

ORSZÁGOS TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

**Euclid észlelések modellezése:
a nagyskálás szerkezet és a kozmikus háttérsugárzás korrelációi**

KATONA JÚLIA

*Fizika BSc, 3. évfolyam
Eötvös Loránd Tudományegyetem
Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont*

TÉMAVEZETŐ: DR. KOVÁCS ANDRÁS

*MTA-CSFK Lendület Nagyskálás Szerkezet Kutatócsoport
Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont
Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet*

Budapest, 2025. január 8.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés: A Euclid küldetés	4
2. Elméleti háttér	5
2.1. A standard kozmológiai modell	5
2.2. Kozmikus anyagfajták	6
2.3. A kozmikus voidok	7
2.4. A kozmikus háttérsugárzás	7
3. Módszerek	11
3.1. Referencia minta: Flagship szimuláció	11
3.2. Sötét anyag halo katalógus: WebSky szimuláció	13
3.3. Halo benépesítő algoritmus: <code>pyHOD</code>	14
3.4. Voidok beazonosítása: REVOLVER program	15
3.5. Háttérsugárzás korrelációja: WebSky háttérsugárzás térképekkel	16
4. Eredmények	18
4.1. Galaxis tulajdonságok	18
4.2. Void tulajdonságok	19
4.3. Háttérsugárzás korrelációi	22
5. Diskusszió	27
Függelék: Saját eredmények	28
Hivatkozások	31

Kivonat

A kozmikus voidok az átlagnál sokkal kevesebb galaxist tartalmazó, alacsony átlagsűrűségű régiók, amelyek akár 100 Mpc átmérőjűek is lehetnek. A kozmikus voidok és galaxis szuperhalmazok, mint az univerzum legnagyobb struktúrái, hatással vannak a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzásra is, amely hatások összefüggnek a kozmológiai paraméterekkel.

Jelen kutatásban a Euclid űrteleszkóp észleléseit szimuláltam nagy vöröseltolódású, $1,3 < z < 1,8$ tartományban, amely segítségével a kozmikus voidok és a háttérsugárzás lencsézetttségének korrelációit vizsgáltam, amelyek eddigi előrejelzésekben nem szerepeltek. Újítás továbbá, hogy a Euclid észlelések előrejelzésére készült Flagship szimuláció helyett a publikusan elérhető WebSky szimuláció használtam az észlelések modellezésére, mivel a Flagship szimuláció nem rendelkezik háttérsugárzás térképekkel.

A Flagship referenciához illeszkedő paraméterekkel benépesítettem a WebSky sötét anyag halo katalógusát galaxisokkal, majd Voronoi-tesszelációval beazonosítottam a nagyskálás szerkezeteket a galaxisok elhelyezkedéséből. A voidok effektív sugarából és a környezetük átlagos sűrűségéből származó λ_v paraméter alapján különválasztottam őket. Stackeltem, vagyis egymásra helyeztem a háttérsugárzás lencsézettsségi térképéből a voidok koordinátaival megegyező területeket, amelyekből így felerősödtek a lencsézettsségi jelek.

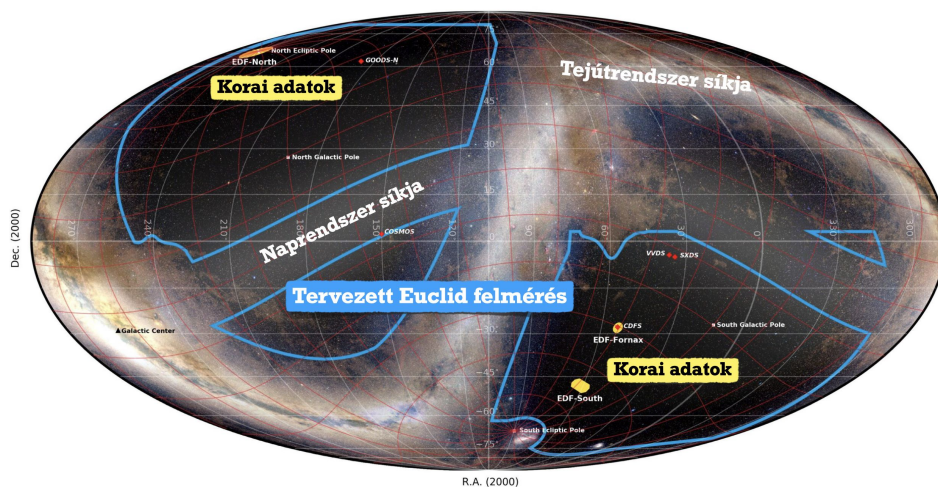
Az alacsony $\lambda_v < -5$ paraméterű voidok tipikusan alacsony sűrűségű térségben helyezkednek el ("voidon belüli voidok"). A stackelt háttérsugárzási térképen szintén látható egy negatív lencsézettsségű, $R/R_{void} \approx 0,8$ relatív void sugár méretű terület. A magas $\lambda_v > 10$ paraméterű voidok átlagosan kisebbek, és átlagosan nagyobb sűrűségű térségekben helyezkednek el, ezeket "felhőn belüli void"-ként azonosítottam.

Összességében az eredmények jó egyezést mutatnak korábbi SDSS, illetve DES felmérésekből származó háttérsugárzás korrelációkkal. Ez alapján a jövőben a Euclid észlelésekből is várhatóan kimutathatóak lesznek a voidok és a háttérsugárzás korrelációi, ami segíthet új információt szerezni a kozmológiai paraméterekről is.

1. Bevezetés: A Euclid küldetés

A Euclid (kiejtés: /'ju:klɪd/) küldetés az Európai Űrügynökség (European Space Agency, ESA) projektje, amelynek fő célja az univerzum sötét komponenseinek, a sötét anyagnak és a sötét energiának a vizsgálata. Emellett a galaxisok kozmikus hálójának és az univerzum nagyskálás szerkezetének a korábbiaknál kiterjedtebb feltérképezése is a küldetés része - mind az átlagosnál sűrűbb galaxishalmazok, mind az átlagnál kevesebb galaxist tartalmazó kozmikus voidok felmérése is ide tartozik (Euclid Red Book, Laureijs és tsai. 2011). (Jelen kutatásban a *kozmi-kus void* vagy *void* terminológiát használjuk, mivel nemzetközi és hazai viszonylatban is ez a legelterjedtebb.)

A Euclid űrteleszkópot 2023. július 1-jén bocsátották fel, és 2024 elején kezdte el az égboltfelmérési programját. A tervek szerint 6,5 év alatt közel 15.000 deg² területet fog felmérni, ami az égbolt közel egyharmada (Laureijs és tsai. 2011). Az észlelt területek kihagyják a Tejút és a Naprendszer síkját, a pontos égbolt területek az 1. ábrán láthatóak. Az űrteleszkóp két fő műszert tartalmaz: a vizuális tartományban fotometriai méréseket készítő VIS, és a közeli infravörös tartományban észlelő NIR műszereket. Emellett színeképeket rögzítő résnélküli spektrográf műszer is található az űrteleszkópban.



1. ábra. A Euclid égboltfelmérés elhelyezkedése az égbolton. Kép forrása: ESA / Planck Collaboration / A. Mellinger / Kovács A.

A spektroszkópiai méréseket vöröseltolódás meghatározásokra is fogják használni, a $z=0,8-1,9$ tartományban, és a spektroszkópiai vöröseltolódás hibáját $\sigma_z \leq 0,001(1+z)$ alatt tervezik tartani. Várhatóan 50 millió galaxist tudnak megmérni, amelyeknél az észlelési teljesség (completeness) 45 % felett lesz ebben a vöröseltolódás-tartományban (Laureijs és tsai. 2011). Jelen kutatásban erre a távolság tartományra fókuszálunk, mivel ilyen távoli galaxisok kapcsán még kevés észlelési adat áll rendelkezésre más égboltfelmérésekből.

Az adatkibocsátás egyik első fázisa a Data Release 1 (DR1) lesz 2026-ban, ami az első része lesz a teljes adatkibocsátásnak, és nagyjából 2500 deg² területet fog lefedni. Tehát a Euclid ész-

lelési adatokon alapuló kozmológiai kutatások mostanáig a szimulációkra és az előrejelzésekre koncentráltak. Az észlelések modellezésére készült el néhány évvel ezelőtt a szimulált Flagship galaxis katalógus (Euclid Collaboration, Castander és tsai. 2024), amelyet széles körben használtak a Euclid nagyskálás szerkezetére vonatkozó előrejelzésekhez. Jelen kutatás is ezt kutatási vonalat követi, további szimulációk bevonásával ebbe a modellezési folyamatba.

2. Elméleti háttér

A következőkben a kutatás elméleti háttérét tekintem át, nagyban támaszkodva Cserepes és Petrovay 2002 és Peacock 2010 leírásaira.

2.1. A standard kozmológiai modell

Jelen kutatásban a manapság legelterjedtebb Λ CDM kozmológiai modellel jellemzem az univerzumot. Ebben a modellben nincsen az univerzumnak térbeli görbülete, és figyelembe veszi mind a sötét energia (Λ) hatását a tágulásra, mind a sötét anyag (CDM=cold dark matter, vagyis hideg sötét anyag) hatását a kozmikus nagyskálás szerkezet, a galaxishalmazok és voidok kialakulására.

Az univerzum mechanikai energiamegmaradását a Friedmann-egyenlet írja le:

$$\frac{8}{3}\pi G\rho = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + k\frac{c^2}{a^2} \quad (1)$$

ahol G a gravitációs állandó, ρ az univerzum sűrűsége, a a skálafaktor, és a k szorzó lehetséges értékei: $+1, 0, -1$. A $k = 0$ értéket választva az univerzum összenergiája nullának adódik, ami az Einstein-de Sitter modellnek felel meg. Ebben a modellben az univerzumnak nincs alapvető görbülete (azaz "sík"), tehát az euklidészi térnek feleltethető meg.

Az univerzum görbülete vizsgálható a jelenlegi sűrűség és a kritikus sűrűség (ρ_c) összehasonlításával. Az univerzum sűrűség paramétere (Ω) így:

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c} \quad (2)$$

A paraméter értékéből következtetni tudunk a görbületre, azaz $\Omega \approx 1$ esetben $k = 0$ vagyis sík univerzumot kapunk. A sűrűség paramétert a sötét anyag (Ω_m), a barionos vagy atomos anyag (Ω_b), és a sötét energia (Ω_Λ) anyagsűrűség paraméteréből határozzuk meg:

$$\Omega = \Omega_m + \Omega_b + \Omega_\Lambda \quad (3)$$

A paraméter jelenlegi legpontosabb értéke egyhez közeli, ami arra utal, hogy a világegyetem nagyléptékben euklidészi tér.

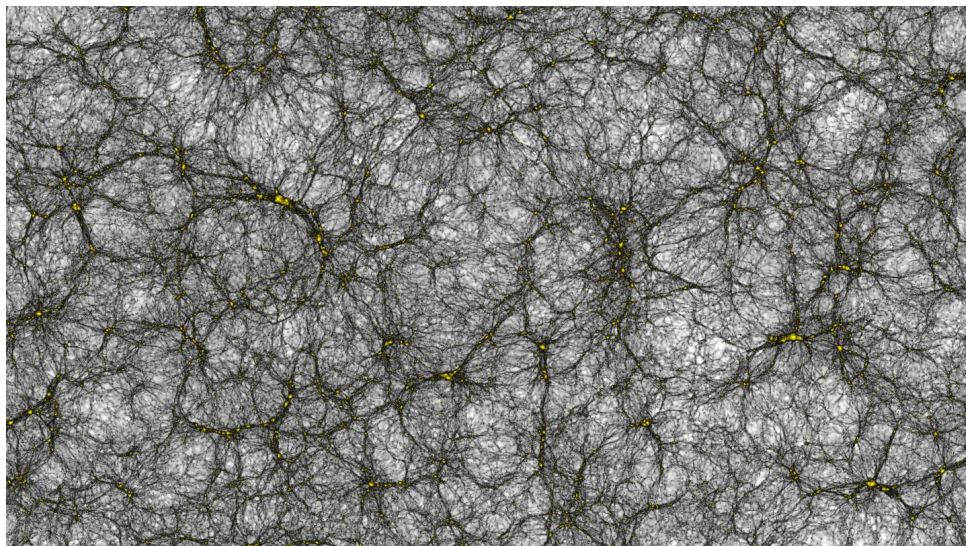
2.2. Kozmikus anyagfajták

Jelenlegi tudásunk és a fenti kozmológiai modell értelmében mintegy 5% az atomos anyag aránya az univerzumban, benne az összes csillaggal, galaxisal, és csillagközi anyaggal.

A nagyjából 25%-os részarányú hideg sötét anyag egy nagytömegű, csak gravitációs kölcsönhatás alapján megfigyelhető részecskét jelent. Ezek a részecskék halókba rendeződnek, és a jelenlétük miatt megnövekedett sűrűség és gravitációs erő hatással van a környezetében lévő atomos anyagra. A sötét anyag jelenléte elősegíti a galaxisok kialakulását, a galaxishalmazok létrejöttét, és az univerzum nagyskálás szerkezetének létrejöttét (Bond, Kofman és Pogosyan 1996). A sötét anyag halók hálószerű szerkezetekbe, más néven filamentumokba rendeződik, amelyek találkozásainál galaxishalmazok találhatóak; a létrejövő nagyobb üres régiókat pedig kozmikus voidoknak nevezzük (a 2. ábra).

A modell legkevésbé ismert része a közel 70% sötét energia, ami a jelenleg kialakult vélekedés szerint az univerzum néhány milliárd évvel ezelőtt kezdődött gyorsuló tágulásért felelős, feltehetőleg a vákuum egy furcsa eredendő, "anti-gravitációs" tulajdonsága lehet. Különösen a kozmikus voidokban figyelhető meg a hatása, mivel az alacsony anyagsűrűség miatt ott még nagyobb a sötét energia relatív fontossága a látható és a sötét anyaghoz képest.

Az említett kozmológiai paraméterek értékeit az ESA Planck űrtávcső 2018-as, eddigi legnagyobb pontosságú adatai alapján meghatározott értékeknek vettem a szimulációkban, amelyek az alábbiak: $\Omega_m = 0,31$, $\Omega_b = 0,049$, $\sigma_8 = 0,81$, $n_s = 0,965$, $h = 0,68$, $\tau = 0,055$ (Planck Collaboration, Aghanim, Akrami, Ashdown, Aumont, Baccigalupi, Ballardini, Banday, Barreiro, Bartolo, Basak, Battye és tsai. 2020).



2. ábra. A kozmikus háló illusztrációja. A kép forrása: Joachim Stadel, UZH

2.3. A kozmikus voidok

A világegyetemet benépesítő galaxisokat, galaxishalmazokat, szuperhalmazokat egyesítő kozmikus struktúrák alkotják a kozmikus nagyskálás szerkezetet. Ezek legnagyobbikái a voidok vagy kozmikus üregek, amelyek olyan régiók, amelyek sűrűsége sokkal kisebb a környezetük átlagsűrűségétől. A jelenleg ismert voidok sugara 10 Mpc/h-tól akár 100 Mpc/h felettig terjed. Habár nem szabályos gömb alakúak, átlagos alakjuk jól közelíthető gömbbel. Egy void effektív sugara (R_{eff}) a void térfogatának megfelelő gömb sugara, ami egy széles körben használt definíció a statisztikai analízis során.

Az alacsony sűrűség miatt a voidokon belül nagyobb mértékben érvényesül a sötét energia taszító hatása, amely az univerzum gyorsuló tágulásáért felelős. Emiatt a bennük lévő galaxisok tulajdonságai és fejlődési története nagyban eltérhet a halmazokban találhatóaktól. Azaz vizsgálatukkal új módokon is következtethetünk a kozmológiai paraméterek értékeire és az univerzum fejlődési történetére (Van De Weygaert és Platen 2011, Pisani és tsai. 2015).

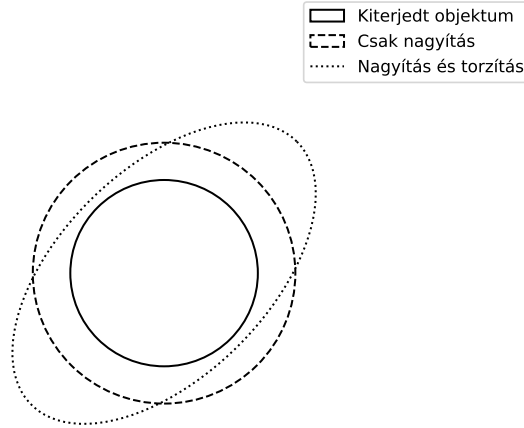
A Euclid megfigyelésekből várható void paraméterekre és az azokból levonható következtésekre többféle előrejelzést tettek. A voidok méretei (Contarini és tsai. 2022), vöröseltolódás-térbeli torzulásuk (Hamaus és tsai. 2022), a voidok és a galaxisok lencsésítésének korrelációi (Bonici és tsai. 2023, Radinović és tsai. 2023) segítenek a kozmológiai paraméterek pontosításában és a sötét anyag tulajdonságainak, evolúciójának jobb megértésében is. A kozmikus voidok és a kozmikus háttérsugárzás korrelációjáról nem született még Euclid előrejelzés, jelen kutatás ezt a rést tölti ki.

2.4. A kozmikus háttérsugárzás

Jelenlegi tudásunk szerint az univerzum 100 Mpc lépték felett homogénnek és izotrópnak tekinthető. Ez azt jelenti, hogy nagyléptékben mindenhol és minden irányban egységes az univerzum, nincsen kitüntetett hely vagy irány. Teljes homogenitás és izotrópia esetén azonban nem alakultak volna ki a ma létező nagyskálás kozmikus szerkezetek. A kialakulásukhoz valamiféle anizotrópiára volt szükség, az univerzum korai életéből, amely beindította az anyag sűrűsödését.

Ezen anizotrópiák ma a kozmikus háttérsugárzás (cosmic microwave background vagy CMB) fluktuációinak formájában azonosíthatók. Kibocsátódásakor ez egy $T \approx 3000K$ -es hőmérsékleti sugárzás volt Planck-eloszlással, amely a vöröseltolódás miatt mára $T = 2,73K$ hőmérsékletű, és a szubmilliméteres, illetve mikrohullámú tartományba esik. A kozmikus háttérsugárzás a rekombinációs korszakból ($z \approx 1065$ vöröseltolódás) származik, amikor az ionizált plazma semleges hidrogén atomokká kombinálódott, miután az univerzum tágulása miatt megnőtt a fotonok szabad úthossza (azaz a sugárzás "lecsatolódt" anyagról, az anyag átlátszóvá vált a fotonok számára, melyek így szabadon terjedhetnek minden irányban).

A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzásban található fent említett *elsődleges* anizotrópiák jelenlétét George Gamow már 1946-ban előrejelezte, amit az 1964-es első észlelés (Pensias



3. ábra. Kiterjedt objektum képének izotropikus konvergenciája ($\approx$ nagyítása) és nyírása ($\approx$ torzulása) gravitációs lencsézés hatására.

és Wilson) óta egyre jobban pontosítottak. Jelenleg a Planck űrtávcső mérései alapján $10^{-5} K$ nagyságrendű hőmérséklet különbségekről tudunk (Planck Collaboration, Aghanim, Akrami, Ashdown, Aumont, Baccigalupi, Ballardini, Banday, Barreiro, Bartolo, Basak, Benabed és tsai. 2020).

A dolgozat témáját is adó *másodlagos* anizotrópiák pedig információt adnak a nagyskálás szerkezetekről, amelyeken hosszú útja során a háttérsugárzás fotonjai szükségszerűen áthaladtak. Ezek közé az effektusok közé tartozik a gravitációs lencsehatás is, mely a fotonok eltérülését jelenti a gravitáció hatására. A háttérsugárzásnak a kozmikus voidokon való áthaladásakor azonban csak gyenge lencsézettséget figyelhetünk meg, vagyis a lencsézési effektus csak statisztikailag figyelhető meg.

A gyenge gravitációs lencsézést egy lencsézési potenciállal jellemezhetjük, amelyből levezethető a fény eltérülési szöge, és a kép nagyítását, torzulását leíró paraméterek. Részletes levezetésekért lásd: Meneghetti 2006, Pritchard 2009, és Bartelmann és Schneider 2001.

Egy kiterjedt objektum lencsézését egy vékonylencsén való áthaladásként kezelhetjük, ahol a lencsézési potenciál egy háromdimenziós newtoni potenciál levetítése és átskálázása a lencse síkjára.

$$\hat{\Psi}(\vec{\theta}) = \frac{D_{FL}}{D_L D_F} \frac{2}{c^2} \int \Phi(D_L \vec{\theta}, z) dz \quad (4)$$

θ a lencsézett kép szögátmérőjét jelöli, D_F a forrás távolsága a megfigyelőtől, D_L a lencse távolsága a megfigyelőtől, D_{FL} a lencse és a forrás távolságát jelöli.

A lencsézési potenciál gradiense adja az eltérülési szöget, míg a Laplace-operátort hattanva rá megkapjuk a konvergencia kétszeresét:

$$\Delta_x \hat{\Psi}(\vec{x}) = 2\kappa(\vec{x}) \quad (5)$$

Felületi sűrűségként kifejezve a konvergencia felírható a Poisson-egyenlet segítségével:

$$\kappa(\vec{\theta}) = \frac{1}{c^2} \frac{D_L D_{FL}}{D_F} \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta \Phi dz \quad (6)$$

Ha csak a perturbáló potenciált vesszük figyelembe:

$$\Delta \phi = \frac{3}{2} H_0^2 \Omega_0 \frac{\delta}{a} \quad (7)$$

ahol δ a sűrűségkontrasztot jelöli: $\delta \equiv \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}$. Így az effektív konvergencia kifejezése egy sík Λ CDM kozmológiában a $\delta(r, \theta)$ anyagsűrűségi mezőből (Raghunathan és tsai. 2020):

$$\kappa(\theta) = \frac{3H_0^2 \Omega_b}{2c^2} \int_0^{r_{max}} \delta(r, \theta) \frac{(r_{max} - r)r}{r_{max}} dr \quad (8)$$

Itt r a kép forrásának radiális, vagyis látóirányú távolságát jelöli, r_{max} pedig a maximális észlelési távolságot.

A lencsézési potenciált felírhatjuk egy lencsézési mátrixszal is, amely az izotropikus konvergencia (vagy nagyítás, szokásos jelölése: κ) és a nyírás (vagy torzítás, szokásos jelölése: γ) paramétereit tartalmazza.

$$A = \left(\delta_{ij} - \frac{\partial^2 \Psi(\vec{x})}{\partial x_i \partial x_j} \right) \quad \text{ahol} \quad \frac{\partial^2 \Psi(\vec{x})}{\partial x_i \partial x_j} \equiv \Psi_{ij} \quad (9)$$

Ψ_{ij} komponenseivel felírva A egy 2×2 mátrix lesz, és az elemeiből kifejezhetjük a konvergenciát és a nyírást:

$$\kappa = \frac{1}{2} (\Psi_{11} + \Psi_{22}) \quad (10)$$

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \quad \text{ahol} \quad \gamma_1 = \frac{1}{2} (\Psi_{11} - \Psi_{22}); \quad \gamma_2 = \Psi_{12} = \Psi_{21} \quad (11)$$

Tehát a lencsézési mátrix felírható:

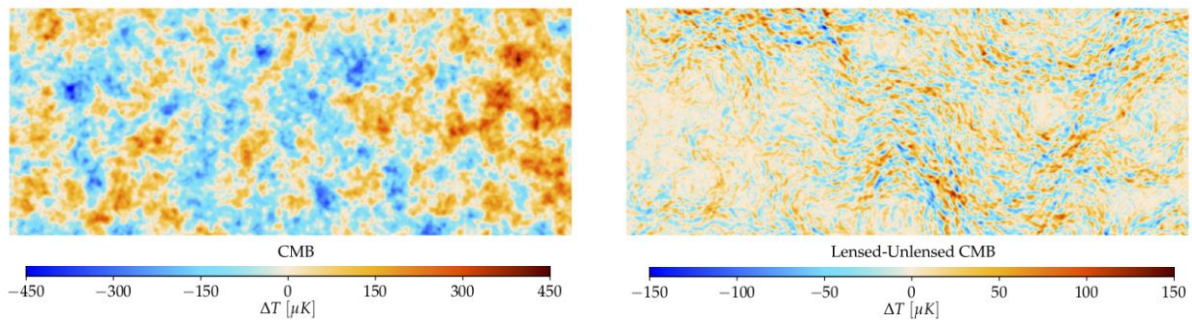
$$A = \begin{bmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

A konvergencia valójában a lencsézési kép felületi tömegsűrűsége a forráshoz képest, míg a nyírás a kép elliptikus megnyúlását paraméterezi (a 3. ábra). Mivel a voidokat gömbszimmetrikusnak feltételezzük, így a lencsézési mátrixnak csak a diagonális, vagyis nagyításért felelős komponenseit vesszük figyelembe, amelyek a gömbszimmetrikusság miatt azonos értéket vesznek fel. Az alacsony sűrűség miatt pedig a nagyítás, vagyis konvergencia negatív értékeket vesz fel (és a void széle felé, de még a voidon belül vesz fel nullát).

Ahogy a háttérsugárzás áthalad a kozmikus voidokon, az alacsony anyagsűrűség miatt a gravitációs lencsézés nagyító hatásának helyi minimumát tapasztaljuk. A lencsézettség mértéke

információt ad a sötét anyag eloszlásáról is, hiszen annak gravitációs hatása ugyanúgy eltéríti a fényt. Vagyis a voidok területén a háttérsugárzás lencsézettisége vizsgálatával a bennük elhelyezkedő sötét anyagot is fel tudjuk térképezni.

A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás hőmérsékleti spektruma Planck-eloszlást mutat, és az elsődleges anizotrópiái, vagyis a hőmérséklet fluktuációi (pixelekben mérve) Gauss-eloszlást mutatnak. A háttérsugárzás lencsézettisége (másodlagos anizotrópiák) eltorzítja ezt a közel tökéletes Gauss-eloszlást, így be tudjuk azonosítani, hogy az észlelt fluktuációk elsődleges vagy másodlagos anizotrópiákból származnak (4. ábra).

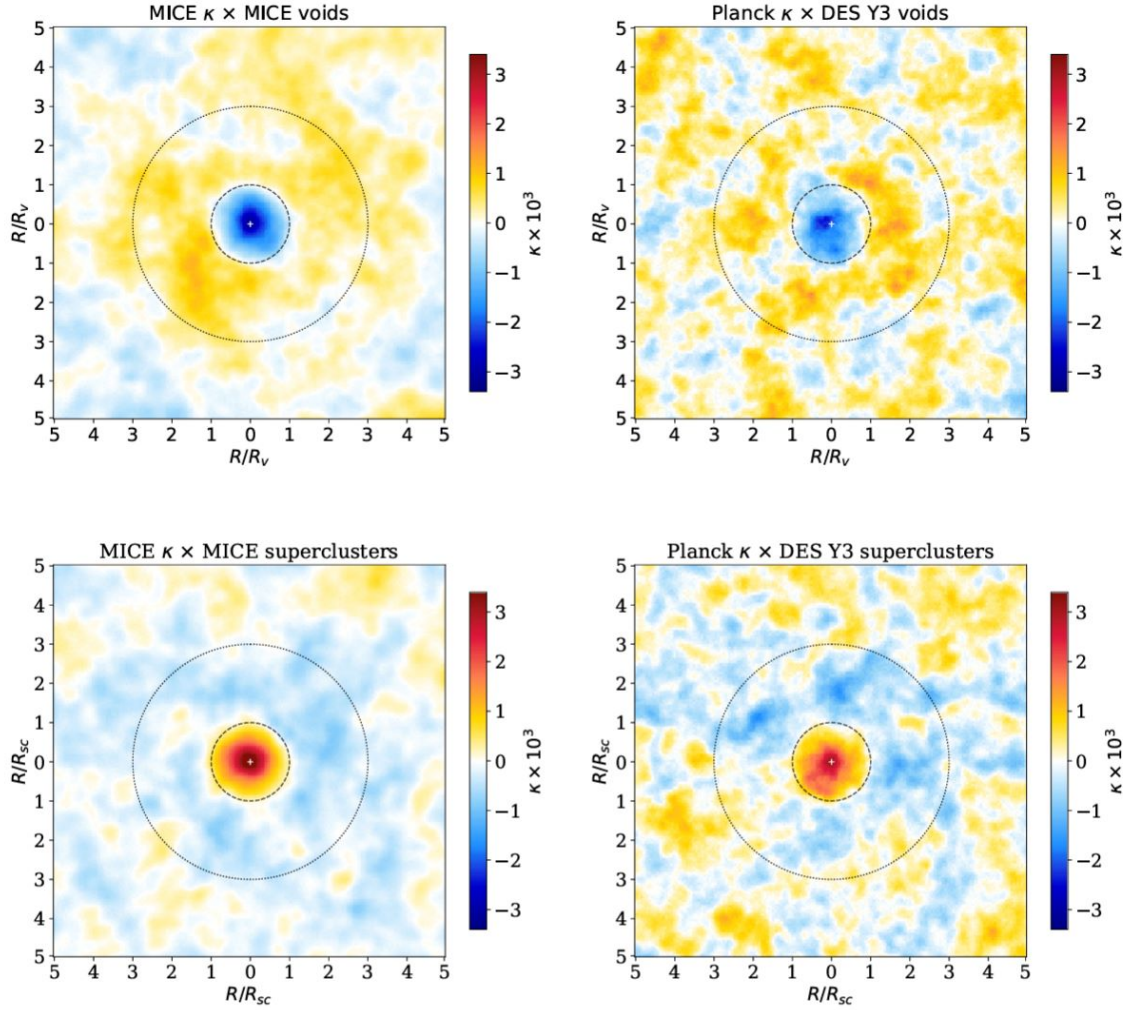


4. ábra. A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás lencsézettiségeinek illusztrációja a WebSky szimulációból, $20^\circ \times 8^\circ$ égbolt területéről, $1,4'$ nyálákkal megsimítva. A bal oldali kép az általunk a jelenben észlelhető háttérsugárzást modellezi, beleértve minden lencsézési hatást. A jobboldali képen a jelenben észlelt, lencsézett háttérsugárzásból kivonva a lencsézetlen, Planck-eloszlású háttérsugárzást, a visszamaradt lencsézési hatásokat láthatjuk. A kép forrása: Stein, Alvarez, Bond és tsai. 2020

A háttérsugárzás és a galaxishalmazok kapcsolatát már több kutatásban kimutatták, a BOSS megfigyelésekben a CMB lencsézettiségeinek konvergenciáját is megfigyelték (Cai és tsai. 2017, Raghunathan és tsai. 2020). Továbbá az integrált Sachs-Wolfe effektus korrelációját is megfigyelték voidokkal (Kovács, Sánchez és tsai. 2019). Az elektronok Compton-y szórásából a termikus Sunyaev-Zeldovich effektus korrelációját is észlelték (Alonso és tsai. 2018, Li és tsai. 2023).

A Dark Energy Survey (DES) észleléseiben megfigyelték a CMB lencsézettiség és a nagyskálás szerkezetek korrelációját: a voidok a lencsézettiség helyi minimumával korreláltak, míg a galaxishalmazok a helyi maximumával korreláltak (Vielzeuf és tsai. 2020, Kovács, Vielzeuf és tsai. 2022, 5. ábra). Tehát a nagyskálás szerkezet és a háttérsugárzás anizotrópiái korrelációt mutatnak. Az eddig ismert legnagyobb anizotrópia a CMB-ben, a "Cold Spot" ("Hideg folt") nevezű régió korrelál a kozmikus struktúrákban található nagy kiterjedésű voiddal (Kovács, Jeffrey és tsai. 2021).

A Euclid küldetés során is vizsgálni fogják a háttérsugárzási észlelések és a Euclid észlelések korrelációit. Az előrejelzések szerint ezek jobb megszorításokat fognak adni a Λ CDM modell kozmológiai paramétereire, különösen az atomos anyag Ω_b és a sötét energia Ω_Λ paramétereire (Euclid Collaboration, Ilić és tsai. 2022).



5. ábra. A háttérsugárzás lencsésítésének korábbi mérései a DES adatok és a MICE szimuláció alapján, külön voidokra (felső sor) és a legnagyobb halmazokra (alsó sor). A kép forrása: Kovács, Vielzeuf és tsai. 2022

3. Módszerek

Céлом a Euclid űrteleszkóp megfigyeléseinek modellezése volt. A referencia mintám a Flagship szimulációból származott, és a szűrési paraméterek kiválasztása Hamaus és tsai. 2022 Euclid void előrejelzésekről szóló cikkén alapult. A nagyskálás szerkezetek modellezését és korrelációját a kozmikus háttérsugárzással Camacho-Ciurana és tsai. 2024 alapján végeztem, a korrelációk vizsgálata során támaszkodva Kovács, Vielzeuf és tsai. 2022 és Vielzeuf és tsai. 2020 módszerére.

3.1. Referencia minta: Flagship szimuláció

Az összehasonlítási alapom a Flagship elnevezésű publikusan elérhető szimuláció volt, amely a Euclid küldetés részeként készült a várható megfigyelések modellezésére (elérés: *Cosmohub.es*,

Port d'Informació Científica (PIC) 2024). Ez egy nagy felbontású, N-test szimulációra épülő galaxiskatalógus, közel 400 db paraméterrel galaxisonként. A szimuláció egy oktáns égbolt kiterjedésű fénykúpot tartalmaz, amely az első nagyobb Euclid adatkibocsátás (DR1) észleléseit hivatott modellezni (Euclid Collaboration, Castander és tsai. 2024).

Az N-test szimulációval a sötét anyag részecskéket modellezték, amelyben 1 sötét anyag részecske tömege $m = 10^9 M_\odot/h$ volt. Ebből sötét anyag halo katalógust készítettek, majd a halókat galaxisokkal népesítették be, amelyeket központi- és társgalaxisokra választottak szét. Mindkét galaxistípusra meghatároztak várható számot és eloszlást, és az ehhez szükséges paramétereket. A központi galaxisok várható száma egy adott halo tömegnél:

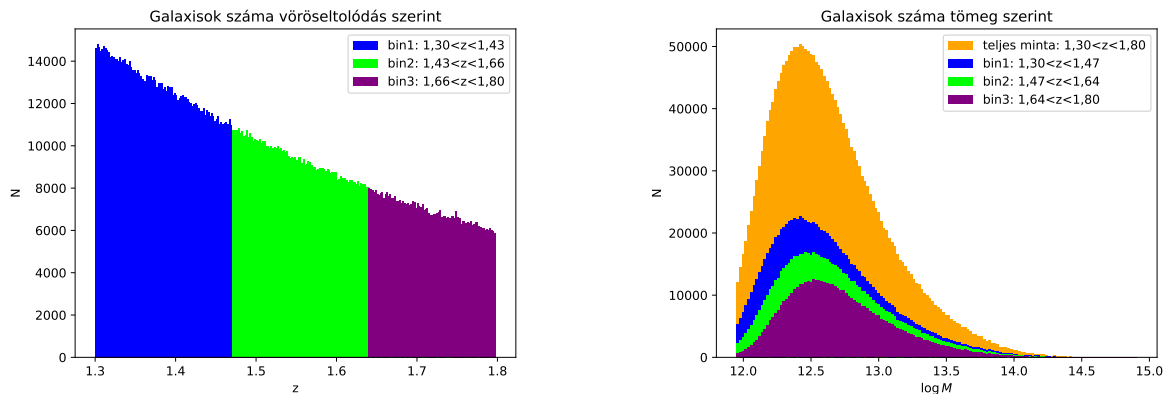
$$\langle N_k(M) \rangle = 1 \quad (13)$$

amennyiben a halo tömege meghaladja az általuk megadott minimum tömeget, ami 10 részecske tömege volt, tehát $M_{min} = 10^{10} M_\odot/h$. Amennyiben a halo tömege meghaladja ezt a tömeget ($M > M_{min}$), úgy bizonyosan lesz benne egy vagy több galaxis. Ezt az egyszerű modellt tekinthetjük egy lépcsőfüggvénynek.

A társgalaxisok várható számát az alábbi képlettel adták meg:

$$\langle N_t(M) \rangle = \left(\frac{M_{halo}}{f \cdot M_{min}} \right)^\alpha \quad (14)$$

amennyiben a halo tömege meghaladja a minimum tömeget ($M > M_{min}$). Az f -fel jelölt paraméter a MICE szimulációból származik, amely a Flagship készítőinek egy korábbi szimulációja. Ez egy "empirikus" paraméter, amelynek értékét konstans 15-nek vették (Carretero és tsai. 2015). Az α paraméter a halo tömeg növekedésének és az előforduló társgalaxisok számának kapcsolatát írja le - mivel 1-nek választották a Flagship készítői, így egy lineáris kapcsolat van a kettő között. A társgalaxisok eloszlását Poisson-eloszlásként határozták meg.



6. ábra. Flagship mintában a galaxisok eloszlása vöröseltolódás (balra) és tömeg (jobbra) szerint

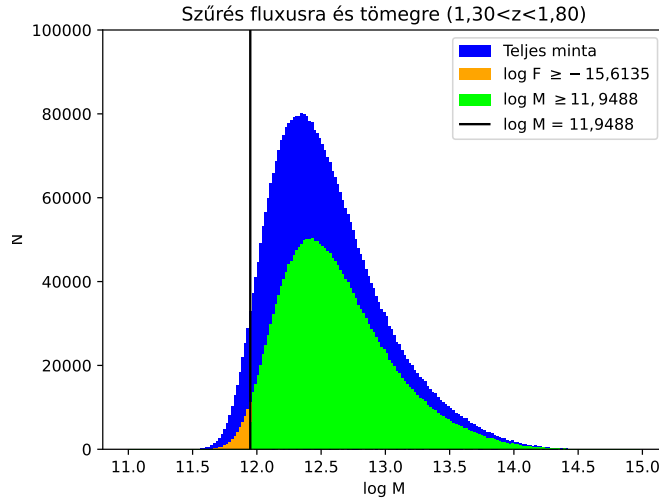
A galaxisok tömegét tovább korrigálták, egyrészt a kistömegű galaxisok számának növelésének céljából. Továbbá a luminozitás-tömeg reláció kapcsán is tettek korrekciókat, emiatt

a Flagship szimulált galaxis populációja nem tekinthető tisztán halo tömeg alapú benépesítés eredményének.

Referenciamintának a Flagship szimuláció $1,3 < z < 1,8$ vöröseltolódás tartományát vettem. Továbbá fluxus alapján megsűrtem ezt a mintát, ezzel modellezve az alacsony észlelési teljességet a halvány objektumok esetén. A fluxus küszöböt empirikusan $\log f = -15,6135$ -nek határoztam meg, hogy egy közel 60%-os mintát hozzak létre az eredeti szimulációhoz képest. A WebSky halo katalógushoz való illeszkedés érdekében az alacsony tömegű, $M < 11,9488 M_{\odot}/h$ galaxisokat is eltávolítottam a mintából (nagyjából 2%-a az eredeti mintának), így a maradék minta pontosan 60%-a az eredetinek. Végül három részre osztottam a mintát vöröseltolódás alapján, hogy pontosabban tudjam illeszteni a saját modellemet hozzá.

3.2. Sötét anyag halo katalógus: WebSky szimuláció

A WebSky publikusan elérhető szimuláció (elérés: *WebSky Extragalactic CMB Mocks - LSS Mocks 2024*) az univerzumban található sötét anyag eloszlásának modellezésére készült, Planck 2018 kozmológiát alapul véve (Stein, Alvarez, Bond és tsai. 2020). N-test szimulációból sötét anyag halo katalógust hoztak létre, amelyben egy sötét anyag részecske tömege $m = 2 \cdot 10^{11} M_{\odot}/h$, és a minimum halo tömeg $M_{min} = 10^{11,84} M_{\odot}/h$. Ez azt jelenti, hogy a Flagship-ben modellezett kis tömegű ($10^{11,17} M_{\odot}/h < M < 10^{11,84} M_{\odot}/h$) galaxisokat nem lehetséges a WebSky halókkal modellezni. Emiatt a Flagship mintát a 7. ábrán is látható módon a fluxus alapján történő vágás után tömeg szerint is megvágtam.



7. ábra. Flagship minta szűrése fluxusra

A katalógusban az alábbi adatok érhetők el minden halóról, $0 < z < 4$ vöröseltolódás tartományban: rektaszcenzió, deklináció, vöröseltolódás, pozíció [Mpc], sebesség [km/s], és tömeg [$M_{200\bar{\rho}_m}$].

A szimuláció részeként elérhetők kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás (CMB) térképek

különböző frekvencián, egy CMB lencsézési konvergencia térkép, illetve kozmikus infravörös háttérsugárzás (CIB), integrált Sachs-Wolfe effektus (ISW), termikus és kinetikus Sunyaev-Zeldovich effektus (tSZ és kSZ) térképek is. Ezeket a sötét anyag részecskék és a Navarro-Frenk-White (NFW) profil (Navarro, Frenk és White 1996) segítségével generálták. A konvergencia térképhez hozzáadtak még egy, a szimulációval nem korreláló random Gauss-eloszlású mezőt, hogy modellezzék a szimulációban elérhető legnagyobb vöröseltolódásnál nagyobb vöröseltolódásról származó hatásokat (Stein, Alvarez, Bond és tsai. 2020). Jelen kutatásban a voidok és a háttérsugárzás lencsézési konvergencia korrelációira fókuszáltam, amelynek vizsgálati módszerét a 3.5. alfejezetben írtam le.

3.3. Halo benépesítő algoritmus: pyHOD

A WebSky szimulációhoz készült a `pyHOD` nevű halo benépesítő algoritmus (Zhang 2024-02-19), amely Pythonban futtatható, és tetszőleges paraméterekkel használható. Az algoritmus által használt kozmológia: `astropy` Python könyvtár alapú sík Λ CDM kozmológia, $\Omega_0 = 0,31$ és $h_0 = 0,68$ megadott értékekkel. Az állandók eltérése a Flagship kozmológiától minimális, illetve a későbbiekben az ugyanezt a kozmológiát használó WebSky háttérsugárzás térképét is korreláltatom az algoritmus segítségével készített galaxis katalógussal, így nem módosítottam ezeket az értékeket.

Az algoritmus a galaxisokat központi és társgalaxisokra bontva kezeli, és így ad meg nekik várható értéket és eloszlást. A központi galaxisok számának várható értéke egy adott M halo tömegre:

$$\langle N_c \rangle = \tau \cdot \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{\log_{10}(M_{min}) - \log_{10}(M)}{\sigma} \right) \quad (15)$$

ahol $\operatorname{erf} z$ a Gauss-féle hibafüggvényt jelöli:

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\pi} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (16)$$

A minimum halo tömeg (M_{min}) a felhasználó által megadható értékű paraméter. A fenti eloszlás $M \ll M_{min}$ halo tömegre nulla valószínűséget ad arra, hogy van központi galaxis a halóban, míg $M \gg M_{min}$ halo tömegnél ennek valószínűsége egy, a Flagship modelljével azonosan. Azonban a Flagshiphez képest ez egy fokozatosabb átmenetet mutat a nulla és egy valószínűség között, így jobban tudja modellezni a minimum tömeg környékén fellépő szórást. Az algoritmus a központi galaxisok eloszlását egy adott M halo tömegben Bernoulli-eloszlással adja meg, amit randomszám generátor segítségével modellez.

A τ paraméter a skálázásért felel, vagyis hogy a lehetséges halók mennyi részében lesz galaxis, értéke 0 és 1 között szabadon megadható. Ezt a paramétert Camacho-Ciurana és mtsai 2024-es és Gao és mtsai 2023-es cikke alapján vezettem be Camacho-Ciurana és tsai. 2024, Gao és tsai. 2023.

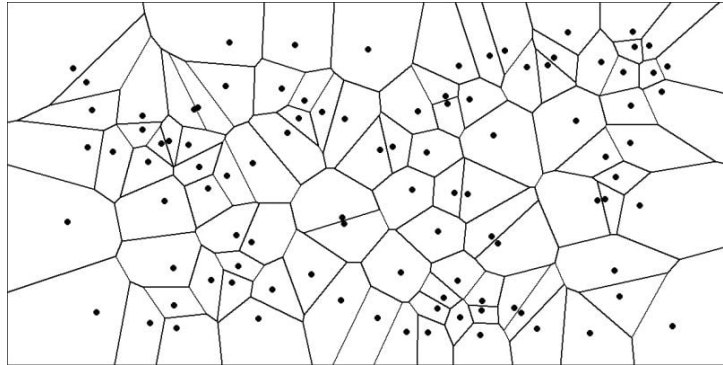
A társgalaxisok számának várható értéke egy adott M halo tömegnél az alábbi:

$$\langle N_s \rangle = \langle N_c \rangle \cdot \left(\frac{M}{M_{sat}} \right)^\alpha \cdot \exp \left(\frac{-M_{cut}}{M} \right) \quad (17)$$

amennyiben a halo tömege meghaladja a minimum tömeget, és a halóban van központi galaxis. Látható, hogy a Flagship modellel ellentétben itt nem-lineáris kapcsolat van a halo tömege és a társgalaxisok száma között. A társgalaxisok eloszlása Poisson-eloszlást követ, az eloszlások modellezéséhez pedig véletlenszám generátort használ az algoritmus.

3.4. Voidok beazonosítása: REVOLVER program

A REVOLVER egy Voronoi-tesszeláció alapú void- és halmazkereső program (Nadathur, Carter és tsai. 2019). A Voronoi tesszeláció mezőbecslési módszer (Voronoi Tessellation Field Estimator, VTFE) során minden Voronoi cellába egy galaxis kerül, és a cella határát úgy határozzuk meg, hogy minden pont, ami közelebb van a vizsgált galaxishoz, mint bármelyik másik galaxishoz, az a vizsgált galaxis cellájába tartozik. A cella térben egy polihedron alakot vesz fel, és a helyi számsűrűsége a körülötte lévő cellák térfogatának inverze, az átlagukkal normalizálva. (Kétdimenziós mintán a 8. ábrán látható poligon alakú cellákat kapunk.)



8. ábra. Voronoi-cellák illusztrációja két dimenzióban. Kép forrása: Francesco Bellelli

A voidok beazonosítása vízválasztó (watershed) algoritmus alapú: a becsült sűrűségmezőben megkeresi a helyi minimumokat, mint voidokat, és a körülöttük lévő "vízgyűjtő területhez" tartozó cellák alkotják a void térfogatát. A tesszeláció végrehajtása a ZOBOV (Zones BOrdering On Voidness, vagyis "az ürességet határoló zónák") algoritmuson alapul (Neyrinck 2008). Ez egy olyan algoritmus, amely a mintában előforduló sűrűség minimumokat vizsgálja, szabad paraméterek és a voidok formájára vonatkozó előfeltételezések nélkül.

A program bemenete egy égi koordinátákat és vöröseltolódásokat tartalmazó katalógus, illetve lehetséges súlyozási paramétert is megadni (például tömeg), azonban jelen esetben nem súlyoztuk a galaxisokat, csak pozíció alapján történt a tesszeláció. Nem teljes égboltot lefedő mintán az algoritmus egy általunk megadott nagyságú, nagysűrűségű puffert generál a minta szélei köré, hogy a szélekből adódó téves void-beazonosításokat elkerülje. Azonban a

nagy sűrűségből adódóan mégis több voidot talál a minta szélein, így a mintát $\Delta z = \pm 0,5 - 1,0$ vöröseltolódással nagyobbra vettem és úgy futtattam le.

A REVOLVER lefuttatása után az alábbi paramétereket kapjuk vissza: voidok középpontjának koordinátái, a voidok effektív sugara és szögátmérője, és a sűrűségprofiljuk. Egy void effektív sugara a voidot alkotó Voronoi-cellák térfogatának megfelelő gömb sugara:

$$R_{eff} = \left(\frac{3}{4\pi} \left(\sum V_{cella} \right) \right)^{\frac{1}{3}} \quad (18)$$

Habár a voidok nem teljesen gömb alakúak, és a Voronoi-tesszeláció során egy polihedron alakú voidot kapunk vissza, mégis nagyszámú void stackelése esetén a gömb alak jó közelítés.

Emellett egy λ_v paramétert is visszakapunk, amit Nadathur, Hotchkiss és Crittenden 2017 vezetett be. Ez egy dimenziótlan paraméter, amit empirikusan határoztak meg, és jellemzi a gravitációs potenciált az adott void környékén. A gravitációs potenciál nagyságát és előjelét is jellemzi, valamint a környezet sűrűség eloszlását és nagyskálás szerkezetét is. $\lambda_v < 0$ esetben az adott void nagy valószínűséggel egy nagyobb voidon belül vagy további voidok szomszédságában helyezkedik el, míg $\lambda_v > 0$ esetben nagy valószínűséggel egy kisebb halmaz környékén vagy egy galaxis felhőben helyezkedik el az adott void.

$$\lambda_v = \delta_g \left(\frac{R_{eff}}{1 \text{ Mpc}/h} \right)^{1,2} \quad (19)$$

A képletben δ_g az átlagos galaxissűrűség kontraszt:

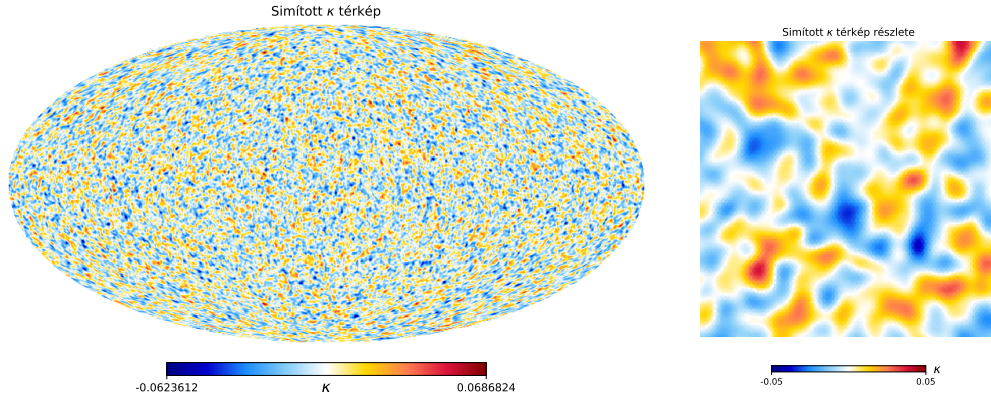
$$\delta_g = \frac{1}{V} \int_V \delta_{atl} d^3x \quad (20)$$

A ZOBOV algoritmust számos kozmológiai kutatásban használták már, például a Sloan Digital Sky Survey (SDSS) void-katalógusainak létrehozására (Mao és tsai. 2017). A különböző voidkereső algoritmusok összehasonlításakor Colberg és tsai. 2008 alapvetően azonos eredményeket kaptak N-test szimulációkból létrehozott sötét anyag eloszlásokon futtatott különböző algoritmusokkal.

3.5. Háttérsugárzás korrelációja: WebSky háttérsugárzás térképekkel

Mivel egyetlen egy void esetén nehéz észlelni a lencsézést, ezért a voidok vizsgálatának szokásos módja a stackelés. A különböző vöröseltolódáson és koordinátákon talált voidokat egymásra illesztettem a középpontjuk alapján, és a sugarukat ($R_{void} = R_{eff}$) 1-re normáltam, így a továbbiakban R/R_v dimenziótlan mértékegységként kezeltem. Ezzel a háromdimenziós void térképet kétdimenzióra levetítettem, és a stackelt képből egy négyzet alakú, 200×200 pixel nagyságú kivágást pixel alapú `healpix` formátumra átkonvertáltam.

Ezután betöltöttem WebSky szimuláció teljes égboltot lefedő kozmikus mikrohullámú su-



9. ábra. Lencsézetségi konvergencia térkép a WebSky szimulációból, 1-os gauss-os nyalábbal megcsimítva a jobb vizuális kontraszt érdekében.

gáráz lencsézési térképét is `healpix` formátumban. Ez egy kétdimenziósra projektált lencsézési térkép, amelyen a 9. ábrán látható módon az egyedi voidok lencsehatása nem detektálható. Azonban a megfelelő égbolterületek egymásra helyezéssel és a lencsézetségi értékek összeadásával (vagyis stackelésével) felerősödik a lencsehatás és detektálható válik a voidok statisztikai korrelációja a háttérsugárzás lencsézetségével.

A következő lépésben a lencsézési térképet oktánsokra vágtam, és eltávolítottam belőlük a nagyskalás módusokat ($\ell < 10$). A voidok középpontját és R_v sugarát felhasználva stackeltem a CMB térkép megfelelő részeit, és szintén négyzet alakú, 200×200 pixel nagyságú részt vágtam ki belőle.

A voidok R/R_v sugarát, illetve a háttérsugárzás lencsézetségi profilját és stackelt képeit egymáson ábrázolva kirajzolódott a háttérsugárzás lencsézetsége a voidok területén. A lokális minimumot a voidok közepén vártam, és $R/R_v \approx 1,0$ környékén vártam a konvergencia maximumát, majd a lecsengését nullára. Vizsgáltam a konvergenciát eltérő λ_v paraméterek mellett is. A void mintát 5 részre osztottam fel $\lambda_v = -5, 0, 5, 10$ értékek mentén, és összehasonlítottam a lencsézetségi profilt és a lencsézetség képeket.

4. Eredmények

4.1. Galaxis tulajdonságok

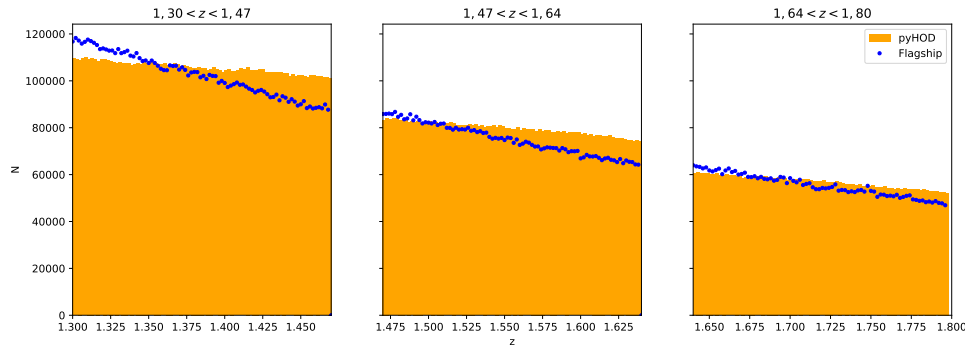
Először egy kis méretű mintán teszteltem a potenciális benépesítési paramétereket. A Flagship szimulált galaxis katalógus az égbolt egy oktánsát, vagyis $1/8$ -át modellezi. A teljes égbolt $360^2/\pi \text{deg}^2$ terület, tehát egy oktáns közel $5156,62 \text{deg}^2$ területet fed le. A WebSky szimuláció $10^\circ \times 10^\circ$ mintája egy négyzet alakú 100deg^2 égterület, amihez átskáláztam a Flagship mintát a megfelelő összehasonlításához.

A $z = 1,3 - 1,8$ vöröseltolódás tartományt 3 részre osztottam és a részeken egyenként teszteltem a paramétereket, amíg egy ideálisan illeszkedő számsűrűséget el nem értem, vöröseltolódásra és tömegre is nézve. A paraméterek az 1. táblázatban láthatóak.

Bin	z_{min}	z_{max}	$\log M_{min}$	τ	σ	$\log M_{cut}$	$\log M_{sat}$	α
1	1,30	1,47	12,30	0,22	0,3695	11,90	13,25	0,97
2	1,47	1,64	12,37	0,22	0,3600	12,26	13,20	0,97
3	1,64	1,80	12,44	0,22	0,3350	12,34	13,19	0,97

1. táblázat. Az illesztett benépesítési paraméterek

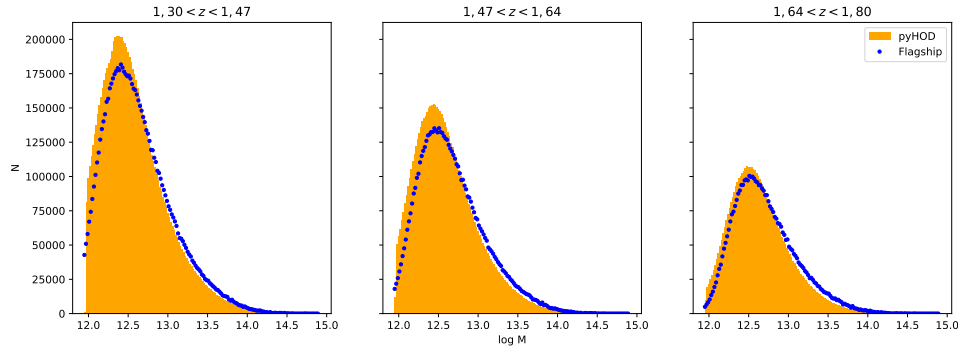
A vöröseltolódás binenként modellem illeszkedése a Flagship adatokhoz a 10. és a 11. ábrákon látható.



10. ábra. A Flagship referenciaminta és a pyHOD algoritmussal benépesített WebSky halók számeloszlásának összehasonlítása vöröseltolódás szerint

A megfelelő paraméterek megtalálása után a WebSky teljes égboltot lefedő sötét anyag halo katalógusán lefuttattam a pyHOD algoritmust, megadva a szükséges vöröseltolódás tartományokat és a hozzájuk tartozó illesztett paramétereket. A vöröseltolódást $1,25 < z < 1,90$ tartományra terjesztettem ki, a void keresést megkönnyítendő (lásd a 4.2. alfejezetben).

Az elkészült galaxis katalógushoz hozzáadtam egy Gauss-eloszlású zajt a vöröseltolódás adatokhoz, ezzel modellezve a vöröseltolódás mérési bizonytalanságát. A zajt a random Python könyvtár normál eloszlást generáló funkciójával tettem, a zaj szórása $\sigma_z = 0,001 \cdot (1 + z)$ volt. A teljes égboltból végül oktánsokat vágtam ki a void kereséshez.



11. ábra. A Flagship referenciaminta és a pyHOD algoritmussal benépesített WebSky halók számeloszlásának összehasonlítása halo tömeg szerint

A generált minta némileg magasabb számú galaxist tartalmazott, mint a referencia 60%-os Flagship minta. Emellett a tömegeloszlás is némileg magasabb volt kis halo tömegekre, és kevesebb a nagy halo tömegekre. Tehát a 60%-os referenciához képest több galaxist tartalmaz, ahol a többlet többsége kistömegű galaxis, melyek hatása jórészt elhanyagolható a voidok és kozmikus háttérsugárzás korrelációi terén.

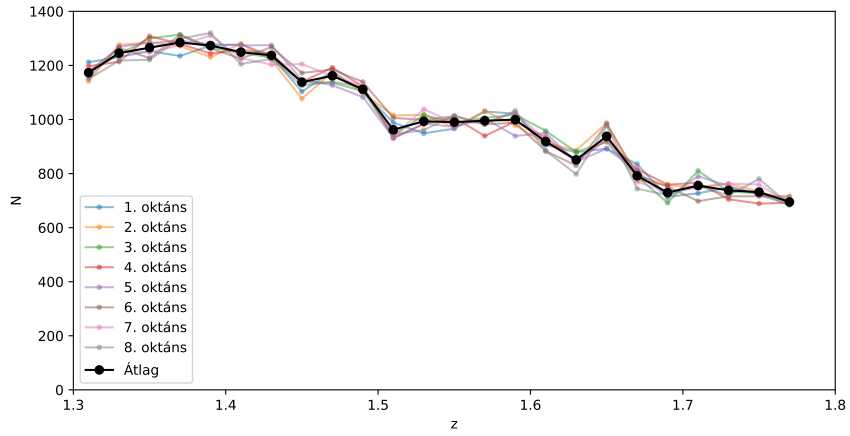
Oktáns	N_{total}
1	24846
2	25019
3	24951
4	24835
5	24850
6	24964
7	24975
8	24641
Teljes égbolt	199081

2. táblázat. Void keresés eredménye oktánsenként

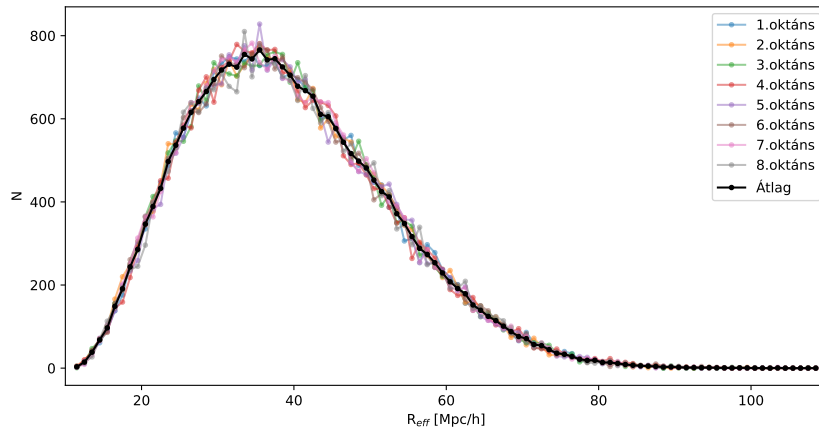
4.2. Void tulajdonságok

A void keresés lefuttatásakor bővebb vöröseltolódás tartományt adtam meg, mint amiben a voidokat kerestem, hogy elkerüljem a szélekre helyezett puffer galaxisok okozta hatásokat. Így $1,25 < z < 1,90$ tartományra futtattam le a keresést, majd az elkészült void katalógust leszűrtem a $1,30 < z < 1,80$ tartományra. Eltávolítottam továbbá a REVOLVER által a minta széléhez közeliként megjelölt voidokat is. Átlagosan 24885 ± 113 darab voidot találtam oktánsenként, a medián void sugár 38,04 Mpc/h volt, és az átlagos void sugár 39,46 Mpc/h volt.

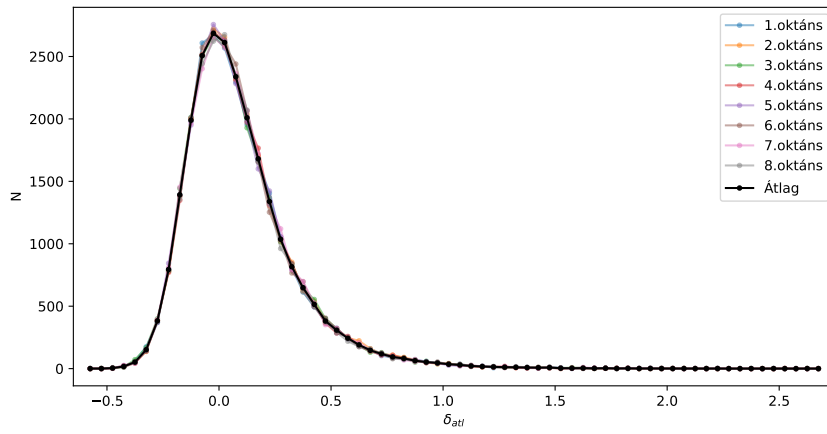
Ahogy a 12., 13., 14., és 15. ábrákon is látszik, átlagosan hasonló void eloszlást mutattak az oktánsok vöröseltolódás, effektív sugár, átlagos sűrűség, és λ_v paraméter szerint, ezért kijelenthetjük, hogy ebben a modellben nagyléptékben homogén és izotróp az univerzum.



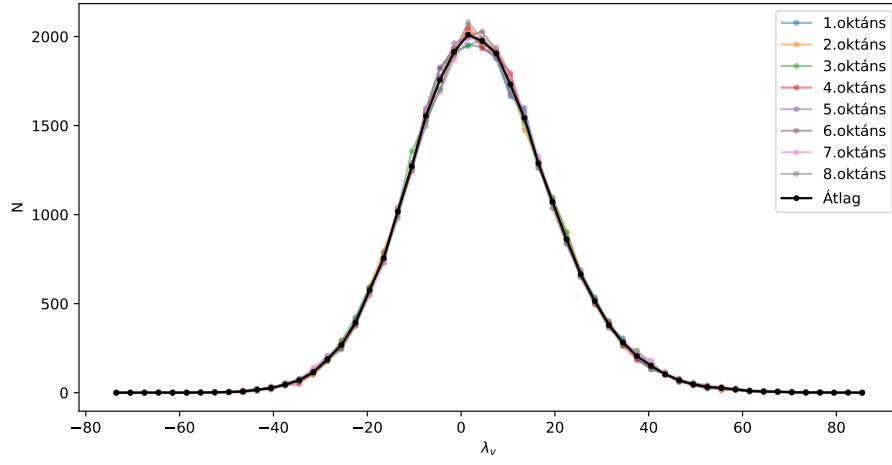
12. ábra. Voidok eloszlása vöröseltolódás szerint



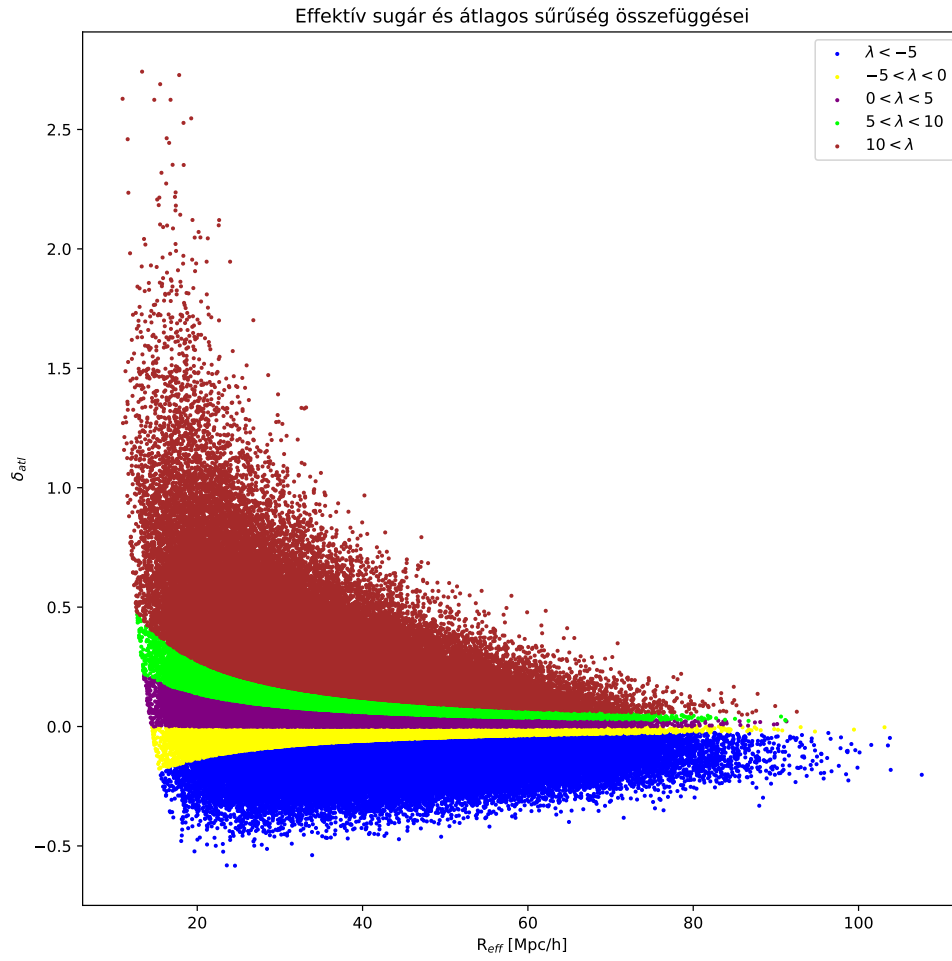
13. ábra. Voidok eloszlása effektív sugaruk szerint



14. ábra. Voidok eloszlása átlagos sűrűség szerint



15. ábra. Voidok eloszlása a λ_v paraméter szerint



16. ábra. Voidok eloszlása az effektív sugár és az átlagos sűrűség szerint, 5 db λ_v tartományban

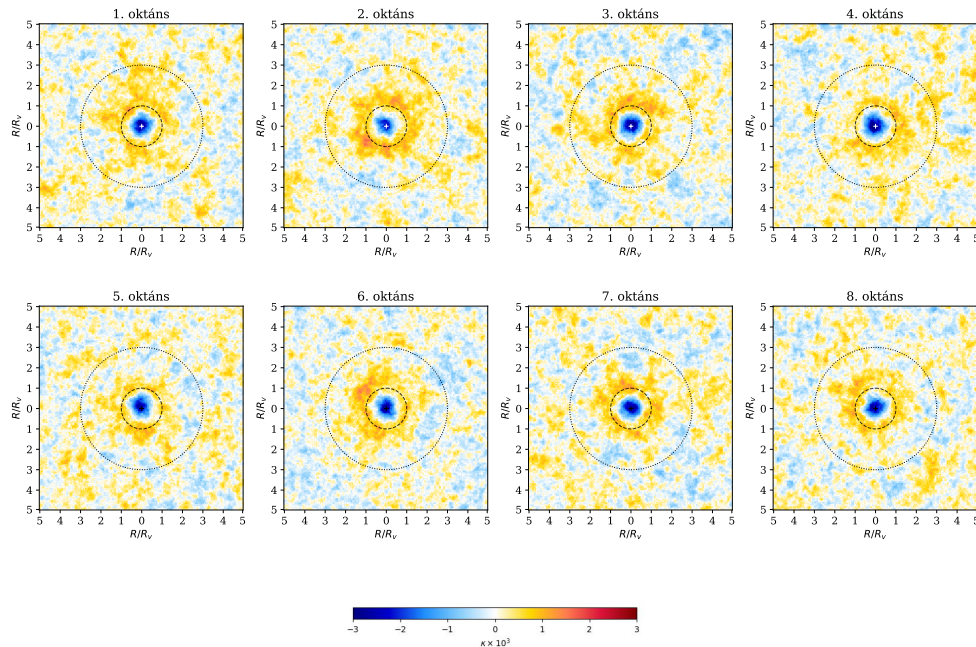
A továbbiakban a teljes mintán, tehát mind a nyolc oktánst figyelembe véve hasonlítottam össze a voidok tulajdonságait, a λ_v paraméterek függvényében. Ez a paraméter a void effektív sugara és a környezet sűrűségének összefüggését írja le, és ebből kifolyólag jellemzi nem csak magát a voidot, hanem a környezetét is. Öt λ_v tartományra osztva a 16. ábrán látható eloszlást kaptam. A középső három λ_v tartomány hasonló tulajdonságokat mutatott.

A $\lambda_v < -5$ tartományban alacsony átlagsűrűségű környezetben nagyobb effektív sugárral rendelkeztek a voidok, ezeket "void-in-void", vagyis "voidon belüli void"-ként lehetett beazonosítani. Vagyis ezek egy, a voidnál nagyobb kiterjedésű, alacsony átlagsűrűségű régió belül egy még alacsonyabb sűrűségű területek voltak.

A $\lambda_v > 10$ tartományban nagyobb átlagsűrűségű környezetben, kisebb effektív sugarú voidok voltak találhatóak. Ezeket "void-in-cloud", vagyis "felhőn belüli void"-ként azonosítottam, ahol a void egy kisebb sűrűségcsökkenés volt egy nagy sűrűségű csillagközi felhővel kitöltött régióban.

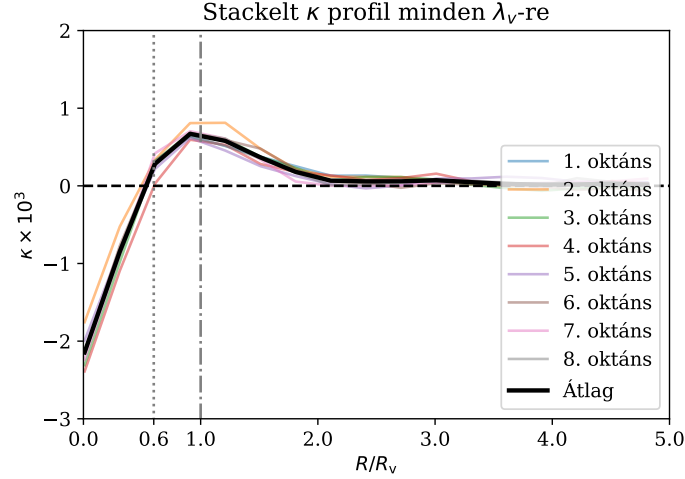
4.3. Háttérsugárzás korrelációi

A következőkben a voidok és a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás lencsézetségének korrelációját vizsgáltam. A teljes mintát oktánsokként vizsgáltam, amelyek konvergenciája átlagosan megegyezett (17. ábra).



17. ábra. Kozmikus háttérsugárzás lencsézetségi konvergencia képe oktánsokként

Korábbi eredményekkel egyezően a lencsézetség helyi minimumát a voidok közepén találtam, itt a lencsézetség negatív értékeket mutatott. Majd gyorsan emelkedve, $R/R_v = 0,5 - 0,6$ környékén elérte a nullát, tehát itt megszűnt a lencsézetség konvergenciája. Ezután $R/R_v =$

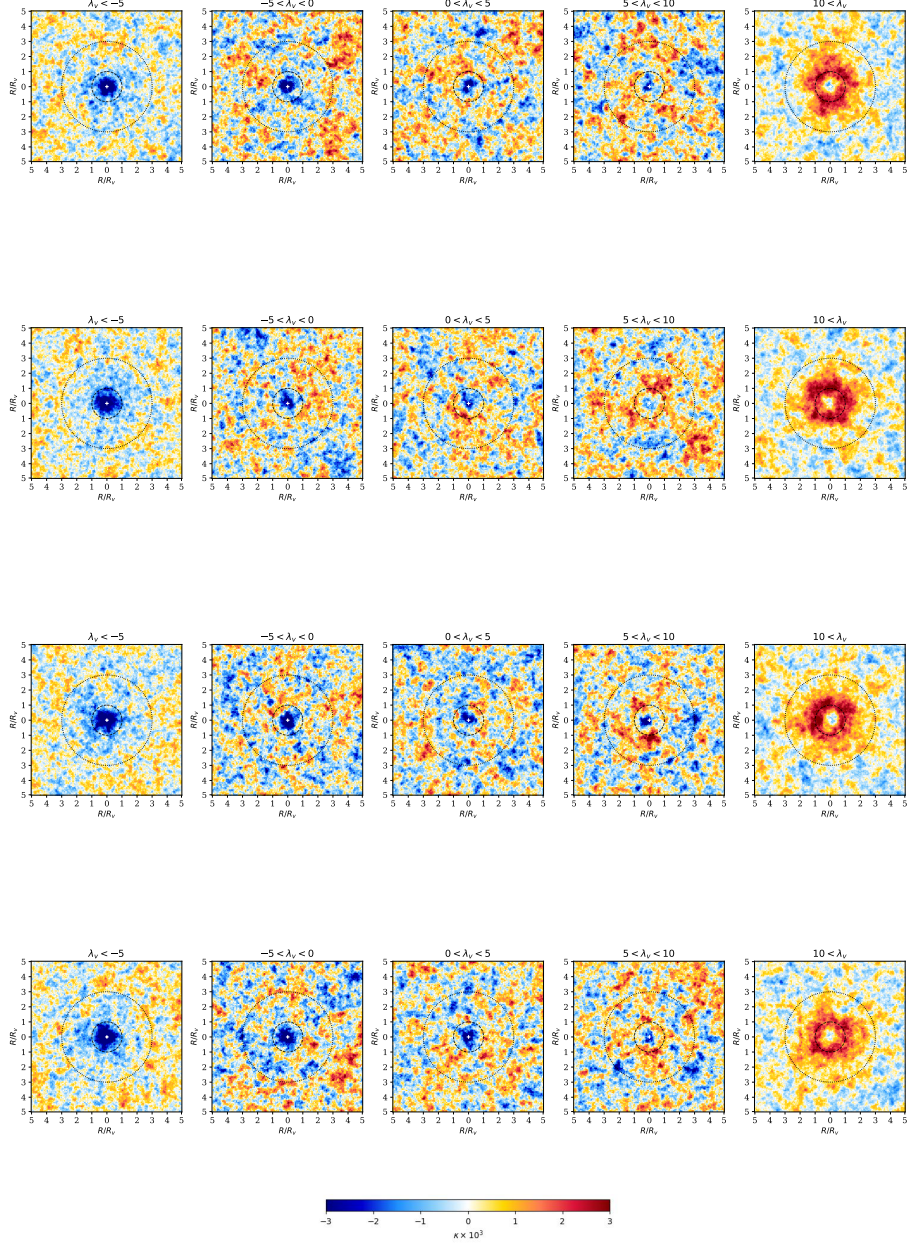


18. ábra. Kozmikus háttérsugárzás lencsézettségi konvergencia profilja oktánsenként

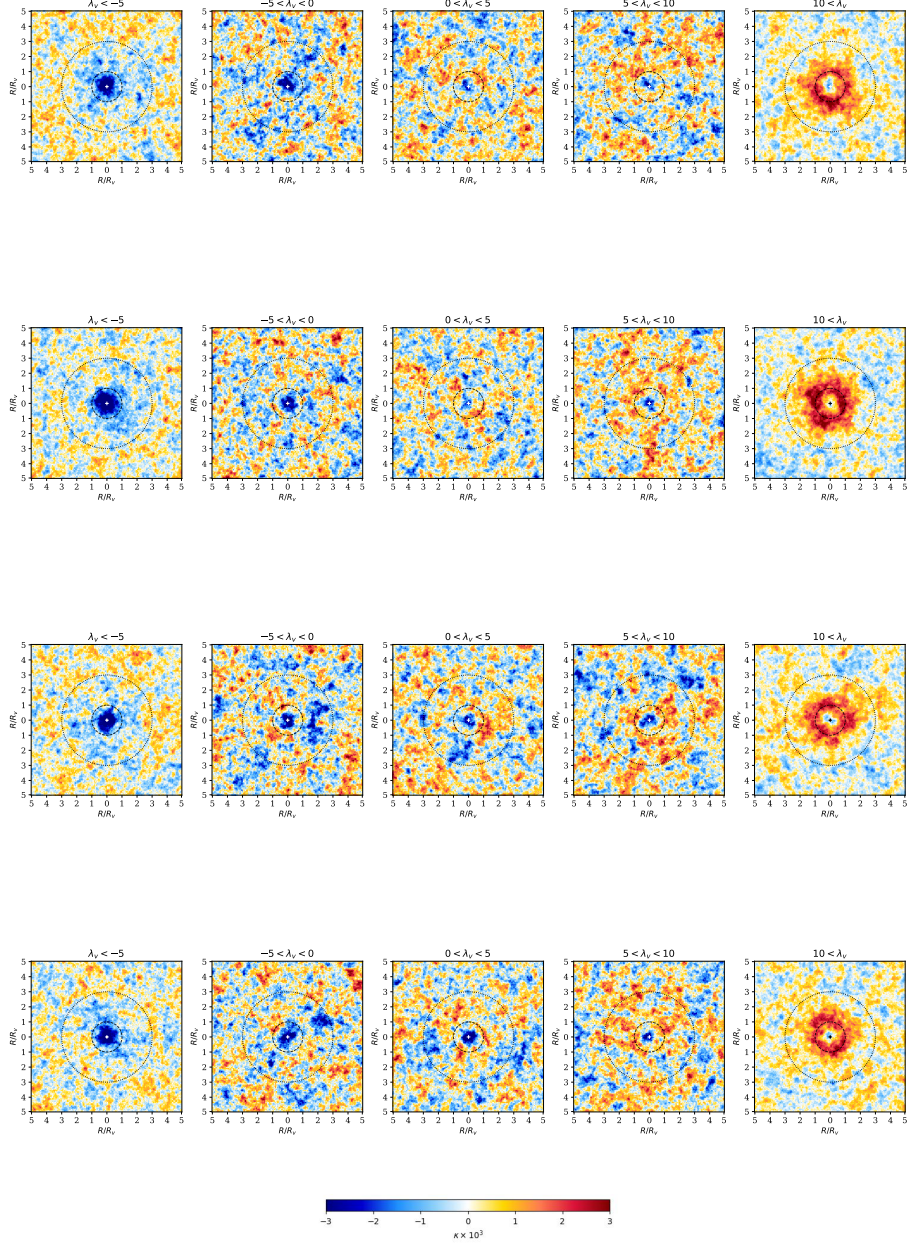
0,9 – 1,0 környékén érte el a maximumát, tehát itt volt a legnagyobb a lencsézettségi konvergencia. Végül $R/R_v = 2,0 - 3,0$ között visszaállt a konvergencia nullára, azaz távol a voidoktól megszűntek a nagyskálás szerkezet lencséző hatásai (18. ábra).

Az előző résszel megegyezően, a λ_v paraméter segítségével 5 részre osztottam az oktánsokat, és az eltérő λ_v paraméterek és a háttérsugárzás lencsézettségének korrelációját vizsgáltam, a 3.5. alfejezetben leírtak szerint. A háttérsugárzás stackelt képei a 19. és a 20. ábrákon láthatóak, a profilok görbéi pedig a 21. ábrán láthatóak.

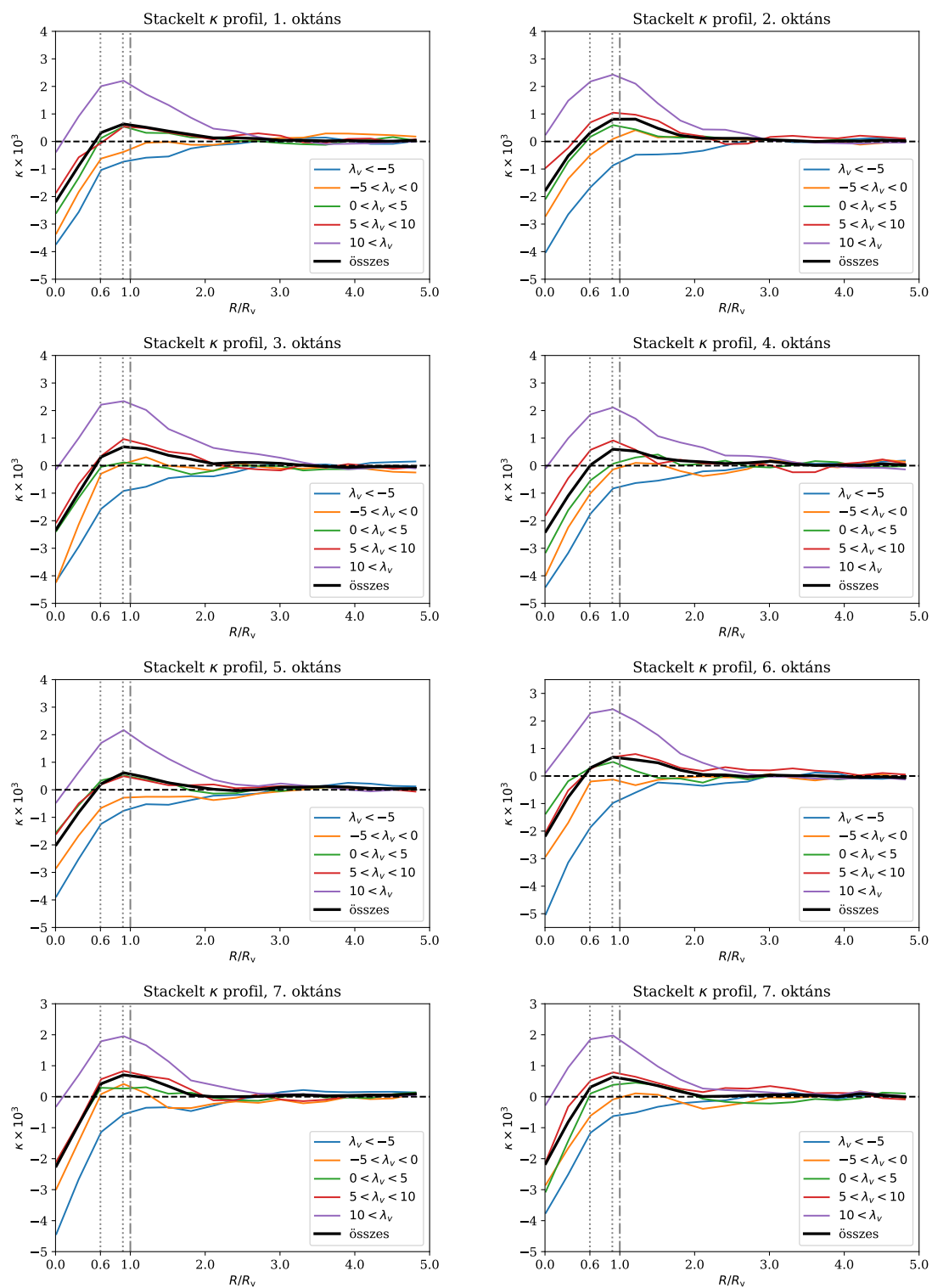
A vártakkal megegyezően, a $\lambda_v < -5$ voidok esetén mind a profil, mint a kép esetén láthatóvá vált a $\approx 3R/R_v$ nagyságú, alacsony sűrűségű közeg, amelyben ez a void található. Ugyanúgy a $\lambda_v > 10$ voidoknál is láthatóvá vált a $\approx 3R/R_v$ nagyságú, nagy sűrűségű felhő, amelyben ez a void elhelyezkedett. A két véglet között elhelyezkedő $-5 < \lambda_v < 10$ tartományban nem azonosítható be a void területe egyértelműen, és/vagy a void környéke nem mutat egyértelmű elhatárolást, $\approx 3R/R_v$ nagyságú, homogén sűrűségű területet. Tehát a stackelés eredménye itt jóval zajosabb.



19. ábra. Fentről lefelé: 1-4. oktánsok konvergencia térképei eltérő λ_v értékekre



20. ábra. Fentről lefelé: 5-8. oktánsok konvergencia térképei eltérő λ_v értékekre



21. ábra. Oktánsok konvergencia profiljai eltérő λ_v értékekre

5. Diszkusszió

A Euclid űrteleszkóp spektroszkópiai galaxis észleléseit modellezve a WebSky sötét anyag halo katalógusból a `pyHOD` halo benépesítési algoritmussal galaxis katalógus készítettem. Az ideális paraméterek megválasztása a halók benépesítéséhez empirikus alapon történt. Ennél pontosabb egyezés is lehetséges, például Markov-lánc alapú Monte Carlo módszerrel, vagy a paraméterek vöröselölódás-függésének megadásával. Jelen kutatásban egy egyszerűsített modellel dolgoztam, illetve a WebSky szimuláció alacsonyabb felbontása miatt, a kozmikus szerkezetek és a háttérsugárzás vizsgálatához az empirikus értékekkel is megfelelő mértékű egyezést értem el.

A égboltfelmérések, csillagászati észlelések modellezésénél számos észlelési effektust is figyelembe kell venni, például: a felvett adatok minősége, az objektumok kiválasztási módszere, vagy a feldolgozáshoz használt maszkok hatása a kinyert információkra. A referencia minta létrehozásakor a halvány objektumok nehezebb észlelését és nagyobb adatbizonytalanságot modelleztem egy fluxus limit meghatározásával. Továbbá a spektroszkópiai vöröselölódás szórását Gauss-eloszlással modelleztem és hozzáadtam a WebSky szimulációból benépesített galaxis katalógushoz. A jövőben további észlelési effektusokat is érdemes vizsgálni, különösen a maszkok hatását, mivel a Euclid észlelések (ahogy más égboltfelmérések is) az égbolt bizonyos részeit fedik csak le.

A voidokat Voronoi-tesszeláció alapú programmal azonosítottam be, amelyből minden oktánsra közel azonos eloszlású voidokat találtam, mind vöröselölódás, mind sugár, mind sűrűség alapján összehasonlítva. Ez megerősíti, hogy a tesszeláción alapuló módszer megfelelő a nagyskálás szerkezetek beazonosítására. Jelen kutatásban 3D voidkeresést alkalmaztam, amelyben sok zaj előfordulhat a vöröselölódásból adódó bizonytalanságok miatt. Továbbá a galaxisok tulajdonságai közül csak a pozíciójukat és a vöröselölódásukat vettem figyelembe. A galaxisokat például tömeg szerint súlyozva eltérő voidokat kaphatunk, eltérő eloszlásokkal.

A háttérsugárzás lencsézetttségének mértéke egyértelműen korrelál a voidok pozíciójával és kiterjedésével, korábbi kutatásokkal megegyezően. Megfigyelhető volt a void effektív sugarának és a környezet sűrűségének az összefüggése is: a λ_v paraméter mentén beazonosíthatóak voltak a nagyobb voidon belül elhelyezkedő voidok, illetve a sűrűbb felhőn belül elhelyezkedő voidok is. További vizsgálat tárgya lehet a WebSky szimulációban elérhető további háttérsugárzási effektusok és a voidok korrelációnak vizsgálata.

A Euclid észlelések modellezésének legfontosabb eredménye, hogy az SDSS vagy DES felmérésekhez hasonlóan a Euclid észleléseiből is detektálható lesz a nagyskálás szerkezet és a kozmikus háttérsugárzás korrelációja. Ezen keresztül pedig tovább pontosíthatjuk a kozmológiai modellt és a kozmológiai paraméterek értékét, és jobban megérthetjük majd a látható és sötét anyag eloszlásának részleteit az univerzum legkritikább régióiban, a kozmikus voidokban is.

Függelék: Saját eredmények

A kutatás során a saját eredményeim és a saját elvégzett munkám az alábbiak voltak.

Tudományos kérdésfelvetés: A témát a témavezetőm javaslatára választottam, aki a témában hasonló kutatást már végzett, így felismerte a lehetőséget.

Elméleti háttér: Javaslatokat kaptam a témavezetőmtől a felhasználni érdemes szakirodalom kapcsán. A szakirodalom feldolgozását egyedül végeztem. Emellett feldolgoztam a témavezetőm korábbi kutatásait: Kovács, Sánchez és tsai. 2019, Kovács, Jeffrey és tsai. 2021, Kovács, Vielzeuf és tsai. 2022; illetve a kutatócsoportban dolgozó kollégák kutatásait is: Camacho-Ciurana és tsai. 2024.

Módszerek, szimulációk és modellezés: A megfelelő programok, algoritmusok kiválasztásában és használatában kaptam segítséget a kutatócsoporttól.

Saját munkám volt:

- Referencia minta kiválasztása, előkészítése összehasonlításra (szűrés, vágás)
- Sötét anyag halo benépesítési modellek tesztelése és a legjobban illeszkedő modell kiválasztása
- Halo benépesítés során a referenciához illeszkedő paraméterek tesztelése és kiválasztása
- Halo benépesítés futtatása, elkészült galaxis katalógus ellenőrzése
- Galaxis katalógus előkészítése a nagyskálás szerkezetek beazonosításához
- Void kereső algoritmus futtatása, elkészült void katalógus ellenőrzése
- Korrelációk futtatása, eredmények ellenőrzése

Ábrák, táblázatok: minden forrás nélküli ábra, táblázat saját munkám.

Dolgozat: a teljes mű, beleértve a dolgozat megírását és megszerkesztését, saját munkám.

Hivatkozások

- Alonso, D. és tsai. (2018). „Measurement of the thermal Sunyaev-Zel’dovich effect around cosmic voids”. *Physical Review D* 97.6, 63514. old. DOI: 10.1103/PhysRevD.97.063514.
- Bartelmann, M. és P. Schneider (2001). „Weak gravitational lensing”. *Physics Reports* 340.4–5, 291–472. old. DOI: 10.1016/S0370-1573(00)00082-X.
- Bond, J. R., L. Kofman és D. Pogosyan (1996). „How filaments of galaxies are woven into the cosmic web”. *Nature* 380.6575, 603–606. old. DOI: 10.1038/380603a0.
- Bonici, M. és tsai. (2023). „Euclid : Forecasts from the void-lensing cross-correlation”. *Astronomy & Astrophysics* 670, A47. DOI: 10.1051/0004-6361/202244445.
- Cai, Y.-C. és tsai. (2017). „The lensing and temperature imprints of voids on the cosmic microwave background”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 466.3, 3364–3375. old. DOI: 10.1093/mnras/stw3299.
- Camacho-Ciurana, G. és tsai. (2024). „The cosmic microwave background lensing imprint of cosmic voids detected in the WISE-Pan-STARRS luminous red galaxy catalog”. *Astronomy & Astrophysics* 689, A171. DOI: 10.1051/0004-6361/202348970.
- Carretero, J. és tsai. (2015). „An algorithm to build mock galaxy catalogues using MICE simulations”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 447.1, 646–670. old. DOI: 10.1093/mnras/stu2402.
- Colberg, J. M. és tsai. (2008). „The Aspen–Amsterdam void finder comparison project”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 387.2, 933–944. old. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.13307.x.
- Contarini, S. és tsai. (2022). „Euclid : Cosmological forecasts from the void size function”. *Astronomy & Astrophysics* 667, A162. DOI: 10.1051/0004-6361/202244095.
- Cserepes, L. és K. Petrovay (2002). „Kozmikus fizika”. egyetemi jegyzet.
- Euclid Collaboration, F. J. Castander és tsai. (2024). *Euclid. V. The Flagship galaxy mock catalogue: a comprehensive simulation for the Euclid mission*. URL: <http://arxiv.org/abs/2405.13495> (elérés dátuma 2024. 12. 14.). Beküldött.
- Euclid Collaboration, S. Ilić és tsai. (2022). „Euclid preparation: XV. Forecasting cosmological constraints for the Euclid and CMB joint analysis”. *Astronomy & Astrophysics* 657, A91. DOI: 10.1051/0004-6361/202141556.
- Euclid Collaboration, Y. Mellier és tsai. (2024). *Euclid. I. Overview of the Euclid mission*. DOI: 10.1051/0004-6361/202450810. Elfogadott.
- Gao, H. és tsai. (2023). „The DESI One-Percent Survey: Constructing Galaxy–Halo Connections for ELGs and LRGs Using Auto and Cross Correlations”. *The Astrophysical Journal* 954.2, 207. old. DOI: 10.3847/1538-4357/ace90a.

- Hamaus, N. és tsai. (2022). „*Euclid* : Forecasts from redshift-space distortions and the Alcock–Paczynski test with cosmic voids”. *Astronomy & Astrophysics* 658, A20. DOI: 10.1051/0004-6361/202142073.
- Kovács, A., N. Jeffrey és tsai. (2021). „The DES view of the Eridanus supervoid and the CMB cold spot”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 510.1, 216–229. old. DOI: 10.1093/mnras/stab3309.
- Kovács, A., C. Sánchez és tsai. (2019). „More out of less: an excess integrated Sachs–Wolfe signal from supervoids mapped out by the Dark Energy Survey”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 484.4, 5267–5277. old. DOI: 10.1093/mnras/stz341.
- Kovács, A., P. Vielzeuf és tsai. (2022). „Dark Energy Survey Year 3 results: Imprints of cosmic voids and superclusters in the *Planck* CMB lensing map”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 515.3, 4417–4429. old. DOI: 10.1093/mnras/stac2011.
- Laureijs, R. és tsai. (2011). *Euclid Definition Study Report (Red Book)*. Küldetésmeghatározó tanulmány ("A" fázis) ESA/SRE(2011)12. ESA Science & Technology. URL: <https://sci.esa.int/s/wKd0PPW> (elérés dátuma 2024. 12. 14.).
- Li, G. és tsai. (2023). „Cross-correlation of cosmic voids with thermal Sunyaev–Zel’dovich data”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 527.2, 2663–2671. old. DOI: 10.1093/mnras/stad3396.
- Mao, Q. és tsai. (2017). „A Cosmic Void Catalog of SDSS DR12 BOSS Galaxies”. *The Astrophysical Journal* 835.2, 161. old. DOI: 10.3847/1538-4357/835/2/161.
- Martinez, V. J. és tsai., szerk. (2009). *Data Analysis in Cosmology*. 665. köt. Lecture Notes in Physics. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-44767-2.
- Menegethi, M. (2006). „Introduction to gravitational lensing”. egyetemi jegyzet. URL: https://www.ita.uni-heidelberg.de/~jmerten/misc/meneghetti_lensing.pdf (elérés dátuma 2025. 01. 04.).
- Nadathur, S., P. M. Carter és tsai. (2019). „Beyond BAO: Improving cosmological constraints from BOSS data with measurement of the void-galaxy cross-correlation”. *Physical Review D* 100.2, 23504. old. DOI: 10.1103/PhysRevD.100.023504.
- Nadathur, S., S. Hotchkiss és R. Crittenden (2017). „Tracing the gravitational potential using cosmic voids”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 467.4, 4067–4079. old. DOI: 10.1093/mnras/stx336.
- Navarro, J. F., C. S. Frenk és S. D. M. White (1996). „The Structure of Cold Dark Matter Halos”. *The Astrophysical Journal* 462, 563. old. DOI: 10.1086/177173.
- Neyrinck, M. C. (2008). „ZOBOV: a parameter-free void-finding algorithm”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 386.4, 2101–2109. old. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.13180.x.
- Peacock, J. A. (2010). *Cosmological Physics*. Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-42270-3.

- Pisani, A. és tsai. (2015). „Counting voids to probe dark energy”. *Physical Review D* 92.8, 83531. old. DOI: 10.1103/PhysRevD.92.083531.
- Planck Collaboration, N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, M. Ballardini, A. J. Banday, R. B. Barreiro, N. Bartolo, S. Basak, R. Battye és tsai. (2020). „Planck 2018 results: VI. Cosmological parameters”. *Astronomy & Astrophysics* 641, A6. DOI: 10.1051/0004-6361/201833910.
- Planck Collaboration, N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, M. Ballardini, A. J. Banday, R. B. Barreiro, N. Bartolo, S. Basak, K. Benabed és tsai. (2020). „Planck 2018 results: V. CMB power spectra and likelihoods”. *Astronomy & Astrophysics* 641, A5. DOI: 10.1051/0004-6361/201936386.
- Port d’Informació Científica (PIC) (2024). *CosmoHub*. URL: <https://cosmohub.pic.es/> (elérés dátuma 2024. 12. 14.).
- Pritchard, J. (2009). „Gravitational lensing”. egyetemi jegyzet. URL: <https://pritchardjr.github.io/teaching/GravitationalLensing.pdf> (elérés dátuma 2025. 01. 02.).
- Radinović, S. és tsai. (2023). „Euclid : Cosmology forecasts from the void-galaxy cross-correlation function with reconstruction”. *Astronomy & Astrophysics* 677, A78. DOI: 10.1051/0004-6361/202346121.
- Raghunathan, S. és tsai. (2020). „The Gravitational Lensing Signatures of BOSS Voids in the Cosmic Microwave Background”. *The Astrophysical Journal* 890.2, 168. old. DOI: 10.3847/1538-4357/ab6f05.
- Stein, G., M. A. Alvarez és J. R. Bond (2019). „The mass-Peak Patch algorithm for fast generation of deep all-sky dark matter halo catalogues and its N -body validation”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 483.2, 2236–2250. old. DOI: 10.1093/mnras/sty3226.
- Stein, G., M. A. Alvarez, J. R. Bond és tsai. (2020). „The Websky extragalactic CMB simulations”. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2020.10, 12–012. old. DOI: 10.1088/1475-7516/2020/10/012.
- Van De Weygaert, R. és E. Platen (2011). „Cosmic Voids: Structure, Dynamics and Galaxies”. *International Journal of Modern Physics: Conference Series* 01, 41–66. old. DOI: 10.1142/S2010194511000092. (Elérés dátuma 2024. 12. 06.).
- Vielzeuf, P. és tsai. (2020). „Dark Energy Survey Year 1 results: the lensing imprint of cosmic voids on the cosmic microwave background”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 500.1, 464–480. old. DOI: 10.1093/mnras/staa3231.
- WebSky Extragalactic CMB Mocks - LSS Mocks (2024). URL: https://mocks.cita.utoronto.ca/index.php/WebSky_Extragalactic_CMB_Mocks (elérés dátuma 2024. 12. 05.).
- Zhang, Yucheng (2024-02-19). *pyHOD*. original-date: 2019-05-24T00:08:24Z. URL: <https://github.com/Yucheng-Zhang/pyhod> (elérés dátuma 2024. 12. 04.).