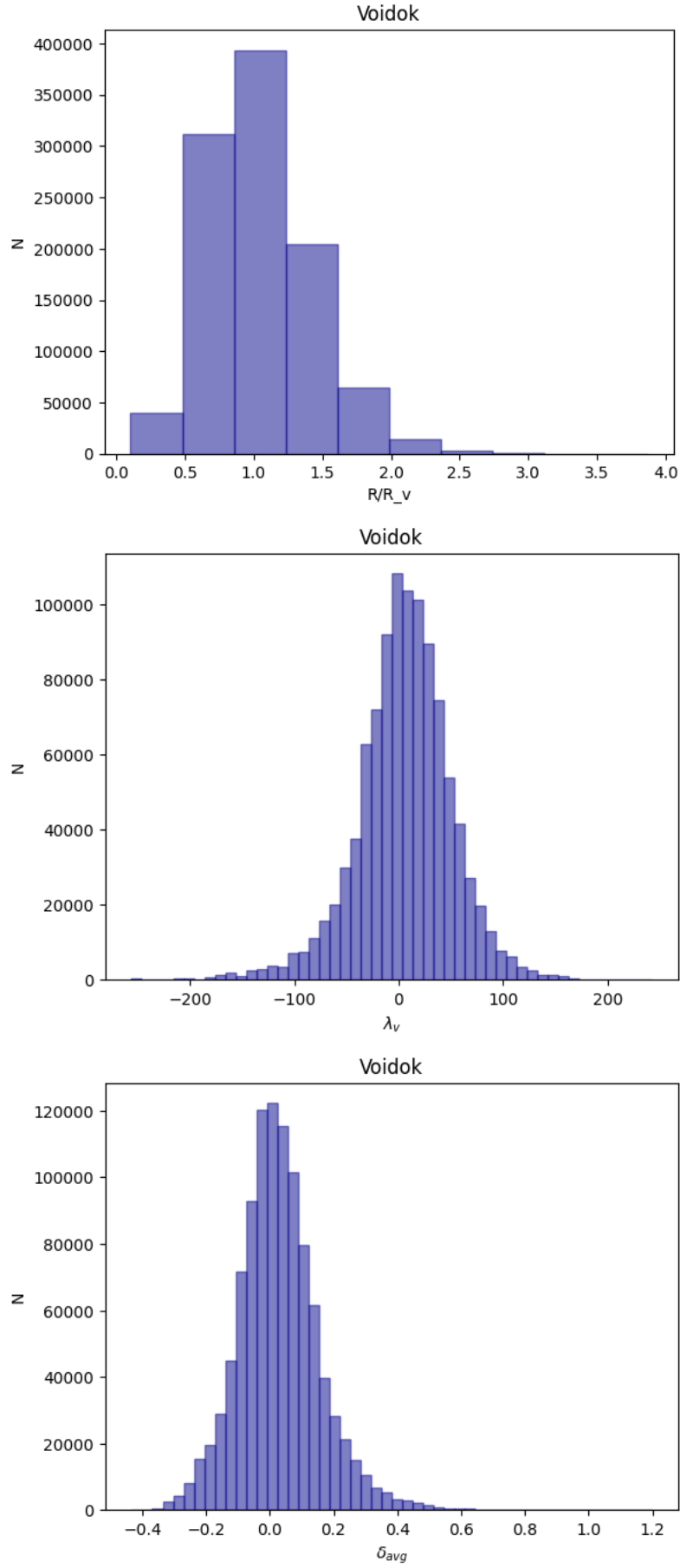


9. ábra. Nagyskálás struktúrák effektív sugaruk szerinti eloszlása. Látható, hogy a legnagyobb voidok és halmazok kevésbé gyakoriak; nagyságrendben konzisztens a kozmológiai modellekkel a struktúrák nagysága.

Az így kapott eredményeket közös adatbázisba rendeztem, külön a voidokra és halmazokra, így tehát teljes égboltra vett térképet kapunk. A λ paraméter szerinti eloszlásokban mindkét nagyskálás struktúra-típus esetén azt látjuk, hogy a legtöbb a nulla érték környékén csoportosul, azaz ezek átlagosnak tekinthetőek. Az extrém λ értékkel rendelkező mock kvazárokról azt mondhatjuk el, hogy az átlagosnál nagyobb, mélyebb vagy sűrűbb régiókban helyezkednek el. A $\frac{R}{R_v}$ és $\frac{R}{R_c}$ paramétereket 10 bin szerint ábrázoltam, ez a későbbiekben azért lesz fontos, mert az átlagos sűrűséget ezekben a héjakban fogom meghatározni.



10. ábra. A hisztogramok a halmazok és azok paramétereit mutatják be, az eloszlások itt a mock galaxisokra vonatkoznak, nem külön a halmazokra.



11. ábra. Hasonlóan a korábbiakhoz, a galaxisok különböző paraméterek szerinti eloszlását látjuk voidok esetében.

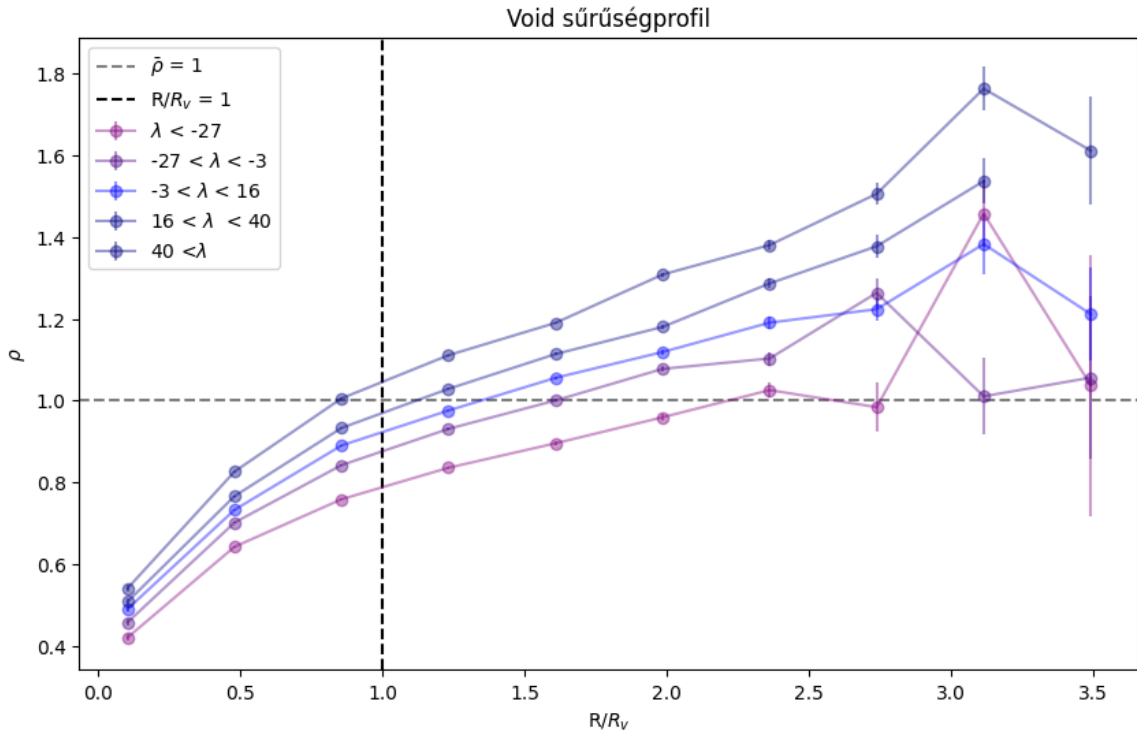
3.2. Sűrűségprofilok meghatározása

A továbbiakban a teljes égboltra vett katalógussal dolgoztam. Annak tudatában, hogy a λ paraméter miként írja le a nagyskálás szerkezetek tulajdonságait, részletezem, hogy miként határoztam meg az átlagos sűrűségeloszlást voidok és halmazok esetében. Az eljárás leírásában a voidok esetére fogok hivatkozni, de ez hasonló módon történt a halmazokra is.

Statisztikai megfontolásból olyan λ bineket hoztam létre, melyekbe közel azonos számú mock galaxis tartozik. Ezek fényében öt λ bint hoztam létre, így az első ezek közül jól jellemzi a különösen mély voidok tulajdonságait. Ezt a kategorizálást felhasználva, a korábban definiált $\frac{R}{R_v}$ mentén is felbontottam az adatsort. Egy-egy héjban az 5 λ bin szerint kiszámítottam az ide tartozó galaxisokra egy úgynevezett térfogattal súlyozott sűrűséget a következő összefüggéssel:

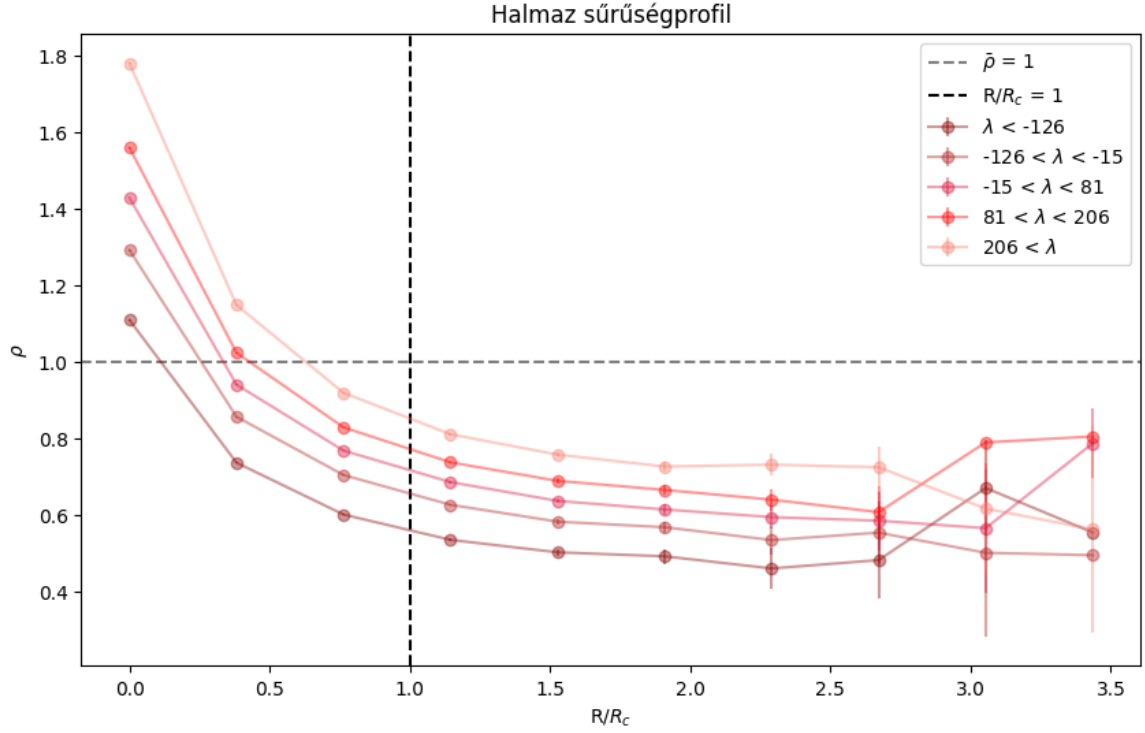
$$\frac{\sum_i^N \rho_i \cdot V_i}{\sum_i^N V_i} \quad (2)$$

Itt N az adott héjban levő pontok számát jelöli, ρ_i és V_i az egyes mock galaxisokhoz rendelt sűrűség és térfogat paramétert reprezentálja. Tehát minden $\frac{R}{R_v}$ héjban öt térfogattal súlyozott sűrűségparamétert kapunk λ függvényében. Ezt látjuk a 12. és 13. ábrákon.



12. ábra. Teljes égbolton definiált voidok sűrűségprofilja λ paraméter szerint.

Érdeemes megfigyelni, hogy az alacsony λ paraméterű voidok (az ábrán lilás színnel feltüntetve, $\lambda < -27$ esetben) a struktúra centrumához közelítve a legalacsonyabb sűrűségűek, ahogy haladunk kifelé a relatív sugár szerint úgy nő az sűrűség is, megközelítve a $\rho = 1$ értéket. Ennek a görbének az alakját követik az egyéb λ csoportba tartozó voidok is, azonban azok felfele



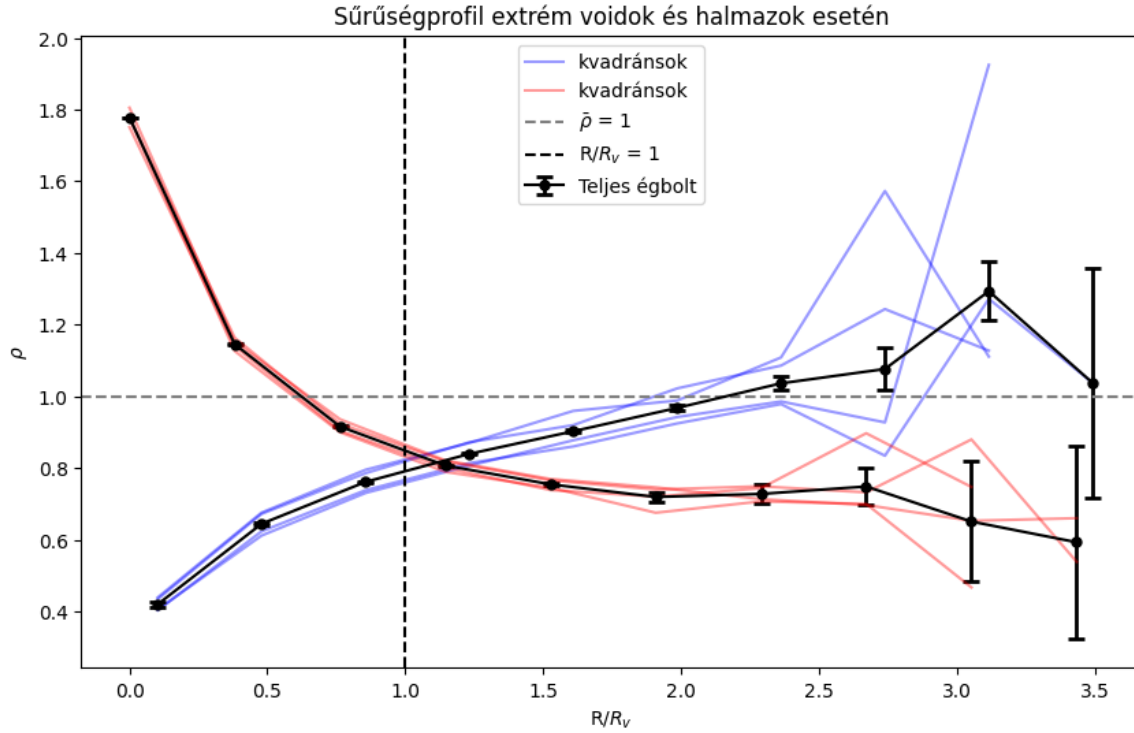
13. ábra. A teljes égboltra vett térkép alapján becsült halmazokra vonatkozó sűrűségprofil λ paraméter szerint.

tolódnak a sűrűséget jelölő tengely mentén. Az ábrán feltüntettem az átlagos sűrűséget ($\bar{\rho}$) és az $\frac{R}{R_v} = 1$ értéket is.

Ezt az eljárást követve a halmaz katalógushoz tartozó mock galaxisokra is megbecsültem a sűrűségeloszlást. Itt megfigyelhető az, hogy a legnagyobb λ paraméterű halmazok a legsűrűbbek a középponttól kezdődően. A paraméter értékének csökkentésével a struktúrák sűrűségeloszlása lefelé tolódik az ábrán.

Ezek ismeretében, ezt az eljárást felhasználva a 14. ábrán összehasonlítottam a legsűrűbb halmazokat a legmélyebb voidokkal. Ebben az esetben viszont nem a teljes égboltra vett katalógust használtam, hanem először kvadránsenként elvégeztem a fentebb is említett műveleteket. Így minden kvadránsra külön-külön kaphatunk egy képet arról, hogy milyen a sűrűségprofilja ezeknek nagyskálás szerkezeteknek. A négy profilra vett átlagot fekete görbével tüntettem fel. A kék görbék jelentik a voidok esetében a négy kvadránsra kapott sűrűségbecslést, míg pirossal a halmazok kvadránsenkénti eloszlása van jelölve. Ki kell emelni, hogy ezek a profilok voidok esetében $\lambda_v < -27$ tartományba eső elemekre vonatkoznak, míg a halmazoknál $\lambda_c > 206$.

A görbék szórása, ahogy a relatív sugár mentén kifele haladunk, egyre nagyobb. Ennek az is az oka, hogy az eljárás érzékeny arra, hogy az egyes héjakban hány mock galaxis található. A külsőbb héjakon változóbb ez az érték, ezzel szemben az alacsonyabb relatív sugarak mentén pontosabbak az értékek.



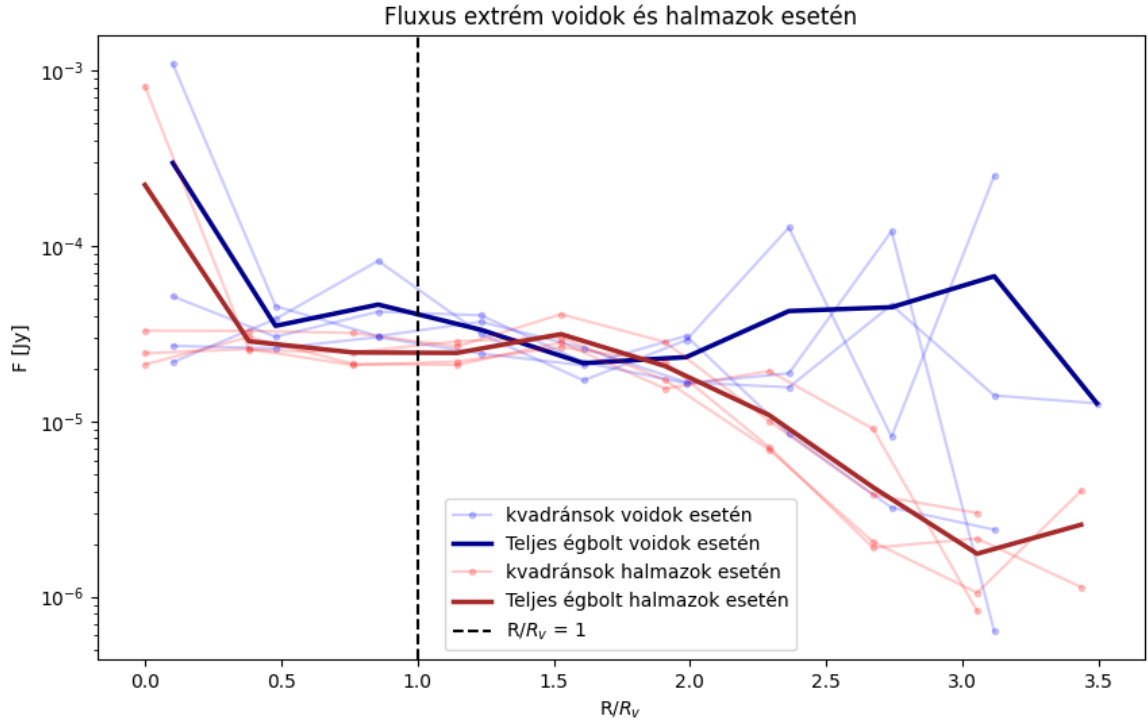
14. ábra. Extrém voidok és halmazok esetén láthatjuk a sűrűségprofilok összehasonlítását.

3.3. Rádió tulajdonságok meghatározása

3.3.1. Megközelítés λ_v paraméter szerint

Amint azt már említettem a cél az, hogy egy olyan mock katalógust állítsak össze, ami a Quia észlelési adatokhoz hasonló, illetve ehhez egy rádiófluxus paramétert is rendeljek. A WebSky szimuláció alapján az egyes rádióforrásokhoz egy fluxus érték is tartozik Jansky-ben kifejezve. A munkám további részében azt vizsgáltam meg, hogy milyen összefüggés áll fent a mock galaxisok fluxusa és a szimulált kvazárok lokális környezete között, figyelembe véve, hogy milyen nagyskálás szerkezetek részei. A feltevés szerint egy galaxis helyzete, attól függően hogy egy void közepénél vagy szélénél található-e más-más rádiótulajdonságokat mutathat. Ennek vizsgálata érdekében, a már eddig is használt relatív sugár szerint, héjanként megbecsültem egy térfogattal súlyozott fluxusértéket a legextrémebb voidokra és halmazokra (az eljárás nagybán hasonlít a korábbiakra).

Ennek a módszernek az eredményét tekinthetjük meg a 15. ábrán. Az y tengelyen a fluxus értéket Janskyben, míg az x tengelyen a szokásos binnek szerint a relatív sugarat láthatjuk. Az y tengely logaritmikus skálán van reprezentálva. Jelen esetben is a két legszélső λ tartományt használtam fel. A halványabb görbék (piros és kék színezéssel) a kvadránsok szerint kiszámolt sűrűséggel súlyozott fluxusértékeket jelentik, míg a folytonos kék és piros vonalak a teljes égboltra vett átlagot. Észrevehető, hogy erős korreláció nem jelentkezik az ábra alapján, a görbe lapos és nagy a szórás a kvadránsokra nézve. Ennek egy lehetséges magyarázata az, hogy a WebSky szimulációba nincsen beépítve az a faktor, hogy egy mock galaxis környezetét figyelembe vegye, azaz nincs (vagy nem bizonyított) direkt összefüggés aközött, hogy egy kvazár elhelyezkedése kozmikus skálán miként befolyásolja annak rádiófluxusát.



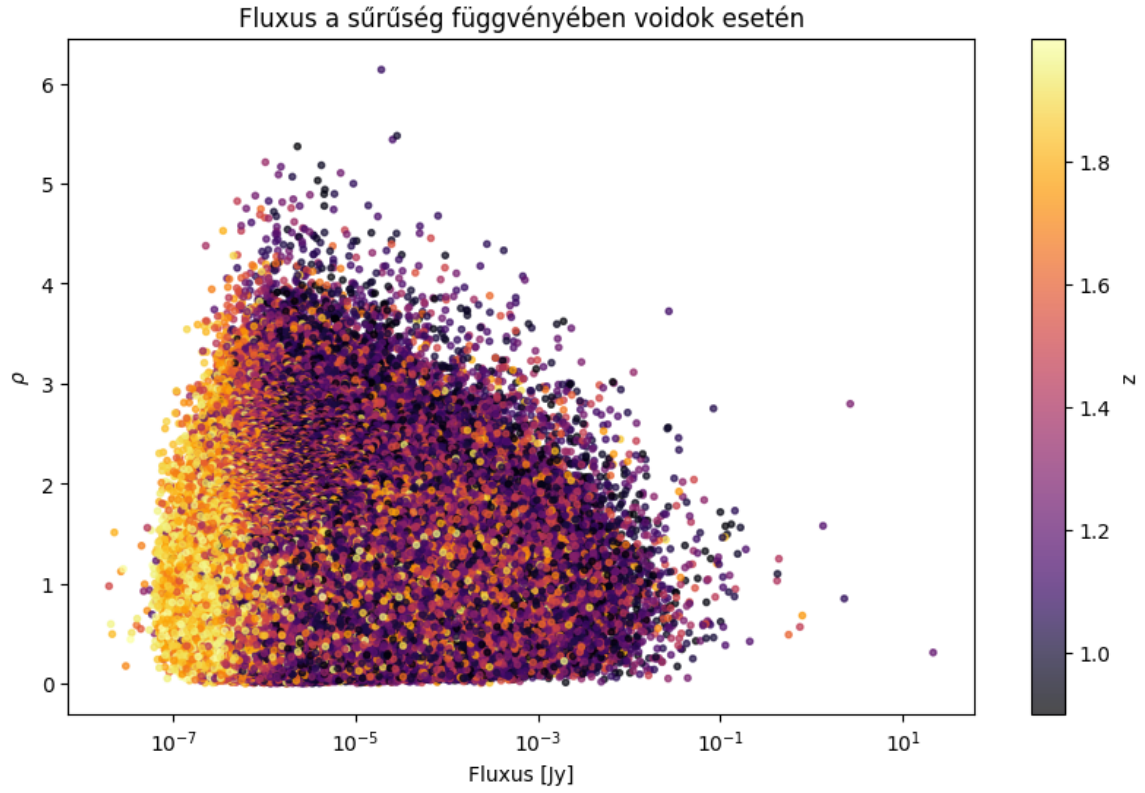
15. ábra. Összevetem a nagyobb sűrűségű halmazokba és legmélyebb voidokba tartozó mock galaxisok térfogattal súlyozott fluxusát az egyes relatív sugár által meghatározott héjakban.

3.3.2. Megközelítés vöröseltolódás szerint

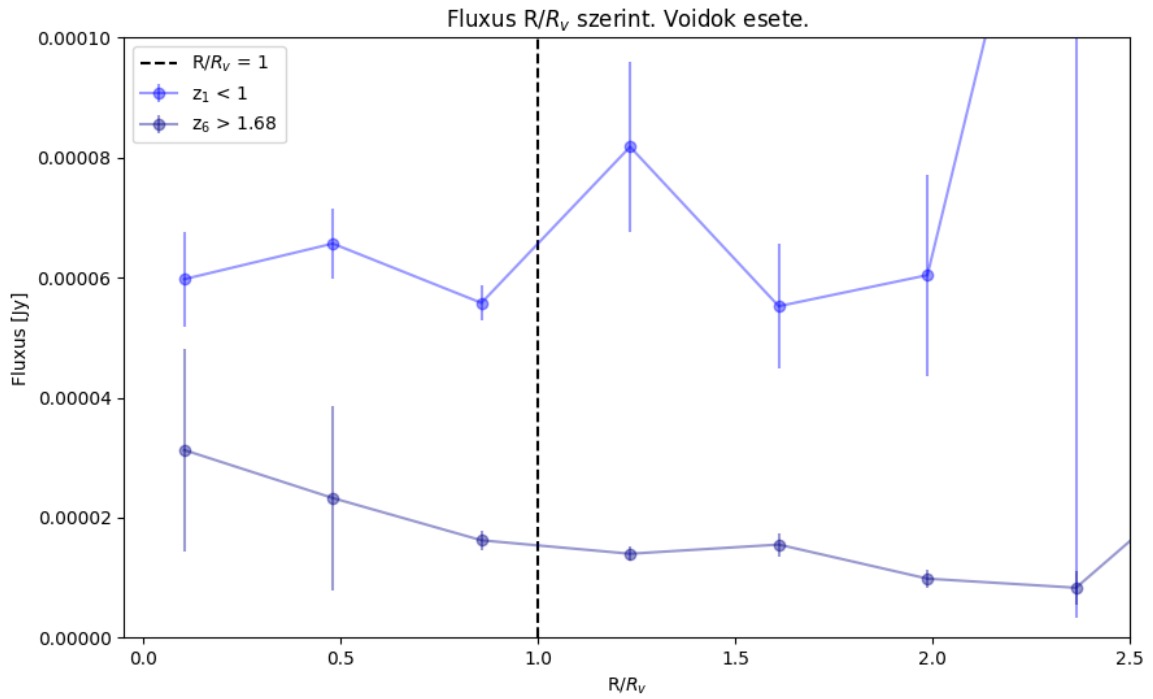
Emellett azonban más faktorok is befolyásolhatják a fluxus értékét és nagyságát. Az adatok analizálásából kitűnik, hogy szoros kapcsolat van a rádiósugárzás mértéke és a vöröseltolódás között a WebSky szimuláció alapján (16. ábra). Láthatjuk, hogy ezen az ábrán az x skálán a fluxus van feltüntetve logaritmikus skálán, míg az y tengelyen a sűrűség. Ez a sűrűségérték az a paraméter, amelyet a Revolver rendel hozzá a mock galaxisokhoz. A színezést vöröseltolódás szerint állítottam be, mivel jól leírja azt a tulajdonságot, hogy nagyobb vöröseltolódású objektumok kisebb fluxusparaméterrel rendelkeznek, míg kisebb vöröseltolódásúak nagyobbval.

A fent említettekből kiindulva, megvizsgáltam azt is, hogy milyen összefüggés van a térfogattal súlyozott fluxusértékeknek a korábban is definiált $\frac{R}{R_v}$ héjakban voidok és halmazok esetén. Az eljárás során nem a struktúrák átlagos sűrűségétől való extrém eltérésüket vettem figyelembe, hanem vöröseltolódás szerinti eloszlásukat. Hat, közel egyenlő mock galaxist tartalmazó bint definiáltam z szerint, így különbséget tudtam tenni az alacsonyabb és magasabb vöröseltolódásnál található struktúrák között. Statisztikai megfontolásokból a teljes égboltra vett katalógussal dolgoztam.

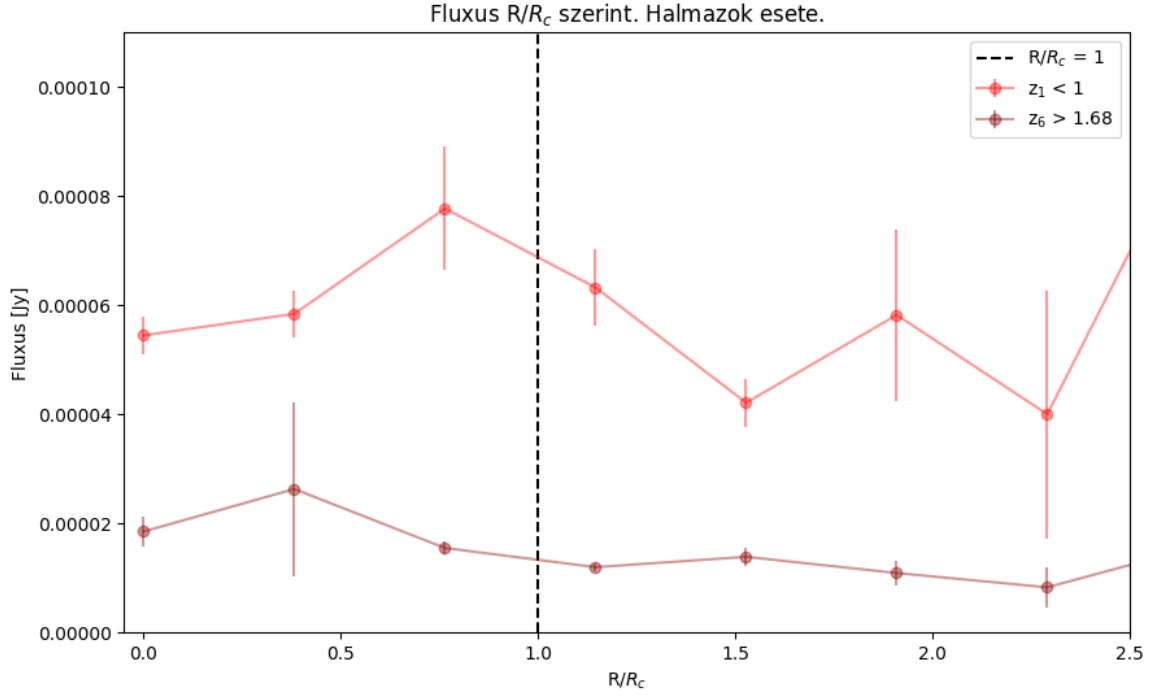
Hasonlóan a korábbi módszerhez, a meghatározott $\frac{R}{R_v}$ intervallumokban megbecsültem az átlagos fluxust különböző vöröseltolódásoknál. Ennek az eredményét látjuk a 17. ábrán, voidokra vonatkozóan. A legkisebb és legnagyobb vöröseltolódású struktúrákat ábrázoltam, így jól látszik, hogy kisebb z esetén nagyobb a fluxusérték. Továbbá, a 17. ábrán a halmazok esetében, szintén fennáll ez az összefüggés.



16. ábra. A fluxus logaritmusikus skálán feltüntetve a lokális sűrűségparaméter szerint. A színskala a vöröseltolódás függvényében készült.



17. ábra. Térfogattal súlyozott átlagos rádiófluxus a voidokhoz rendelt mock galaxisok esetén két különböző vöröseltolódás intervallumban relatív sugár szerint feltüntetve



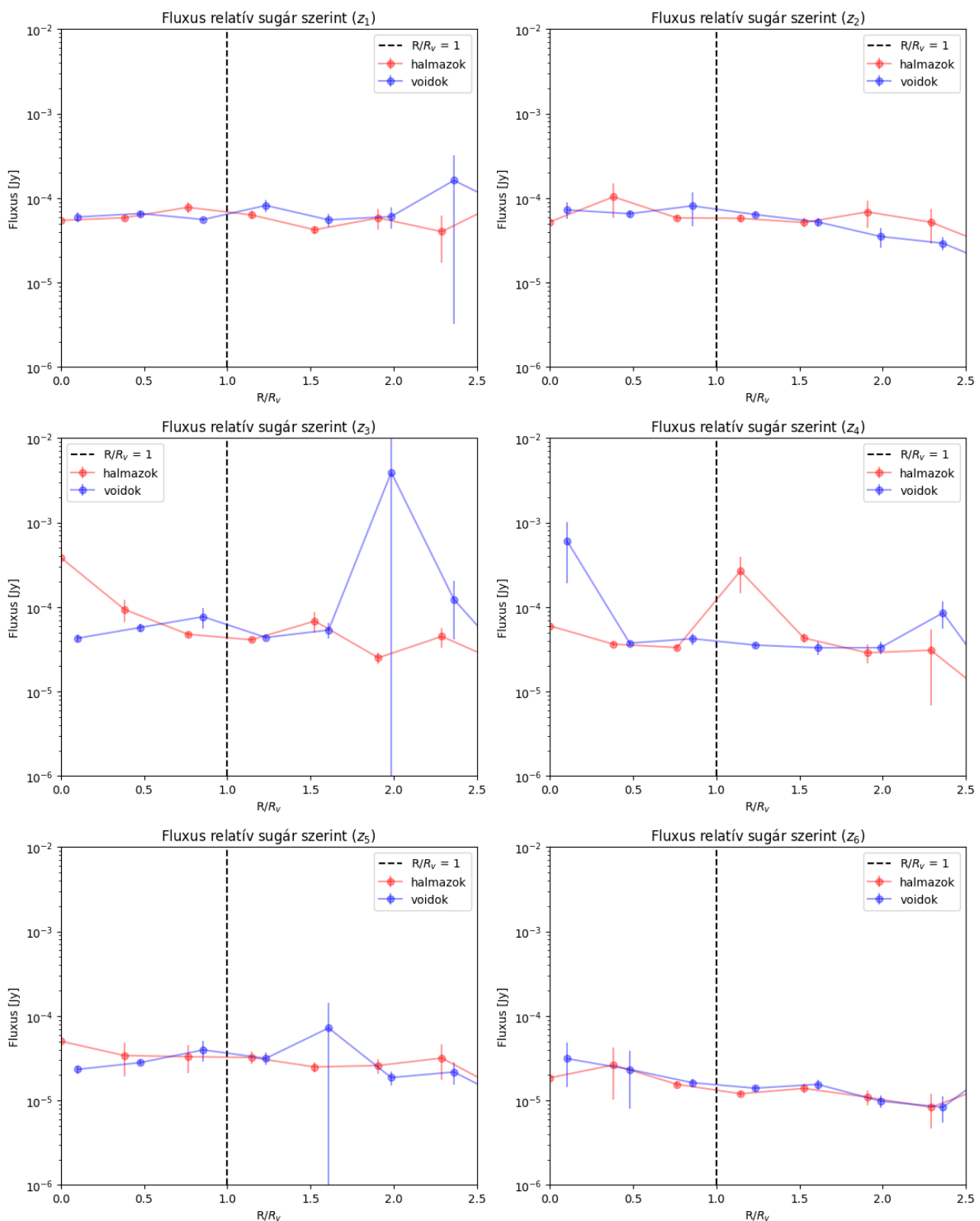
18. ábra. Fluxus a relatív sugár függvényében alacsony és magas vöröseltolódású halmazokra nézve.

Annak reményében, hogy vöröseltolódás alapján összefüggést találok a struktúra típusa és a mock kvazárok fluxusa között, összehasonlítottam az adott z binben a profilokat. A 19. ábrán láthatjuk az eredményt. A z indexében számmal jelöltem, hogy melyik binről van szó, egyessel a legkisebb, míg hatossal a legnagyobb vöröseltolódást, ezeknek a pontos határait a 2. táblázatban is összefoglaltam. Kiemelném azt, hogy az ábrák horizontális tengelyén $\frac{R}{R_v}$, azaz a voidok relatív sugara van feltüntetve. Ennek értelmében, a piros görbék kissé el vannak tolódva, hiszen ezek a halmazok relatív sugara szerint készült binek szerint vannak ábrázolva. Tehát különbség van a $\frac{R}{R_v}$ és $\frac{R}{R_c}$ alapján definiált héjak között.

z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6
0.9 $\rightarrow$ 1	1 $\rightarrow$ 1.14	1.14 $\rightarrow$ 1.28	1.28 $\rightarrow$ 1.45	1.45 $\rightarrow$ 1.68	1.68 $\rightarrow$ 2.1

2. táblázat. Vöröseltolódás intervallumok pontos határai.

Ezen végső statisztikai teszt képet ad arról, hogy van-e szignifikáns különbség a mock kvazárok rádiófluxusában, attól függően, hogy milyen nagyskálás szerkezetekhez tartoznak, valamint hogy ezeken belül hol helyezkednek el. Az eredmények alapján, az eddigi megközelítések szerint, nem látunk korrelációt a rádiófluxust figyelembe véve, esetenként az eredmények szórása is igen nagy. Amint már kiemelttem korábban, ez a becslés szimuláción alapul, tehát felvetül a kérdés, hogy a Gaia teleszkóp észlelései nyomán készült Quia kvazárkatalógus mutat-e ehhez hasonló (vagy különböző) eredményeket. A dolgozatban bemutatott téma folytatása a fent bemutatott kérdésköröknek a részletesebb vizsgálata észlelési adatok alapján is.



19. ábra. A fenti ábrák a hat különböző vöröseltolódás bin szerint készültek, átlagolt fluxus látható a relatív void és halmaz sugár függvényében. Az első ábrát kiemelve ($0.9 \rightarrow 1$ vöröseltolódás intervallumon) észrevehető, hogy nincsen jelentős különbség a szimulált kvazárok rádiósugárzásában. Közel azonos a fluxus profilja a voidokhoz és a halmazokhoz tartozó galaxisoknak is. A többi ábra is hasonló viselkedésre utal.

4. Összefoglalás

A WebSky szimulációra alapozva megvizsgáltam, hogy a Quaia-hoz hasonló rádió mock katalógusban milyen nagyskálás struktúrákat lehet definiálni, és ezek milyen statisztikus összefüggésben állnak a szimulált rádió tulajdonságokkal. A dolgozat legfőbb eredményei a következők:

- Rádió mock katalógus létrehozása két WebSky szimuláció segítségével
- Sűrűségbecslés és nagyskálás szerkezetek keresése a Revolver programmal
- Sűrűségprofil becslése voidok és halmazok esetén különböző paraméterértékek mellett
- A fluxus és a mock galaxis relatív helyzetének összehasonlítása

A cél tehát az volt, hogy képet alkossak arról, hogy egy kvazár attól függően, hogy sűrűbb régióban (halmazokban) vagy ritkásabb környezetben (voidokban) helyezkedik el, illetve ezen belül is a struktúra centruma közelében vagy annak szélén található, milyen rádiótulajdonságokkal bír a WebSky szimuláció alapján. Munkám során sikerült modellezni a voidok és halmazok sűrűségeloszlását, amely konzisztens a kozmológiai feltevésekkel. A profilok azt is tükrözik, hogy ezen struktúrák egymást „váltogatva” rajzolják ki a kozmikus hálót. Továbbá, ezek felhasználásával összevetettem a WebSky szimuláció alapján becsült modell fluxus-értékeket a mock galaxisok lokális környezetével. A projekt ezen részében, a fentebb részletezett megközelítés szerint, nem találtam erős korrelációt, ezért vöröseltolódás szerint is megvizsgáltam a felvetett kérdést. Ebben az esetben sem találtam egyértelmű következtetést a szimuláció alapján.

A munkám lehetséges folytatásai közé tartozik a Quaia kvazár katalógus hasonló statisztikai vizsgálata, illetve a kvazárok rádió tartománytól eltérő sávokban való további szimulációs vagy megfigyelési elemzése is. A dolgozatban részletezett megközelítés alapján, illetve a jövőbeli tervek kidolgozásával, lehetőség nyílik feltérképezni a kozmikus hálót nagyobb vöröseltolódás tartományokon, ami az Univerzum korábbi szerkezetéről és fejlődéséről alkot képet.

Köszönetnyilvánítás

Hálás köszönet illeti kutatócsoportomat a szakmai segítségért és támogatásért. Dr. Kovács András vezetett be a kozmológia tudományába, ismertette meg velem a nagyskálás szerkezetek típusait és tulajdonságait, segített formálni gondolkodásmódomat és problémamegoldó képességeimet. Köszönet illeti a konzultálásokért, melyek során mindig részletesen válaszolt és reflektált a felmerülő kérdéseimre, illetve a közös ötletelésekért melyek elengethetetlenek voltak a munkám körvonalazódásához és kivitelezéséhez. Nestor Arsenovnak köszönöm, hogy részletesen megismertette velem az aktív galaxismagok működését, emellett azt is, hogy szakmai kérdésekben mindig körültekintően és segítőkészen jelen volt.

Köszönöm a HUN-REN CSFK Csillagászati Intézete demonstrátori programjának a támogatását, illetve azoknak a kutatóknak, akik által ez megvalósulhatott. Dr. Molnár Lászlónak köszönöm a támogatását a demonstrátori munkám során, illetve a tanácsokat, melyek nagyban hozzájárultak kutatómunkám fejlesztéséhez. Nem utolsó sorban köszönöm a barátaim és évfolyamtársaim támogatását és hasznos észrevételeiket a munkám során.

A kutatás az MTA-CSFK *Lendület* Nagyskálás Szerkezet Kutatócsoportban valósult meg, a Magyar Tudományos Akadémia Lendület programjának támogatásával.

Hivatkozások

- Arsenov, N., Frey, S., Kovács, A., & Slavcheva-Mihova, L. 2024, arXiv e-prints, arXiv:2411.19531, doi: 10.48550/arXiv.2411.19531
- Aubert, M., Cousinou, M.-C., Escoffier, S., et al. 2022, MNRAS, 513, 186, doi: 10.1093/mnras/stac828
- Camacho-Ciurana, G., Lee, P., Arsenov, N., et al. 2024, A&A, 689, A171, doi: 10.1051/0004-6361/202348970
- Clowes, R. G., Harris, K. A., Raghunathan, S., et al. 2013, MNRAS, 429, 2910, doi: 10.1093/mnras/sts497
- Gaia Collaboration, Bailer-Jones, C. A. L., Teyssier, D., et al. 2023, A&A, 674, A41, doi: 10.1051/0004-6361/202243232
- Génova-Santos, R. T. 2020, in Reviews in Frontiers of Modern Astrophysics; From Space Debris to Cosmology, ed. P. Kabáth, D. Jones, & M. Skarka, 311–347, doi: 10.1007/978-3-030-38509-5_11
- Kovács, A., Jeffrey, N., Gatti, M., et al. 2022, MNRAS, 510, 216, doi: 10.1093/mnras/stab3309
- Li, Z., Puglisi, G., Madhavacheril, M. S., & Alvarez, M. A. 2022, JCAP, 2022, 029, doi: 10.1088/1475-7516/2022/08/029
- Nadathur, S., & Hotchkiss, S. 2015, MNRAS, 454, 2228, doi: 10.1093/mnras/stv2131
- Neyrinck, M. C. 2008, MNRAS, 386, 2101, doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13180.x
- Schneider, P. 2015, Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction (Springer Berlin Heidelberg), doi: 10.1007/978-3-642-54083-7
- Spergel, D. N., Verde, L., Peiris, H. V., et al. 2003, ApJS, 148, 175, doi: 10.1086/377226
- Stein, G., Alvarez, M. A., Bond, J. R., van Engelen, A., & Battaglia, N. 2020, JCAP, 2020, 012, doi: 10.1088/1475-7516/2020/10/012
- Storey-Fisher, K., Hogg, D. W., Rix, H.-W., et al. 2023, Quiaia: The Gaia-unWISE Quasar Catalog, 1.0.0, Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.10403370
- . 2024, ApJ, 964, 69, doi: 10.3847/1538-4357/ad1328
- Urry, C. M., & Padovani, P. 1995, PASP, 107, 803, doi: 10.1086/133630
- Yadav, J. K., Bagla, J. S., & Khandai, N. 2010, MNRAS, 405, 2009, doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16612.x