

Ütköző galaxisok vizsgálata az Illustris szimulációban

Koncz Bendegúz

ELTE TTK Csillagász MSc I. évfolyam

Témavezetők:

Joó András Péter és Dr. Tóth L. Viktor

ELTE Csillagász Kari TDK



ELTE
EÖTVÖS LORÁND
TUDOMÁNYEGYETEM

Budapest, 2022.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Elméleti háttér	4
2.1. Az Univerzum fejlődése	4
2.2. Univerzum-modellek	5
2.3. Gammakitörések	6
2.4. LGRB anyagaxisok	7
2.5. Egyesülő galaxisok	8
3. Az Illustris szimuláció	9
3.1. Illustris TNG	10
3.2. TNG100-1	11
3.3. Merger Tree (ütközéstörténeti fa)	12
4. Adatfeldolgozás	13
4.1. Alkalmazott változók és jelentésük	13
4.2. Vizsgált paraméterek és jelentésük	13
4.3. Adatstruktúra feldolgozása, adatok elemzése	14
5. Eredmények	16
5.1. Csillagkeletkezési ráta	18
5.2. Átlagos fémtartalom és tömeg	20
6. Diskusszió	23
6.1. Kapott eredmények	23
6.2. Elemzés módosítása	24
6.3. További vizsgálatok	25
Irodalom	27

Összefoglalás

Dolgozatomban az IllustrisTNG kozmológiai szimuláció adatainak feldolgozásával vizsgáltam meg a galaxisok fémtartalmának fejlődését, valamint az egyesülő galaxisok fémességének, csillagkeletkezési rátájának és tömegének változását a vöröseltolódás függvényében.

Munkám célja, hogy az Illustris TNG100-1 Merger Tree adatfájlok segítségével megvizsgáljam az ütköző galaxisok paramétereit, és összehasonlítsam az LGRB anyaggalaxisok jellemzőivel. A hosszú gammakitörések (LGRB) alacsony fémtartalmú, nagy tömegű csillagok végstádiumában keletkező robbanások következményei. Ezek a kitörések $t > 2$ másodpercig tartanak, valamint legtöbbször kis tömegű és fémtartalmú galaxisokban mennek végbe [81], [36], [48]. Azokat a galaxisokat, amelyek LGRB-t produkálhatnak, LGRB anyaggalaxisnak (angolul: LGRB host galaxy) nevezzük. Az LGRB-k vizsgálatával információt szerezhetünk az anyaggalaxisban uralkodó körülményekről, így a galaxisok fejlődéséről. Az LGRB-ket kozmikus időskálán vizsgálva a csillagképződés folyamatának esetleges időbeli változásait mutathatjuk ki. Az IllustrisTNG kibővített fizikai modelleinek és megnövekedett kapacitásának köszönhetően a korábbiakhoz képest pontosabb képet kaphatunk például a csillagkeletkezésről.

Az adatfeldolgozáshoz az IllustrisTNG weboldalán található útmutató segítségével Python szkripteket készítettem. Ezek használatával a galaxisok paramétereire feltételeket lehet megadni, kiválogatva azokat a jellemzőket, amelyek szerepet játszanak az LGRB-k kialakulásában (például alacsony fémtartalom). Kiszámítottam a galaxisok fémtartalmának súlyozott átlagát $z = 2$ -nél, az így kapott $Z < 0.92 Z_{\odot}$ értéket [79] alapján az alacsony fémtartalom felső korlátjának választottam. Ezt követően kiválogattam azokat a galaxisokat, amelyek ütközésben vettek részt, és alacsony fémtartalommal rendelkeznek. Az ütközéstörténeti fát (angolul: Merger Tree) felhasználva megkerestem az ezen galaxisokhoz tartozó ütköző párokat, valamint az ezekből keletkező leszármazott galaxisokat. Az így megkapott galaxisok paramétereit (csillagkeletkezési ráta, átlagos fémtartalom és tömeg) vizsgáltam a vöröseltolódás függvényében. Az eredményeken látható, hogy az utód galaxisokban jelentős csillagkeletkezés indul meg, megemelve a galaxisok fémtartalmát. A csillagkeletkezési ráta $z = 3$ -nál maximumot mutat, amely egybeesik a Ghirlanda és mtsai. [16] által talált GRB keletkezési ráta maximummal, ebből arra következtethetünk, hogy az ütköző galaxisok mintája jó minta lehet lehetséges LGRB anyaggalaxisokra. A tömegeket vizsgálva arra következtethetünk, hogy rengeteg törpegalaxis-ütközés történik az utód galaxisok fejlődése során.

1. fejezet

Bevezetés

Az Univerzum fejlődéstörténetéről alkotott képünk az utóbbi évtizedekben nagy fejlődésen ment keresztül, a legmodernebb földi- és űreszközök segítségével képesek vagyunk a kozmikus távolságokban levő eseményeket és objektumokat is megfigyelni. Emellett a számítógépek fejlődésével a numerikus szimulációk kapacitása és teljesítménye is megnőtt, ezek segítségével pontosabb képet alkothatunk a Világegyetem fejlődéséről. A jelenlegi elméletekkel kapcsolatban azonban még sok a megválaszolatlan kérdés: Az Univerzum fejlődése során milyen gyakori jelenség a galaxisok ütközése? Milyen csillagkeletkezési rátát mutatnak a kölcsönható galaxisok a vöröseltolódás függvényében? Van-e kapcsolat a kölcsönható galaxisok fejlődése és a hosszú gammakitöréseket produkáló galaxisok között? Dolgozatomban elsősorban ezekre a kérdésekre igyekszem válaszokat adni. A gammakitörések során rövid időn belül nagy energia szabadul fel, emiatt rövid ideig a legfényesebb objektumok közé tartoznak és nagy távolságuk ellenére is sok információt szerezhetünk róluk. Vizsgálatukkal többek között megismerhetjük az anyaggalaxisban uralkodó körülményeket, és általános képet alkothatunk az Univerzum fejlődéséről.

Dolgozatom egy elméleti bevezetővel kezdődik, amely során röviden ismertetem az Univerzum fejlődését, az erről alkotott modelleket. Bemutatom a gammakitörések hátterét és a hosszú gammakitöréseket produkáló galaxisok tulajdonságait. Ezt követően ismertetem az egyesülő galaxisok jellemzőit, majd az Illustris és az IllustrisTNG modellt, ezen belül pedig a TNG100-1 modellt és a Merger Tree adatstruktúrát mutatom be. A 4. fejezetben az adatok feldolgozásának módját vázolom, majd az 5. fejezetben ismertetem az általam kapott eredményeket. Végül a diszkusszióban összefoglalom munkám eredményét és további célkitűzéseimet.

2. fejezet

Elméleti háttér

2.1. Az Univerzum fejlődése

Az Univerzum keletkezésének modellje alapján Univerzumunk egy szingularitásból indult ki. Ekkor világunk energiasűrűsége a végtelenhez tartott, amely jelenséget ősrobbanásnak (Big Bang) nevezik. Az ősrobbanással megkezdődött a világegyetem tágulása, amely jelen pillanatban is tart. Az alábbiakban Cserepes László és Petrovay Kristóf Kozmikus Fizika című egyetemi jegyzete [9] alapján foglalom össze az Univerzum történetét.

Kezdetben az Univerzumot egy majdnem egyenletesen kitöltő gázfelhő alkotta, ez a sűrű közeg ionizált és átlátszatlan volt. Az anyag rekombinációja után ($z = 1000$ körül) az opacitás lecsökkent, és a világegyetem átlátszóvá vált, a fotonok pedig már szabadon mozoghattak. Ezen jelenség képét érzékeljük a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzásként. A rekombináció előtti gázfelhők egyenetlen eloszlását a háttérsugárzás fluktuációjaként érzékeljük. Az első csillagok keletkezéséig ($z \approx 10$) a világegyetem sötét volt, ezt az időszakot "sötét korszaknak" nevezik.

Az ezt követő időszakot a hierarchikus halmozódás jellemzi, azaz a struktúrák képződése kisebb méretekben megy végbe először, majd ezek szerveződnek nagyobb léptékű rendszerekbe. A struktúrák kialakulását a domináns hideg sötét anyag gravitációja irányítja. A galaxishalmazok és nagyobb struktúrák fejlődése lassabban megy végbe. A világegyetem elkezdett hűlni $z \approx 5$ -10 között, ennek hatására az anyag csomósodni kezdett, és kialakultak az első galaxiskorongok, galaxisok. Ez időben játszódott le az újrafűtés is, amely az erős csillagkeletkezésben létrejött új csillagok miatt játszódhatott le. Ezek sugárzása által a galaxisközi gáz újraionizálódott és felhevült (reionizáció), átmenetileg korlátozva a csillagkeletkezést.

A jelentősebb méretű halmazok relaxációja már $z \approx 2$ -3 körül végbement, azonban a ritkábbak még nem fejezték be ezt a folyamatot. Ezt nevezzük a halmazképződés korszakának. A nagy sűrűségű halmazmagokban a halmazok relaxációjával járóbelső mozgások során gyakori jelenség volt a galaxisok kölcsönhatása és összeolvadása, amely folyamatok a galaxisok aktivitását is megnövelték. Röviddel ezután a csillagkeletkezési ráta fejlődése során a maximumra ért. Ezt követően ($z < 1$) a csillagkeletkezés visszaesett, de a galaxisok legtöbbje tovább fejlődött.

2.2. Univerzum-modellek

Az Univerzum-modellek fő célja, hogy a kozmológiai elveket (miszerint a világegyetem homogén és izotróp) és fizikai törvényeket felhasználva egy kezdeti állapotból visszakapjuk a ma megfigyelhető képét a világegyetemnek. Többek között tartalmaznia kell a táguló világegyetemről alkotott elméleteket, képesnek kell lenniük megalkotni a megfigyelhető kozmikus struktúrákat, a galaxisok, galaxishalmazok változatosságát (például spirál és elliptikus galaxisok). Ha sikerül megalkotni egy olyan szimulációt, amely teljes mértékben visszaadja a megfigyelésekkel azonos képet, akkor megismerhetjük a világegyetem fejlődését, a sötét anyag természetét, és megjósolhatjuk, hogy hogyan fog fejlődni a jövőben.

Az utóbbi évtizedekben rengeteg információt szereztünk az Univerzum szerkezetéről olyan különböző felmérések segítségével, mint például a Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [83], vagy a Cosmic Assembly Near-IR Deep Extragalactic Legacy Survey (CANDELS) [17], [30]. A rendelkezésre álló nagy mennyiségű adat mellett szükséges, hogy megfelelő elméleti modelleket alkosunk, amelyek alátámasztják a struktúrák képződésével, galaxisok kialakulásával, a sötét anyaggal és sötét energiával kapcsolatos tapasztalatainkat.

A Λ CDM kozmológiai modell dinamikája az általános relativitáselméleten alapul, az ebben domináns komponensek pedig a hideg sötét anyag (angolul: cold dark matter, röviden CDM) és a kozmológiai konstans (Λ) [47]. A sötét anyag illetve a sötét energia aránya a teljes energiasűrűséghez meghatározza a görbületet, amely így lehet sík (Euklideszi), pozitív vagy negatív görbületű. A megfigyelések alapján a sík megoldás illeszkedik a legjobban. A Λ CDM kozmológia kezdeti feltételeit felhasználva két különböző modellt alkalmaznak: az egyik a fél-analitikus modell, amelyben az N-test szimulációk kimenetelének és egyszerű fizikai törvényeknek együttes alkalmazásával határozzák meg a galaxisok eloszlását [25], [78]. Egyik széles körben alkalmazott példája ennek a Millennium-szimuláció [64]. A másik esetben a barionikus elemek paraméterei mellett hidrodinamikai és gravitációs modelleket alkalmaznak [24], [66].

Korábbi modellek sikeresen reprodukálták a galaxisok alkotta kozmikus hálót a struktúrák növekedését szimulálva, azonban a hiányos fizikai modellek és a numerikus pontatlanságok miatt a megfigyelhető elliptikus és spirál galaxispopulációkat nem sikerült visszaadniuk. A hidrodinamikai szimulációk a tartalmazzák a radiatív hűtési mechanizmusokat [24], a csillagvisszacsatolást [45], és az aktív galaxismagok visszacsatolását [68]. Kisebb skálájú modellek továbbá tartalmazzák a mágneses terek fizikáját [49], vagy a radiatív transzfert [53].

A hidrodinamikai szimulációk több szempontból is fejlődtek az elmúlt évek során. A méretük (azaz a felbontóképességük és a kozmikus térfogatuk) egyre nagyobb lett, amely a számítógépek fejlődésének köszönhető. Az alkalmazott modellek komplexebbek lettek, így pontosabb képet adnak például a csillagkeletkezésről, a fekete lyukak növekedéséről, a mágneses terekről. Továbbá a fejlettebb numerikus eszközökkel pontosabb számítások végezhetőek a hidrodinamikai és gravitációs egyenletek megoldására [15].

2.3. Gammakitörések

A gammakitörések (angolul: gamma-ray bursts, azaz GRB) az ősrobbanás óta ismert legnagyobb luminozitású és legenergetikusabb események a világegyetemben [32]. Ezek a jelenségek rövid időtartamú kitörések, amelyek által szétsugárzott fotonok alapvetően gamma spektrumban figyelhetőek meg [14]. Az alábbiakban Rácz István "Gammakitörések és kozmikus környezetük" című doktori értekezését [22] felhasználva ismertetem a gammakitörések főbb jellemzőit.

Történetük az emberiség számára az 1960-as években kezdődött, amikor az Amerikai Egyesült Államok a tiltott nukleáris tesztek észleléséhez létrehozta a Vela műholdakat. Ezek segítségével 1969 júliusa és 1972 júliusa között összesen 16 gammakitörést észleltek, nukleáris robbanásokat azonban egyet sem [29].

A gammakitöréseket alapvetően időtartamuk alapján osztályozzák. A jelenlegi állás szerint időtartamuk szerint két fő csoportra lehet osztani a GRB-ket: vannak a rövid időtartamú GRB-k (angolul: Short gamma-ray bursts, röviden SGRB), ezek $t < 2$ másodpercig tartanak, valamint a hosszú GRB-k (angolul: Long gamma-ray bursts, röviden LGRB), amelyek $t > 2$ másodperc időtartammal bírnak [31]. Ez a csoport magában foglalja a megfigyelt események többségét, valamint átlagosan 30 másodpercig tartanak [40]. További vizsgálatok folyamán arra jutottak, hogy több kisebb csoport is létezik, ezek közül némelyek közepes időtartamúak [21], [18], [42], de léteznek nagyon hosszú kitörések is $t > 1000$ másodperc időtartammal [74].

Azokat a gammakitöréseket, amelyek azonos időskálával rendelkeznek, nagy valószínűséggel azonos folyamat hozza létre [84], [35]. Jelen álláspont szerint csak a két főbb csoport (SGRB és LGRB) eredetére sikerült modellt alkotni [85]. A hosszú kitörések nagy tömegű, alacsony fémtartalmú, gyorsan forgó végstádiumú csillagok által keletkeznek, ezeket a jelenségeket hipernóváknak nevezik. Az esemény után a központi objektum helyén egy fekete lyuk marad hátra [81]. A progenitor csillag anyagának egy része a robbanás következtében ledobódik, illetve a fekete lyukba akkretál. A fekete lyuk felé mozgó anyag egy része relativisztikus jetként távozik. A jet áramló anyaga és a környező anyaga kölcsönhatása kelti az utófényt. Ezeken a területeken ebből kifolyólag aktív csillagkeletkezés megy végbe, így az LGRB-k fontos nyomjelzői a korai Univerzum fejlődésének [82].

A II-es típusú szupernóvák is kapcsolatban vannak ezekkel a kitörésekkel. A magösszeomlásos szupernóva-modell alapján, amelyet A.Burrows és D.Vartanyan cikke [3] alapján foglalok össze, a $8M_{\odot}$ kezdeti tömeg felett a csillag magjában beindul a szén és más elemek fúziója. A folyamat végén kialakul egy vasból és nikkelből álló mag, amely már nem képes energiát termelni. A turbulencia hatására nagy mértékben megemelkedik a nyomás. A protonok elektronokat fognak be miközben neutrínók lépnek ki a csillagból fokozva az összeomlást. A nagy sűrűség miatt a neutrínók sem tudnak majd kilépni, és felhalmozódnak, majd degenerálódnak a nukleonok. Ennek nyomása miatt az összehúzódó anyag, ahogy degenerálttá válik, visszapattan önmagáról. Ezt követően egy lökéshullám indul meg, amikor ez eléri a felszínt, szupernóva-robbanás történik. A könnyebb

($9M_{\odot}$) progenitor csillagok előbb, míg az ennél nehezebb objektumok később robbannak fel. Az SGRB-k valószínűsíthetően két keringő neutroncsillag vagy kettős fekete lyuk összeolvadásakor keletkeznek [44], [70]. Ezek a kettős rendszerek pedig összeolvadásukkor gravitációs hullámokat keltenek [61].

2.4. LGRB anyagaxisok

Azokat a galaxisokat, amelyekben keletkezhetnek hosszú gammakitörések, LGRB anyagaxisoknak (angolul: LGRB host galaxy-nak) nevezzük. Az LGRB anyagaxisok tulajdonságainak megismerésével jobban meg tudjuk érteni a csillagok fejlődését és a fekete lyukak keletkezését. Segítségükkel a korai világegyetemben végbemenő csillagkeletkezést is vizsgálhatjuk. A következőkben ismertetem ezen anyagaxisok jellemzőit és fontosságukat, többek között Chisari és mtsai. [6] valamint Campisi és mtsai. [5] munkái alapján.

Az LGRB anyagaxisokra jellemző a magas csillagkeletkezési ráta, ugyanis ilyen környezetben könnyebben kialakulhatnak az LGRB-t előidéző nagy tömegű csillagok. Ezen csillagoknak az LGRB-k modellje alapján alacsony fémtartalommal kell rendelkezniük. Feltételezve, hogy az anyacsillag fémtartalma függ a galaxis fémtartalmától, olyan galaxisokat szükséges keresni, amelyekben aktív csillagkeletkezés folyik, és alacsony a fémtartalom [52], [73] (tipikusan $Z < 0.5 Z_{\odot}$). Palmerio és mtsai. [50] azt találták, hogy $Z > 0.7 Z_{\odot}$ felett az LGRB-k keletkezése jelentős mértékben csökken. Ghirlanda és mtsa. [16] arra jutottak, hogy a GRB-k keletkezési rátája $z \approx 3$ körül maximumot mutat. Ebből kifolyólag $z > 3$ esetén az alacsony fémtartalmú galaxisokban az LGRB-k lehetséges nyomai a magas csillagkeletkezésnek. Amelyből következik, hogy fiatal csillagpopulációk alkotják ezeket a galaxisokat. Előfordulhat olyan eset is, hogy az anyacsillag körül lokálisan alacsony, azonban a galaxis egészében átlagosan magasabb a fémtartalom.

A hosszú gammakitörést keltő csillagnak legalább körülbelül $10M_{\odot}$ tömeggel kell rendelkeznie [57]. Fan és mtsai. [13] azt találták, hogy kémiai összetétel alapján az LGRB-t produkáló galaxisok irregulárisok mind magas, mind alacsony vöröseltolódás esetén. Az LGRB-k az Univerzum különböző korszakaiban hasonló típusú galaxisokban keletkeznek. Az anyagaxisok luminozitása tipikusan alacsonyabb az L^* karakterisztikus galaxis luminozitásánál, amely érték közelítőleg a Tejútrendszer luminozitásával egyezik meg. Szimulációk alapján az anyagaxisok halójára is adtak becsléseket. Az átlagos anyagaxisok $10^{11}M_{\odot}$ sötét anyag halóval rendelkeznek, a csoportokat alkotó anyagaxisok között körülbelül $10^{13}M_{\odot}$ tömegű halo van.

2.5. Egyesülő galaxisok

Két galaxis egyesülése a galaxisok kölcsönhatásának intenzív folyamata. Galaxisok egyesülése akkor mehet végbe, amikor két vagy több galaxis összeütközik egymással. Az ütköző galaxisok fejlődését sokan tanulmányozták az elmúlt évtizedekben, ugyanis mechanizmusuk megértése magyarázatot adhat a galaxisok fejlődésére, morfológiájára, dinamikájára és számos más tulajdonságára, amelyeket korábbi elméletek alapján még nem sikerült megérteni.

Az ütköző galaxisok paraméterei és tulajdonságai jelentős mértékben megváltoznak ahhoz képest, mintha egymagukban fejlődnének, és nem lennének kölcsönhatásban más galaxisokkal. Gravitációs kölcsönhatásuk során, valamint a gáz és por sűrűlődése következtében különböző folyamatok indulhatnak meg az ütközésben résztvevő galaxisokban. Galaktikus áramlások keletkezhetnek, amelyek táplálják a központi régiót és a fekete lyukat, amely megnövelheti a galaxismag aktivitását [8], [10], [11], [1]. Csillagkeletkezési rátájuk fokozódik [62], [41], [55], [2], [26], [23], amelyet kapcsolatba hoztak a galaktikus kiáramlásokkal [39], [60], [69] és magaktivitással [59], [72], [80]. Luo és mtsai. [34] valamint Cibinel és mtsai. [7] azt találták, hogy a nagy csillagkeletkezési rátával rendelkező galaxisok körülbelül 10-20%-a egyesülő galaxis.

Az ütköző galaxisok fémtartalmának fejlődése szintén intenzíven kutatott terület. Korábbi munkákban galaxisok tömegének és fémtartalmának korrelációját [33], [28], valamint a luminozitás és fémtartalom összefüggést [58] figyelték meg. Kewley és mtsai. [27] galaxispárok luminozitás-fém-tartalom relációját vizsgálták, amelyből arra a következtetésre jutottak, hogy az alacsony fémtartalommal rendelkező galaxispárok erősebb központi kitöréseket produkálnak. Később Ellison és mtsai. [12] is vizsgálták a luminozitás-fémesség, tömeg-fémesség relációt, valamint a csillagkeletkezési ráta és a galaktikus tömeg közti összefüggést. Eredményükben megerősítették, hogy a galaxisok közti kölcsönhatások gáz-beáramlásokat keltenek a központi régióba, amely hatására fokozódik a csillagkeletkezés, és a központi mag aktivitása is megnő.

3. fejezet

Az Illustris szimuláció

Az Illustris projekt [75], [77], [15], [63] egy kozmológiai magneto-hidrodinamikai szimuláció fókuszában a galaxisképződéssel és -fejlődéssel, melynek futtatása 2013 végén fejeződött be, felhasználva a legkorszerűbb numerikus kódokat és fizikai modelleket.

A szimuláció az AREPO kódot használja, amely nemcsak a sötét anyag és a gáz dinamikáját foglalja magában, hanem a magneto-hidrodinamikai és gravitációs egyenleteket is figyelembe veszi. A szimulációs térfogat a Voronoi-cellákat alkalmazza, melynek pontjait gázárammal mozgatják. Egy pont tartalmaz egy elemének Voronoi-cellája azokat a síkbeli, illetve térbeli pontokat tartalmazza, amikhez a pont tartalmazból az adott elem van a legközelebb. Ezeket a cellákat 2 és 3 dimenzió esetén is lehet alkalmazni, de akár több dimenzióra is kiterjeszthetőek [65]. Az adaptív hálót a hidrodinamikai egyenletek megoldására alkalmazzák.

A szimulációban a galaxisok kialakulására több asztrofizikai folyamatot használnak: a gáz-hűtési sebességeket a gáz sűrűségének, hőmérsékletének és fémességének függvényében számítják ki. Az aktív galaxismagok sugárzási területeit és a kozmikus háttérsugárzást a galaxisokból és kvázárokból számolják, amely kielégíti a $\text{HI } z \approx 6$ körüli reionizációt. A hűtési mechanizmusok önkonzisztens kiszámítását használják, kiegészítve a fémek hűtési hozzájárulásával, a Coudy57 táblák alapján. Nyomon követik az Ia és II típusú szupernóvák és az aszimptotikus óriáság csillagainak fejlődését, valamint kilenc elem (H, He, C, N, O, Ne, Mg, Si, Fe) evolúcióját.

A kezdeti feltételek létrehozásához a CAMB Boltzmann kódot használták, a Λ CDM kozmológia teljesítményspektrumának kiszámításához az alábbi paraméterekkel: $\Omega_m = 0,2726$, $\Omega_\Lambda = 0,7274$, $\Omega_b = 0,0456$, $\sigma_8 = 0,809$, $n_s = 0,963$, $H_0 = 100h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ és $h = 0,704$, amely paramétereket a WMAP-9 felmérés alapján határoztak meg.

A megalkotott szimuláció egy 106.5 Mpc oldalhosszúságú periodikus doboz, egy kezdeti 1000×182^3 részecske "csempe konfigurációval". A kezdeti állapot $z = 127$ vöröseltolódásnál (körülbelül 12 millió évvel az ősrobbanás után) található, ez az Univerzum "Sötét Kora" amikor a hidrogén még nem sugárzott, valamint amelynek a hőmérsékletét a RECFAST adatai alapján $T = 245\text{K}$ -nek állították be.

3.1. Illustris TNG

Az IllustrisTNG projekt [46], [38], [54], [67], [43] az eredeti Illustris szimuláció modernizált változata, amely tartalmazza a legújabb fizikai ismereteinket a galaxisok fejlődéséről. A TNG szimuláció is az AREPO kódot használja, a magneto-hidrodinamikai és gravitációs egyenleteket figyelembe véve. A galaxisok fejlődésének tanulmányozása érdekében a TNG szimuláció a következő kozmológiai paraméterekkel számol, ezeket alkalmazza a newtoni gravitációra és táguló világegyetemre: $\Omega_{\Lambda,0} = 0,6911$, $\Omega_{m,0} = 0,3089$, $\Omega_{b,0} = 0,0486$, $\sigma_8 = 0,8159$, $n_s = 0,9667$, $h = 0,6774$

Emellett az alábbi fizikai modelleket alkalmazza: (1) mikrofizikai gázsugárzási mechanizmusokat (2) a csillagkeletkezést sűrű csillagközi közegben (3) a csillagpopulációk evolúcióját és kémiai összetételét az Ia és II típusú szupernóvák valamint az aszimptotikus óriáság csillagai alapján az alábbi elemekre: H, He, C, N, O, Ne, Mg, Si és Fe (4) a nagytömegű fekete lyukak közelében keletkező gázok formálódását (5) csillagkeletkezés-visszacsatolás által vezérelt galaktikus léptékű kiáramlásokat (6) többmódú feketelyuk-visszacsatolást termikus 'kvazár' állapotban magas akkréció esetén, és kinetikus 'szél' módban alacsony akkréció esetén (7) kozmikus mágneses mezők erősítését egyperces primordiális magmezőből a korai időkben.

A projekt három különböző méretű szimulációt tartalmaz, ezek a TNG50, TNG100 és TNG300. A TNG100 és TNG300 volt az első kettő, melyeket egyidőben publikáltak, majd a TNG50 szimuláció volt az utolsó. A három modell paramétereit a 3.1 táblázat foglalja össze, amelyben: V a térfogat, L_{box} a szimulált doboz oldalhossza, N_{GAS} a gáz részecskék száma, N_{DM} a sötét anyag részecskék száma, N_{TR} a nyomjelző részecskék száma, m_{baryon} a barionikus anyag tömege, m_{DM} a sötét anyag tömege.

		TNG50	TNG100	TNG300
V	$[Mpc^3]$	$51,7^3$	$110,7^3$	$302,6^3$
L_{box}	$[Mpc/h]$	35	75	205
N_{GAS}	-	2160^3	1820^3	2500^3
N_{DM}	-	2160^3	1820^3	2500^3
N_{TR}	-	2160^3	$2 \cdot 1820^3$	2500^3
m_{baryon}	$[M_{Nap}]$	$8,5 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^7$
m_{DM}	$[M_{Nap}]$	$4,5 \cdot 10^5$	$7,5 \cdot 10^6$	$5,9 \cdot 10^7$

3.1. táblázat. TNG50, TNG100 és TNG300 paramétereit

Mindegyik TNG szimuláció úgynevezett Snapshot-okra van feldarabolva, melyek az Univerzum egy adott időpillanatát örökítik meg. A TNG-val lehetőségünk adódik arra hogy ezen Snapshotok segítségével nyomon kövessük a galaxisok fejlődését.

3.2. TNG100-1

Dolgozatomban a TNG100-1 szimuláció adataival vizsgáltam a galaxisok fejlődését. Ez a szimuláció a korábban már ismertetett Planck2015 eredményeiből kapott kozmológiai konstansokat tartalmazza. Magában foglalja a TNG fizikai modelleit, emellett a következő paraméterek jellemzik (3.2 táblázat):

PARAMÉTER	ÉRTÉK
szimulációs tér oldalhossza [ckpc/h]	$7,5 \cdot 10^4$
átlagos gáz cella tömege [$10^{10} M_{\odot}/h$]	$9,44 \cdot 10^{-5}$
sötét anyag részecske tömeg [$10^{10} M_{\odot}/h$]	$5,06 \cdot 10^{-4}$
sötét anyag részecske	$6,03 \cdot 10^9$
gáz nyomjelző anyag száma	0
kezdő vöröseltolódás	127,0
végso vöröseltolódás	0,0

3.2. táblázat. A *TNG100-1* paraméterei

A TNG100-1 szimulációban összesen 100 darab Snapshot készült. Ezek a Snapshotok $z = 20.05$ (13,624 milliárd évvel ezelőtt) és $z = 0.00$ (jelen) között örökítették meg a szimulált világ-egyetem paramétereit. Az egyes Snapshotok időbeni eloszlása nagyjából egyenletes, két adatcsoport között körülbelül 150 ± 50 millió év telik el.

3.3. Merger Tree (ütközéstörténeti fa)

A merger tree az Illustris szimulációban a galaxisok ütközéstörténetének adatait tartalmazza. Az adatfájlok segítségével tanulmányozhatók az interakcióba került galaxisok a kölcsönhatási folyamat előtt és egyesülés után. A merger tree megjelenik a különféle Illustris szimulációkban, így a TNG100-1-hez is tartozik egy ütközéstörténeti fa. A merger tree az úgynevezett SubLink [56] és LHaloTree [68] algoritmust alkalmazza, utóbbi azonos a Millenium és Aquarius szimulációban alkalmazott metódussal, csak HDF5 formátumú. A továbbiakban Rodriguez-Gomez és mtsai. [56] munkája alapján ismertetem a SubLink merger tree működési elveit.

TNG-ben alkalmazott merger tree megegyezik az Illustrisban használttal, amely mellett tartalmazza a csoport katalógus fájlokat is. Két különböző variációja van a merger tree-nek: egyik az úgynevezett 'DM-only', amely kizárólag a sötét anyag fejlődését követi a szimulációban; a másik típus a 'baryonic', vagyis amely a barionikus anyagot, tehát a csillag-részecskéket és a csillaganyag-keltő gáz részecskéket követi nyomon. A részecske itt a szimuláció egységnyi eleme, más néven cellája. A SubLink algoritmus az ütközéstörténeti fát minden Subhalo esetén három lépésben határozza meg. Az algoritmus először az adott Subhalo-t követő Snapshotban azonosítja azokat a Subhalo-kat, amelyek közös részecskékkal rendelkeznek a vizsgált Subhalo-val. A következő lépésben a kiválasztott lehetséges utódok egy pontot kapnak egy jósági függvény segítségével, amely az egyes részecskék kötési energiáját is figyelembe veszi. Harmadik lépésben kiválasztja a legnagyobb pontszámmal rendelkező Subhalo-t, amely a vizsgált Subhalo Descendant-ja, azaz utódja lesz. Előfordul, hogy az algoritmus nem talál megfelelő utódot, ezért bizonyos esetekben megengedett, hogy az utód azonosítása érdekében átugorjon egy Snapshotot. Amikor az algoritmus elkészítette az összeköttetéseket, a FirstProgenitorok (első előd) kerülnek meghatározásra, amelyek a 'legnagyobb tömegű múlttal' bírnak, tehát az adott Subhalo a Snapshotokon keresztül összességében a legnagyobb tömeggel rendelkezett. Példaként 'A' Subhalo progenitorja, azaz elődje 'B' Subhalo-nak, ha 'B' egyedüli utódja 'A' Subhalo-nak. A struktúra alapján egy Subhalo-hoz csak egy Descendant Subhalo tartozhat, azonban több Progenitor Subhalo. Az utódokkal és a FirstProgenitorok megadásával meghatározható egy egyedi ütközéstörténeti fa. A könnyebb kezelhetőség érdekében az egyes Subhalo-k 'pointerekkel' rendelkeznek, amelyek összeköttetést biztosítanak például az adott Subhalo és a hozzá tartozó Descendant, First Progenitor, Next Progenitor között, ahol a Next Progenitor a 'második legnagyobb tömeg-múlttal' rendelkező előd Subhalo.

4. fejezet

Adatfeldolgozás

4.1. Alkalmazott változók és jelentésük

SFR : Csillagkeletkezési ráta (Star Formation Rate, SFR), az egyes galaxisokban évente keletkező új csillagok össztömege. Mértékegysége: $M_{\odot}/\text{yr}$ (Naptömeg/év)

$\langle \text{SFR} \rangle$: A galaxisok csillagkeletkezési rátájának átlaga

z : Vöröseltolódás

Z : Galaxisok fémtartalma. Mértékegysége: M_z/M_{tot} , ahol M_z a héliumnál nehezebb elemek tömege, M_{tot} pedig a teljes tömeg.

$\langle Z \rangle$: Galaxisok átlagos fémtartalma

$\langle M \rangle$: Galaxisok átlagos tömege

4.2. Vizsgált paraméterek és jelentésük

SubhaloSFR: A Subhalo-ban található gáz csillagkeletkezési rátájának összege, innentől röviden csillagkeletkezési ráta (angolul: Star Formation Rate, röviden: SFR). Mértékegysége: Naptömeg/év ($M_{\odot}/\text{yr}^{-1}$).

SubhaloStarMetallicity: A galaxis csillagos tömegének fémtartalma (mértékegysége: M_z/M_{tot} , ahol M_z minden héliumnál nehezebb elem tömegét magában foglalja, M_{tot} pedig a teljes tömeg), azon részecskékre számolva, amelyek SubHalo féltömeg-sugarán belül helyezkednek el. (Innentől

röviden: fémtartalom, Z)

SubhaloMass: A Subhalo-hoz kötött részecskék össztömege. Mértékegysége: $10^{10} M_{\odot}/h$

SubhaloID: Egy adott Subhalo (azaz galaxis) egyedi azonosítója egy Merger Tree-n belül.

FirstProgenitorID: Az adott Subhalo-hoz tartozó 'first progenitor' galaxis SubhaloID-ja. A 'first progenitor' a legnagyobb tömeg-történettel rendelkező galaxis, amely az adott galaxis múltját alkotja.

DescendantID: Az adott Subhalo-hoz tartozó utód. Ha nincs ilyen, akkor értéke '-1'.

NextProgenitorID: Azon Subhalo SubhaloID-ját tartalmazza, amelyik a vizsgált Subhalo-val azonos utód galaxissal rendelkezik, és a következő legnagyobb tömeg-múlttal rendelkezik.

SnapNum: Megadja, hogy az adott Subhalo melyik Snapshot-ban található.

4.3. Adatstruktúra feldolgozása, adatok elemzése

Az Illustris TNG100-1 Merger Tree adathalmazból a SubLink Tree adatfájlokat dolgoztam fel. A SubLink Tree fájlok tartalmazzák a galaxisok közti előd és utód kapcsolatokat, valamint az összes Subhalo tulajdonságot, mint például a SubhaloSFR (csillagkeletkezési ráta) vagy SubhaloMass (tömeg). A teljes adatfájl 442.5 GB mérettel rendelkezik, amely 20 különböző, egymástól független ágra van felbontva. Az egy ágon belül szereplő galaxisok egyetlen listába vannak rendezve. A listában elfoglalt helyük azonban megegyezik a hozzájuk tartozó SubhaloID-vel. Ezekre hivatkozva egy galaxisnak bármilyen, a Subhalo-ban szereplő paraméterét ki lehet választani.

Dolgozatomban azokat az ütköző galaxisokat vizsgálom, amelyek közül legalább az egyik tag alacsony fémtartalommal rendelkezik. Az alacsony fémtartalmat az elméleti háttérben ismertetett LGRB anyaggalaxisokra jellemző paraméterek alapján a $z = 2$ -nél kiszámított, tömeggel súlyozott átlagos fémtartalom értékével házároztam meg.

A kapott értéket felhasználva egy adott vöröseltolódás esetén a galaxisok közül kiválasztottam azokat, amelyek ennél kisebb értékkel bírnak. Ezeket a fémtartalom értékeket, és a galaxisok listában elfoglalt helyét elmentettem, hogy a későbbiekben a többi paraméter kiválasztásához csak a paraméterek listáiban elfoglalt helyük alapján azonosítani tudjam a megfelelő galaxisok értékeit. Az elmentett adatok segítségével a benne szereplő minden egyes galaxisra hivatkozva így már lehetséges az adott galaxisok tetszőleges értékeinek megadása.

Ezt követően kiválasztottam minden alacsony fémtartalmú galaxis Snapshot-ját a SnapNum paraméter segítségével, és az egyes Snapshot-hoz tartozó galaxisokat külön-külön szöveges fájlokként elmentettem. Így minden egyes Snapshot-ban lehetséges külön vizsgálni az ütközésben résztvevő galaxisok paramétereit. A különböző vöröseltolódásokban szereplő galaxisokra hivatkozva kiválasztottam az adott vöröseltolódásban szereplő galaxisokhoz (ezek a FirstProgenitor galaxisok) tartozó DescendantID-t, NextProgenitorID-t, valamint ezen három galaxis SubhaloSFR, SubhaloMass, SubhaloStarMetallicity paramétereit. Így a két ütköző tag és a létrejött új galaxis paramétereit lehetséges egyszerre vizsgálni.

A 20 Merger Tree közül a 0. sorszámúból válogattam ki az ütközésben résztvevő galaxisokat. Ebben a Merger Tree-ben összesen 24620143 darab Subhalo szerepel, amelyek közül 2033209 darab galaxisnak alacsony a fémtartalma. Az Illustris adatai egy minimum korlát alatt azonosan 0.0 értéket vesznek fel. Ezeket az értékeket munkám során nem vettem figyelembe, így csak azon galaxisok szerepelnek a vizsgáltak között, amelyek 0.0-nál nagyobb és a korábban megállapított felső korlát alatti fémtartalommal bírnak. Ezek a kritériumok a többi paraméterre már nem vonatkoznak, hiszen a vizsgált galaxisok fémtartalomtól eltérő paramétereit már a teljes Subhalo adathalmazból válogattam ki. Ezzel a módszerrel a vizsgált ütköző galaxisok legalább egyik tagja biztosan alacsony fémtartalommal rendelkezik.

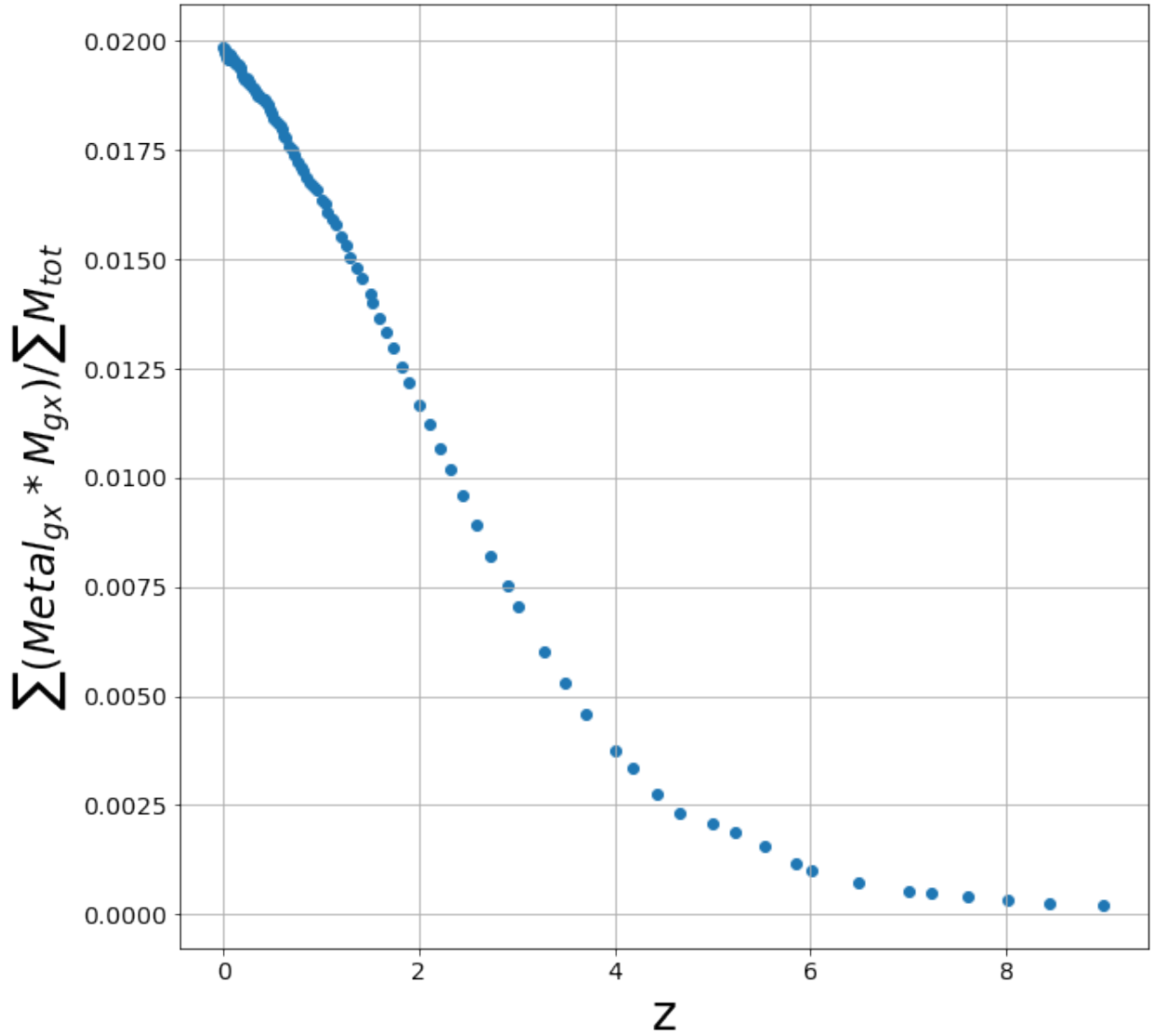
5. fejezet

Eredmények

A következőkben ismertetem a Subhalo és a Merger Tree adatainak feldolgozásából kapott eredményeket.

Először a Subhalo-ban szereplő összes galaxist vizsgáltam meg, hogy ki tudjam számítani az alacsony fémtartalom értékét. Ehhez kiszámítottam az átlagos tömegsúlyozott fémtartalmat a Subhaloban szereplő összes galaxisra, majd kiválasztottam a $z = 2$ -nél megkapott értéket. Az átlagos tömegsúlyozott fémtartalmat a SubhaloStarMetallicity és a SubhaloMass értékekkel számítottam ki. Egy adott vöröseltolódás esetén a teljes adathalmaz galaxisainak átlagos súlyozott fémtartalmát a következőképpen adtam meg: $\sum (Metal_{galaxy} * Mass_{galaxy}) / \sum Mass_{total}$, ahol $Metal_{galaxy}$ egy adott galaxis fémtartalma, $Mass_{galaxy}$ a tömege, $\sum Mass_{total}$ pedig az összes galaxis tömege. Az egyes vöröseltolódások esetén kapott értékeket az 5.1 ábra mutatja be. Az alacsony fémtartalmú galaxisok felső korlátja ezek alapján ≈ 0.011674 -nek adódik, a $z = 2$ vöröseltolódás esetén megállapított átlagos tömegsúlyozott fémtartalommal. Az Illustris szimulációban a Nap fémtartalma [43], [79], [76] a héliumnál nehezebb elemekkel számítva: $Z_{\odot} = 0.0127$, így az általam megállapított felső határérték $Z_* = 0.919Z_{\odot}$

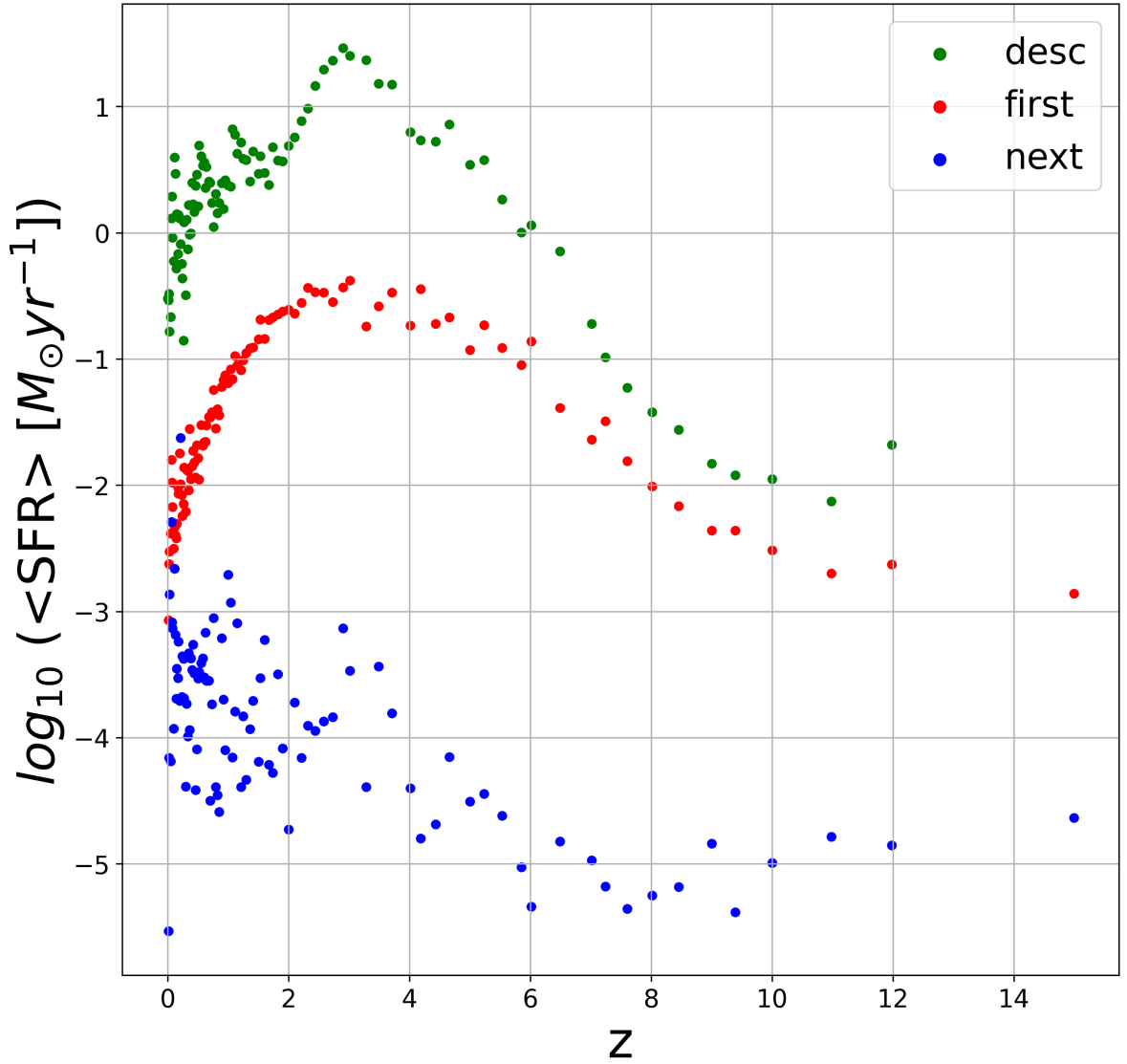
Az ábrán látható, hogy míg az átlagos tömegsúlyozott fémtartalom a korai Univerzumban ($z > 6$) lassú emelkedést mutatott, addig a reionizáció korszaka idején ($z \approx 5$) a növekedés üteme fokozódott. Ezt követően ($z < 4$ után) a fémtartalom emelkedése még intenzívebb lett, körülbelül lineáris emelkedést mutat a vöröseltolódás függvényében. A jelenkorban ($z = 0$) az Univerzum fémtartalma az Illustris adatai alapján $Z \approx 2$, amely kissé eltér korábbi eredményektől: Calura és Matteucci [4] számításai alapján ez az érték $\langle Z \rangle_{gal} = 0.0175$. Ahogyan az ábrán is látható, ezt az értéket $z \approx 0.8$ körül veszi fel a görbe.



5.1. ábra. A TNG100-1 teljes adatsorában szereplő galaxisok fémtartalmának tömeggel súlyozott átlaga a vöröseltolódás (z) függvényében. A $\sum(Metal_{gx} * M_{gx}) / \sum(M_{tot})$ a tömeggel súlyozott átlagos fémtartalom, ahol $Metal_{gx} * M_{gx}$ a héliumnál nehezebb elemek tömegét jelöli, M_{tot} pedig az egyes galaxisok teljes tömege. Az átlagos fémtartalom folyamatos növekedése figyelhető meg a vöröseltolódás függvényében, a reionizáció korszaka idején ($z \approx 5$) a növekedés üteme fokozódik, majd $z < 4$ után a kezdeti meredekséghez képest intenzívebb közel lineáris emelkedés mutatkozik.

5.1. Csillagkeletkezési ráta

A gammakitörések létrejöttében fontos szerepet játszik a magas csillagkeletkezési ráta, így az ütköző galaxispárok esetén ezt elemeztem először, amelyet az 5.2 ábrán mutatok be. Az ábrán az alacsony fémtartalmú összeolvadó galaxisok átlagos csillagkeletkezési rátájának logaritmikus függvénye látható a vöröseltolódás függvényében. Az egyes pontok az adott vöröseltolódás esetén ütközésben résztvevő galaxisok átlagos értékét mutatják. Minden egyes pont körülbelül 1000-2000 darab galaxis átlagából adódik. Zöld színnel azokat a galaxisokat jelöltem, amelyek az ütközések során keletkeztek, ezek a Descendant (az ábrán 'desc' jelöléssel, magyarul 'leszármazott, vagy utód') galaxisok. Pirossal azok a galaxisok szerepelnek, amelyek a FirstProgenitorként (az ábrán 'first' jelöléssel, magyarul 'első előd' galaxisok) szerepelnek az ütközésben, tehát ezek rendelkeznek a legnagyobb tömeg-múlttal az adott Descendant esetén. Kékkel pedig a NextProgenitor galaxisok (az ábrán 'next' jelöléssel, magyarul 'következő előd' galaxis) vannak feltüntetve, amelyek a második legnagyobb tömeg-múlttal rendelkeznek az adott Descendant esetén. A FirstProgenitor galaxisok vöröseltolódás alapján lettek kiválogatva, így azok a megfelelő vöröseltolódás értékkel bírnak, azonban a NextProgenitor és Descendant galaxisokra nem konzisztens, hogy az adott FirstProgenitor galaxisához képest melyik vöröseltolódásban található. Hozzávetőlegesen a NextProgenitor galaxisok értéke megegyezik a FirstProgenitor vöröseltolódásával (más esetekben eggyel korábbi vagy eggyel későbbi Snapshotban helyezkedik el). A Descendant-ok egy vagy két Snapshottal későbbi értékkel bírnak, de mindenképpen kisebb vöröseltolódással bíró galaxisok. Mivel a galaxisok átlagát vizsgálom, és nem az egyes eltéréseket, hanem az általános trendeket szeretném meghatározni, így azzal a közelítéssel éltem, hogy a NextProgenitor galaxisokat a FirstProgenitorokkal azonos vöröseltolódással ábrázoltam, a Descendant galaxisokat pedig egy Snapshottal későbbi állapotban helyeztem el. Az ábrán jól látható, hogy a galaxisok csillagkeletkezési rátája jelentős mértékben megnőtt, miután részt vettek az összeolvadásban. Az ütközések előtti galaxisokhoz képest az utód galaxis SFR-je (a FirstProgenitorhoz viszonyítva) $z > 6$ esetén körülbelül egy 0.5-ös faktorral lett nagyobb. Ahogyan az SFR közelíti a $z \approx 3$ körüli csúcsát, a Descendant már egy 2-es faktorral tér el, amely alátámasztja az elméleteket és megfigyeléseket, miszerint galaxisok kölcsönhatása során fokozódik a csillagkeletkezés. Amíg a FirstProgenitor galaxisok csúcsa $z = 2-4$ között jelenik meg, viszonylag lapos görbén, addig a Descendant galaxisok SFR-jének csúcsa egy éles maximumot mutat $z \approx 3$ vöröseltolódásnál. Ez a csúcs egybeesik a Ghirlanda és mtsai. [16] által talált GRB keletkezési ráta $z = 3$ -as maximumával. A NextProgenitor galaxisok a definíciójuk alapján kisebb és fiatalabb galaxisok, mint a FirstProgenitor, így átlagos SFR értékük is több nagyságrenddel kisebb a legtöbb esetben. Azonban közeledve a jelenkorhoz egyes esetekben a NextProgenitorok átlaga meghaladja az első elődökét és a görbék tendenciáját figyelembe véve egyre közelebbi értékeket vesznek fel egymáshoz képest.

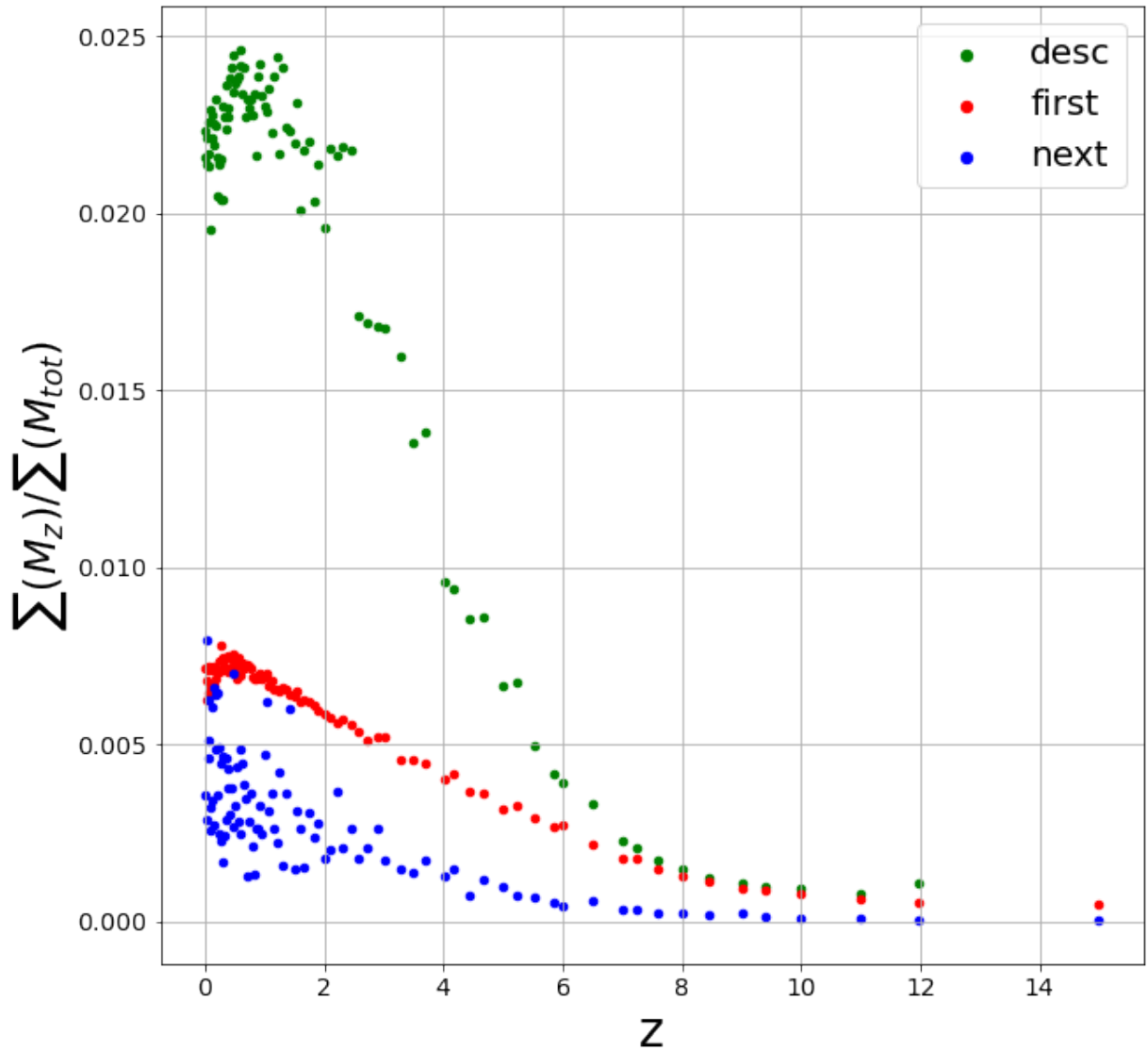


5.2. ábra. Ütköző galaxisok átlagos csillagkeletkezési rátája ($\langle SFR \rangle$) logaritmikus skálán a vöröseltolódás (z) függvényében. Az ütköző párok közül legalább az egyik $Z_* = 0.919Z_{\odot}$ fémtartalomnál kisebb értékkel rendelkezik. Az egyes pontok egy adott Snapshot galaxisainak csillagkeletkezési rátájának átlagát mutatják adott vöröseltolódás függvényében. Pirossal a kiválogatott FirstProgenitor galaxisok 'first' jelöléssel, kékkel az ezekhez tartozó NextProgenitor galaxisok 'next' jelöléssel, zölddel pedig a közös Descendant galaxisok 'desc' jelöléssel vannak feltüntetve. A Descendant galaxisok csillagkeletkezési rátája a teljes időszorra jelentősen nagyobb értékeket vesz fel, mint az előd galaxisoké és $z = 3$ -nál maximumot vesz fel a hozzájuk tartozó görbe. A csúcspont körül a FirstProgenitor galaxisokhoz képest 2 nagyságrend eltérés mutatkozik.

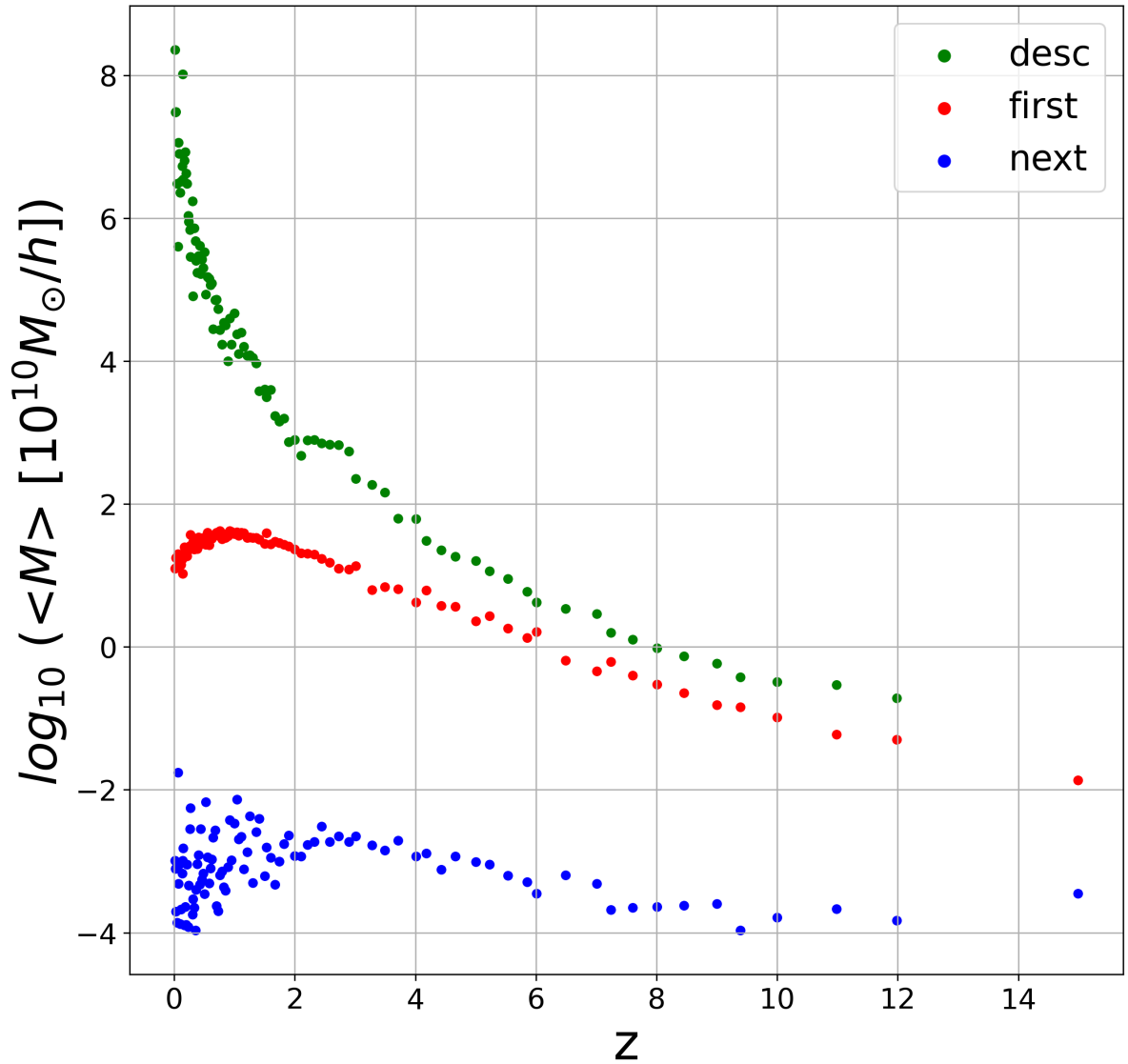
5.2. Átlagos fémtartalom és tömeg

A következő vizsgált paraméter az összeolvadó galaxisok átlagos fémtartalma, amelyet az 5.3 ábrán mutatok be a vöröseltolódás függvényében. Az alkalmazott szelekció következtében a FirstProgenitor galaxisok átlagos fémtartalma minden vöröseltolódás esetén 0.01 alatti értéket vesz fel. Definíciójukból adódóan a NextProgenitor galaxisok még fémszegényebbek az első előd galaxisokhoz képest. Az utód galaxisok minden vöröseltolódás esetén átlagosan fémdúsabbak, mint az előd galaxisok. A korai Univerzumban ($z > 6$) a fémtartalmak különbsége nem túl jelentős az előd és utód galaxisokat összehasonlítva, azonban $z < 6$ értéket követően a Descendant galaxisok fémtartalma kiugró növekedésbe kezd, míg a az előd galaxisoké kis mértékben növekszik. A legnagyobb eltérés $z \approx 1$ körül mutatkozik, ekkor az egyesült galaxisok fémtartalma körülbelül háromszorosa az őket létrehozó galaxisok fémtartalmának. Ez összefüggésben áll a csillagkeletkezési ráta megemelkedésével $z < 6$ esetén, hiszen hatására a csillagokban egyre több fém keletkezik. Összehasonlítva az összes galaxis átlagos fémtartalmával (5.1 ábra), alapvetően az egyesülő galaxisok átlagos fémtartalma követi a trendet, azonban $z \approx 1$ körül a merger galaxisok átlagos fémtartalma csökkenni kezd. Ez összefüggésben állhat azzal, hogy az SFR $z = 3$ -nál eléri a maximumát, majd csökkenő tendenciába kezd, ami a mai napig tart. A keletkezett leszármazott galaxisok fémtartalma azonban továbbra is viszonylag alacsony maradt, így az első keletkező csillagok szintén kevés fémmel rendelkeznek. Ezzel ideális környezetet biztosítanak a gammakitörések létrejöttéhez.

Az 5.4 ábrán a galaxisok átlagos tömege figyelhető meg a vöröseltolódás függvényében, logaritmikus skálán. A galaxisok tömege vöröseltolódás csökkenésével $z > 4$ esetén növekvő tendenciát mutat mindhárom esetben. Ezt követően az első előd és következő előd galaxisok átlagos tömege eléri a maximumát és csökkenni kezd, míg az utód galaxisoké nagyságrendeket emelkedik. A jelenkorban ($z = 0$) a Descendant galaxisok átlagos tömege több, mint 6 nagyságrenddel meghaladja az előd galaxisok tömegátlagát. Figyelembe véve, hogy a FirstDescendant és NextProgenitor galaxisok tömege a két legnagyobb tömegmúltú galaxis az adott Descendant esetén, ezeknél csak kisebb tömegű galaxisok vehetnek részt az ütközésekben. Ha összeadjuk az első és második előd galaxisok átlagtömegeit, a leszármazott galaxisok továbbra is nagyságrendekkel nagyobb átlagtömeggel rendelkeznek. Ebből arra következtethetünk, hogy a Descendant galaxis múltjában rengeteg olyan ütközés ment végbe, amelyben alacsony tömegű törpegalaxisok vettek részt. Mivel a törpe galaxisok alacsony fémtartalommal rendelkeznek, és kis tömegű csillaganyagot tartalmaznak [37], ezek megfelelő környezetet biztosítanak a gammakitörések létrejöttéhez.



5.3. ábra. Ütköző galaxisok átlagos fémtartalma a vöröseltolódás (z) függvényében. $\Sigma(M_z)/\Sigma(M_{tot})$ a fémtartalom, ahol M_z a héliumnál nehezebb elemek tömegét jelöli, M_{tot} pedig az egyes galaxisok teljes tömege. Az ütköző párok közül legalább az egyik $Z_* = 0.919Z_\odot$ fémtartalomnál kisebb értékkel rendelkezik. Az egyes pontok egy adott Snapshot galaxisainak átlagos fémtartalmát mutatják adott vöröseltolódás függvényében. Pirossal a kiválogatott FirstProgenitor galaxisok 'first' jelöléssel, késsel az ezekhez tartozó NextProgenitor galaxisok 'next' jelöléssel, zölddel pedig a közös Descendant galaxisok 'desc' jelöléssel vannak feltüntetve. A Descendant galaxisok fémtartalma $z < 6$ esetén meredekebb növekedésbe kezd, míg a First- és NextProgenitorok értéke követi a korábbi tendenciát. A keletkezett leszármazott galaxisok fémtartalma azonban továbbra is viszonylag alacsony maradt, így az első keletkező csillagok szintén kevés fémmel rendelkeznek. Ezzel ideális környezetet biztosítanak a gammakitörések létrejöttéhez.



5.4. ábra. Ütköző galaxisok átlagos tömege ($\langle M \rangle$) a vöröseltolódás (z) függvényében. Az ütköző párok közül legalább az egyik $Z_* = 0.919Z_\odot$ fémtartalomnál kisebb értékkel rendelkezik. Az egyes pontok egy adott Snapshot galaxisainak tömegátlagát mutatják adott vöröseltolódás függvényében. Pirossal a kiválogatott FirstProgenitor galaxisok 'first' jelöléssel, kékkal az ezekhez tartozó NextProgenitor galaxisok 'next' jelöléssel, zölddel pedig a közös Descendant galaxisok 'desc' jelöléssel vannak feltüntetve. A FirstProgenitorok és NextProgenitorok tömegeinek összege nagyságrendekkel elmarad a Descendant galaxisokéhoz képest, amelyből arra következtethetünk, hogy rengeteg törpegalaxis ütközés ment végbe, kifejezetten $z < 4$ -et követően, hiszen a az első és második előd galaxis a két legnagyobb tömegmúltú a mintában.

6. fejezet

Diszkusszió

6.1. Kapott eredmények

Dolgozatomban az Illustris TNG100-1 SubLink Merger Tree adatait vizsgáltam meg annak érdekében, hogy potenciális LGRB anyagaxis-mintát állítsak össze. Korábban Chisari és mtsai [6] készítették a Millenium szimuláció segítségével LGRB anyagaxis mintát, kapott eredményeket az elméleti bevezetőben fejtettem ki. Az adatok feldolgozásához Python programnyelvű kódot készítettem, amely segítségével az Illustrisban szereplő galaxisok közül ki tudom válogatni a számomra megfelelő paraméterrel rendelkezőket. Emellett az ütközéstörténeti fa esetén az adott Subhalo valamint a hozzá tartozó Descendant és NextProgenitor Subhalok paramétereit egyszerre tudom kiválasztani és feldolgozni. Az LGRB anyagaxisok jellemző paraméterei a magas csillagkeletkezési ráta és alacsony fémtartalom. Van der Heuvel és mtsai. [71] modellükben fiatal csillaghalmazokban összeolvadás során keletkező LGRB-ket vizsgáltak. Modellük segítségével többek között a fémtartalom függvényében különböző forgatókönyveket vázoltak fel LGRB-k keletkezésére. Mivel galaxisok kölcsönhatása során a csillagkeletkezési ráta megnő, így azokat a kölcsönható galaxisokat tanulmányozva, amelyek alacsony fémtartalommal rendelkeznek, lehetőségünk adódik az LGRB-k keletkezéséhez kedvező paraméterekkel rendelkező galaxisok kiválogatására.

Munkám során először a TNG100-1 Subhalo-i (galaxisai) közül kiválogattam azokat, amelyek alacsony fémtartalommal rendelkeznek. Ehhez megvizsgáltam az Univerzum átlagos fémtartalmának fejlődését. A kapott eredményekből megállapítható, hogy a galaxisok átlagos tömegsúlyozott fémtartalma az Univerzum fejlődésével növekszik, továbbá a reionizáció korszaka idején ($z \approx 5-6$) gyorsuló növekedés vette kezdetét, majd $z < 4$ után a fémtartalom hozzávetőlegesen lineáris emelkedést mutat a vöröseltolódás függvényében. Az alacsony fémtartalom felső korlátját a $z = 2$ -nél megállapított átlagos fémtartalommal számítottam ki amelyre $Z_* = 0.919Z_\odot$ értéket kaptam.

Az ütköző galaxisok tulajdonságai közül először a csillagkeletkezési rátát elemeztem. Az ütközések hatására a galaxisok átlagos csillagkeletkezési rátája jól látható emelkedést mutat. A vizsgált Subhalo-hoz képest a leszármazott galaxisok logaritmikus skálán 1-2 nagyságrenddel magasabb

értékekkel rendelkeznek. A görbe a vöröseltolódás függvényében kissé eltérő alakot mutat attól, mintha az Univerzum galaxisainak teljes átlagát vizsgálnánk, ($z = 3$) környéki maximum figyelhető meg a FirstProgenitor és a Descendant galaxisok esetén, szemben a $z \approx 2-3$ körüli csúccsal [20]. A NextProgenitorok nem követik ezt a mintát a jelen adatsor alapján, de ez adódhat a kis méretű minta jellegéből is, fontos lenne további mintákat is megvizsgálni megfelelő következtetések levonásához.

Az Illustris TNG100-1 szimulációban kölcsönható galaxisok csillagkeletkezési rátájának vizsgálatával David R. Patton és mtsai. [51] arra jutottak, hogy a nagy tömegű galaxisok esetén a csillagkeletkezési ráta sűrűség 14.5%-kal megnő. Maan H. Hani és mtsai. [19] egyesült galaxisok vizsgálatával arra következtettek, hogy $0 \leq z \leq 1$ esetén a vizsgált minta SFR-je egy 2-es faktorial megnövekedett, a vöröseltolódás függvényében pedig nincs megfigyelhető fejlődés.

Az ütköző galaxisok átlagos fémtartalma a FirstProgenitor és NextProgenitor galaxisok esetén lassú emelkedést mutat, hasonlóan a teljes átlaghoz képest, azonban az utód galaxisok átlagos fémtartalma $z < 6$ után emelkedésnek indul, $z \approx 1$ -nél eléri a maximumát, ahol körülbelül háromszorosa a FirstProgenitor Subhalo-k fémtartalmához képest.

A galaxisok tömegét tekintve pedig, míg az első előd galaxisok 4 nagyságrendet emelkednek $z = 1$ -ig majd értékük elkezd csökkenni, addig a Descendant Subhalo-k tömege $z < 4$ után jelentős méreken emelkedik, 4-6 nagyságrenddel meghaladva a FirstProgenitorok értékét. A NextProgenitorok esetén a galaxisok átlagos tömege a teljes idősort tekintve 2 nagyságrenden belül marad, jóval a többi vizsgált galaxis értéke alatt. A nagyságrendi különbségeket és a galaxisok tömegét figyelembe véve arra következtethetünk, hogy a Descendant galaxisok kölcsönhatásba kerülnek alacsony tömegű törpe galaxisokkal, melyek nemcsak kis fémtartalommal, hanem kevés csillaganyaggal rendelkeznek, így megfelelő környezetet biztosítanak a GRB-k kialakulásának.

Eredményeimet összefoglalva: az ütköző galaxisok jó forrásai lehetnek az LGRB anyaggalaxisok mintáinak, mert az ütközés hatására jól látszik a csillagkeletkezési ráta megnövekedése, és legalább az egyik ütközésben részt vevő galaxis alacsony fémtartalma, ezért lehet olyan lokális régió, ami kedvez az LGRB-k kialakulásának. Az ütköző galaxisok csillagkeletkezési rátája $z = 3$ -nál maximumot mutat, amely egybeesik a GRB-k keletkezési rátájának $z = 3$ -nál mért maximumával [16]. Ennek következtében felmerül a kérdés, hogy az ütköző galaxisok tipikus példái lennének-e az LGRB anyaggalaxisoknak.

6.2. Elemzés módosítása

Jelen eredményeimet a Merger Tree legelső, 0. sorszámú adathalmazából nyertem ki, annak köszönhetően, hogy a listában szereplő SubhaloID szerencsés módon megegyező értékkel rendelkezik, mint a listában szereplő adatok indexe. Más sorszámú adathalmazok esetén is megpróbáltam hasonló vizsgálatot készíteni, azonban sikertelenül, ezért felvettem a kapcsolatot az IllustrisTNG készítőivel. Tanácsukra a következőkben módosítani fogom a galaxisok megkeresését, és köz-

vetlenül a SubhaloID-k alapján fogom azonosítani a számomra megfelelő galaxisok különböző paramétereit.

6.3. További vizsgálatok

A pontosabb eredmények érdekében a továbbiakban a Merger Tree mind a 20 adathalmazát tervezem megvizsgálni, majd összevetem ezeket az eredményeket egymással. Mivel az adatfeldolgozás során egy közelítéssel éltem, ennek eredményeképpen a Descendant és NextProgenitor galaxisok vöröseltolódásai a FirstProgenitor galaxisokhoz képest lettek ábrázolva, így az adatoknál kisebb eltérések fordulhatnak elő. Ennek korrigálása mindenképpen fontos feladat a későbbiekben.

Ha sikerült egy potenciális LGRB anyaggalaxis mintát összeállítani, össze kell vetni megfigyelésekből kapott mintákkal, hogy az alkalmazott módszer megfelelőségét meg lehessen határozni.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Rácz Istvánnak azért, hogy a gammakitörések elméleti összefoglalójához doktori értekezését megosztotta velem, valamint az IllustrisTNG projekt munkatársainak akik hozzájárulása nélkül nem készülehetett volna el a dolgozatom. Külön köszönettel tartozom Dylan Nelsonnak, aki segítséget nyújtott a merger tree adatstruktúrájának megértésében.

Irodalom

- [1] Blumenthal, Kelly A és Barnes, Joshua E. “Go with the Flow: Understanding inflow mechanisms in galaxy collisions”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 479.3 (2018. jún.), 3952–3965. old. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/sty1605. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/479/3/3952/25169966/sty1605.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1605>.
- [2] Bridge, C. R. és tsai. “The Role of Galaxy Interactions and Mergers in Star Formation at $z \leq 1.3$: Mid-Infrared Properties in the Spitzer First Look Survey”. *ApJ* 659.2 (2007. ápr.), 931–940. old. DOI: 10.1086/512029. arXiv: astro-ph/0701040 [astro-ph].
- [3] Burrows, A. és Vartanyan, D. “Core-collapse supernova explosion theory”. *Nature* 589.7840 (2021. jan.), 29–39. old. DOI: 10.1038/s41586-020-03059-w. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03059-w>.
- [4] Calura, F. és Matteucci, F. “Cosmic metal production and the mean metallicity of the Universe”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 350.1 (2004. máj.), 351–364. old. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2004.07648.x. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/350/1/351/3095989/350-1-351.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07648.x>.
- [5] Campisi, M. A. és tsai. “Properties of long gamma-ray burst host galaxies in cosmological simulations”. *MNRAS* 400.3 (2009. dec.), 1613–1624. old. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2009.15568.x. arXiv: 0908.2427 [astro-ph.CO].
- [6] Chisari, N. E., Tissera, P. B. és Pellizza, L. J. “Host galaxies of long gamma-ray bursts in the Millennium Simulation”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 408.1 (2010. okt.), 647–656. old. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.17169.x. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/408/1/647/3635184/mnras0408-0647.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17169.x>.
- [7] Cibinel, A. és tsai. “Early- and late-stage mergers among main sequence and starburst galaxies at $0.2 \leq z \leq 2$ ”. *MNRAS* 485.4 (2019. jún.), 5631–5651. old. DOI: 10.1093/mnras/stz690. arXiv: 1809.00715 [astro-ph.GA].

-
- [8] Cutri, R. M. és McAlary, C. W. “A statistical study of the relationship between galaxy interactions and nuclear activity.” *ApJ* 296 (1985. szept.), 90–105. old. DOI: 10.1086/163422.
- [9] Cserepes László, Petrovay Kristóf. *Kozmikus Fizika*. Egyetemi jegyzet, Második kiadás. Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar, 2002.
- [10] Dahari, O. “The Nuclear Activity of Interacting Galaxies”. *ApJS* 57 (1985. ápr.), 643. old. DOI: 10.1086/191021.
- [11] Ellison, Sara L. és tsai. “Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey - IV. Interactions trigger active galactic nuclei”. *MNRAS* 418.3 (2011. dec.), 2043–2053. old. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.19624.x. arXiv: 1108.2711 [astro-ph.CO].
- [12] Ellison, Sara L. és tsai. “GALAXY PAIRS IN THE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY. I. STAR FORMATION, ACTIVE GALACTIC NUCLEUS FRACTION, AND THE LUMINOSITY/MASS-METALLICITY RELATION”. *The Astronomical Journal* 135.5 (2008. ápr.), 1877. old. DOI: 10.1088/0004-6256/135/5/1877. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/135/5/1877>.
- [13] Fan, X. L., Yin, J. és Matteucci, F. “The nature of long-GRB host galaxies from chemical abundances”. *Astronomy and Astrophysics* 521 (2010. okt.), A73. DOI: 10.1051/0004-6361/201015293. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015293>.
- [14] Gehrels, N., Ramirez-Ruiz, E. és Fox, D.B. “Gamma-Ray Bursts in the iSwift/i Era”. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 47.1 (2009. szept.), 567–617. old. DOI: 10.1146/annurev.astro.46.060407.145147. URL: <https://doi.org/10.1146/2Fannurev.astro.46.060407.145147>.
- [15] Genel, Shy és tsai. “Introducing the Illustris project: the evolution of galaxy populations across cosmic time”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 445.1 (2014. szept.), 175–200. old. DOI: 10.1093/mnras/stu1654. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stu1654>.
- [16] Ghirlanda, Giancarlo és Salvaterra, Ruben. “The Cosmic History of Long Gamma-Ray Bursts”. *The Astrophysical Journal* 932.1 (2022. jún.), 10. old. DOI: 10.3847/1538-4357/ac6e43. URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac6e43>.
- [17] Grogin, Norman A. és tsai. “CANDELS: THE COSMIC ASSEMBLY NEAR-INFRARED DEEP EXTRAGALACTIC LEGACY SURVEY”. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 197.2 (2011. dec.), 35. old. DOI: 10.1088/0067-0049/197/2/35. URL: <https://doi.org/10.1088/0067-0049/197/2/35>.

-
- [18] Hakkila, Jon és tsai. “How Sample Completeness Affects Gamma-Ray Burst Classification”. *The Astrophysical Journal* 582.1 (2003. jan.), 320–329. old. DOI: 10.1086/344568. URL: <https://doi.org/10.1086/344568>.
- [19] Hani, Maan H. és tsai. “Interacting galaxies in the IllustrisTNG simulations - II: star formation in the post-merger stage”. *MNRAS* 493.3 (2020. ápr.), 3716–3731. old. DOI: 10.1093/mnras/staa459. arXiv: 2001.04472 [astro-ph.GA].
- [20] Hopkins, Andrew M. és Beacom, John F. “On the Normalization of the Cosmic Star Formation History”. *The Astrophysical Journal* 651.1 (2006. nov.), 142–154. old. DOI: 10.1086/506610. URL: <https://doi.org/10.1086/506610>.
- [21] Horváth, I. “A Third Class of Gamma-Ray Bursts?”. *ApJ* 508.2 (1998. dec.), 757–759. old. DOI: 10.1086/306416. arXiv: astro-ph/9803077 [astro-ph].
- [22] István, Rácz. *Gammakitörések és kozmikus környezetük*. Doktori értekezés. Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar, 2020.
- [23] Joseph, R. D. és Wright, G. S. “Recent star formation in interacting galaxies - II. Super starbursts in merging galaxies.” *MNRAS* 214 (1985. máj.), 87–95. old. DOI: 10.1093/mnras/214.2.87.
- [24] Katz, Neal. “Dissipational Galaxy Formation. II. Effects of Star Formation”. *ApJ* 391 (1992. jún.), 502. old. DOI: 10.1086/171366.
- [25] Kauffmann, G., White, S. D. M. és Guiderdoni, B. “The formation and evolution of galaxies within merging dark matter haloes”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 264.1 (1993. szept.), 201–218. old. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/264.1.201. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/264/1/201/3734439/mnras264-0201.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/264.1.201>.
- [26] Kennicutt Robert C., Jr. és tsai. “The Effects of Interactions on Spiral Galaxies. II. Disk Star Formation Rates”. *AJ* 93 (1987. máj.), 1011. old. DOI: 10.1086/114384.
- [27] Kewley, Lisa J., Geller, Margaret J. és Barton, Elizabeth J. “Metallicity and Nuclear Star Formation in Nearby Galaxy Pairs: Evidence for Tidally Induced Gas Flows”. *AJ* 131.4 (2006. ápr.), 2004–2017. old. DOI: 10.1086/500295. arXiv: astro-ph/0511119 [astro-ph].
- [28] Kinman, T. D. és Davidson, K. “Spectroscopic observations of 10 emission-line dwarf galaxies.” *ApJ* 243 (1981. jan.), 127–139. old. DOI: 10.1086/158575.
- [29] Klebesadel, Ray W., Strong, Ian B. és Olson, Roy A. “Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin”. *ApJL* 182 (1973. jún.), L85. old. DOI: 10.1086/181225.

-
- [30] Koekemoer, Anton M. és tsai. “CANDELS: THE COSMIC ASSEMBLY NEAR-INFRARED DEEP EXTRAGALACTIC LEGACY SURVEY—THE iHUBBLE SPACE TELESCOPE/i OBSERVATIONS, IMAGING DATA PRODUCTS, AND MOSAICS”. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 197.2 (2011. dec.), 36. old. DOI: 10.1088/0067-0049/197/2/36. URL: <https://doi.org/10.1088/0067-0049/197/2/36>.
- [31] Kouveliotou, Chryssa és tsai. “Identification of Two Classes of Gamma-Ray Bursts”. *ApJL* 413 (1993. aug.), L101. old. DOI: 10.1086/186969.
- [32] Kumar, Pawan és Zhang, Bing. “The physics of gamma-ray bursts & relativistic jets”. 561 (2015. febr.), 1–109. old. DOI: 10.1016/j.physrep.2014.09.008. arXiv: 1410.0679 [astro-ph.HE].
- [33] Lequeux, J. és tsai. “Chemical Composition and Evolution of Irregular and Blue Compact Galaxies”. *A&A* 80 (1979. dec.), 155. old.
- [34] Luo, Wentao, Yang, Xiaohu és Zhang, Youcai. “Connections between Galaxy Mergers and Starburst: Evidence from the Local Universe”. *ApJL* 789.1, L16 (2014. júl.), L16. old. DOI: 10.1088/2041-8205/789/1/L16. arXiv: 1406.5315 [astro-ph.GA].
- [35] Lü, Hou-Jun és tsai. “A NEW CLASSIFICATION METHOD FOR GAMMA-RAY BURSTS”. *The Astrophysical Journal* 725.2 (2010. dec.), 1965–1970. old. DOI: 10.1088/0004-637x/725/2/1965. URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637x/725/2/1965>.
- [36] MacFadyen, A. I. és Woosley, S. E. “Collapsars: Gamma-Ray Bursts and Explosions in “Failed Supernovae””. *The Astrophysical Journal* 524.1 (1999. okt.), 262. old. DOI: 10.1086/307790. URL: <https://dx.doi.org/10.1086/307790>.
- [37] Madden, Suzanne C. és Cormier, Diane. “Dwarf Galaxies: Their Low Metallicity Interstellar Medium”. *Proceedings of the International Astronomical Union* 14.S344 (2018. aug.), 240–254. old. DOI: 10.1017/s1743921318007147. URL: <https://doi.org/10.1017/2Fs1743921318007147>.
- [38] Marinacci, Federico és tsai. “First results from the IllustrisTNG simulations: radio haloes and magnetic fields”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (2018. aug.). DOI: 10.1093/mnras/sty2206. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2206>.
- [39] Martin, Crystal L. “Mapping Large-Scale Gaseous Outflows in Ultraluminous Galaxies with Keck II ESI Spectra: Variations in Outflow Velocity with Galactic Mass”. *ApJ* 621.1 (2005. márc.), 227–245. old. DOI: 10.1086/427277. arXiv: astro-ph/0410247 [astro-ph].
- [40] Meegan, Charles A. és tsai. “The Third BATSE Gamma-Ray Burst Catalog”. *ApJS* 106 (1996. szept.), 65. old. DOI: 10.1086/192329.

-
- [41] Moreno, Jorge és tsai. “Interacting galaxies on FIRE-2: the connection between enhanced star formation and interstellar gas content”. *MNRAS* 485.1 (2019. máj.), 1320–1338. old. DOI: 10.1093/mnras/stz417. arXiv: 1902.02305 [astro-ph.GA].
 - [42] Mukherjee, Soma és tsai. “Three Types of Gamma-Ray Bursts”. *The Astrophysical Journal* 508.1 (1998. nov.), 314–327. old. DOI: 10.1086/306386. URL: <https://doi.org/10.1086/306386>.
 - [43] Naiman, Jill P és tsai. “First results from the IllustrisTNG simulations: a tale of two elements – chemical evolution of magnesium and europium”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 477.1 (2018. márc.), 1206–1224. old. DOI: 10.1093/mnras/sty618. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/sty618>.
 - [44] Narayan, Ramesh, Paczynski, Bohdan és Piran, Tsvi. “Gamma-Ray Bursts as the Death Throes of Massive Binary Stars”. *ApJL* 395 (1992. aug.), L83. old. DOI: 10.1086/186493. arXiv: astro-ph/9204001 [astro-ph].
 - [45] Navarro, J. F. és White, S. D. M. “Simulations of Dissipative Galaxy Formation in Hierarchically Clustering Universes - Part One - Tests of the Code”. *MNRAS* 265 (1993. nov.), 271. old. DOI: 10.1093/mnras/265.2.271.
 - [46] Nelson, Dylan és tsai. “First results from the IllustrisTNG simulations: the galaxy colour bimodality”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 475.1 (2017. nov.), 624–647. old. DOI: 10.1093/mnras/stx3040. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stx3040>.
 - [47] P. A. R. Ade, and és tsai. “iPlanck/i2013 results. XVI. Cosmological parameters”. *Astronomy & Astrophysics* 571 (2014. okt.), A16. DOI: 10.1051/0004-6361/201321591. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321591>.
 - [48] Paciesas, William S. és tsai. “THE FERMI GBM GAMMA-RAY BURST CATALOG: THE FIRST TWO YEARS”. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 199.1 (2012. márc.), 18. old. DOI: 10.1088/0067-0049/199/1/18. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/199/1/18>.
 - [49] Pakmor, Rüdiger, Marinacci, Federico és Springel, Volker. “MAGNETIC FIELDS IN COSMOLOGICAL SIMULATIONS OF DISK GALAXIES”. *The Astrophysical Journal* 783.1 (2014. febr.), L20. old. DOI: 10.1088/2041-8205/783/1/120. URL: <https://doi.org/10.1088/2041-8205/783/1/120>.
 - [50] Palmerio, J. T. és tsai. “Are long gamma-ray bursts biased tracers of star formation? Clues from the host galaxies of the Swift/BAT6 complete sample of bright LGRBs. III. Stellar masses, star formation rates, and metallicities at $z > 1$ ”. *A&A* 623, A26 (2019. márc.), A26. DOI: 10.1051/0004-6361/201834179. arXiv: 1901.02457 [astro-ph.HE].

-
- [51] Patton, David R. és tsai. “Interacting galaxies in the IllustrisTNG simulations - I: Triggered star formation in a cosmological context”. *MNRAS* 494.4 (2020. jún.), 4969–4985. old. DOI: 10.1093/mnras/staa913. arXiv: 2003.00289 [astro-ph.GA].
- [52] Perley, D. A. és tsai. “THE SWIFT GRB HOST GALAXY LEGACY SURVEY. II. REST-FRAME NEAR-IR LUMINOSITY DISTRIBUTION AND EVIDENCE FOR A NEAR-SOLAR METALLICITY THRESHOLD”. *The Astrophysical Journal* 817.1 (2016. jan.), 8. old. DOI: 10.3847/0004-637X/817/1/8. URL: <https://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/817/1/8>.
- [53] Petkova, Margarita és Springel, Volker. “Simulations of galaxy formation with radiative transfer: hydrogen reionization and radiative feedback”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (2010. dec.), no–no. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.17955.x. URL: <https://doi.org/10.1111%2Fj.1365-2966.2010.17955.x>.
- [54] Pillepich, Annalisa és tsai. “First results from the IllustrisTNG simulations: the stellar mass content of groups and clusters of galaxies”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 475.1 (2017. dec.), 648–675. old. DOI: 10.1093/mnras/stx3112. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stx3112>.
- [55] Rich, J. A., Kewley, L. J. és Dopita, M. A. “Galaxy Mergers Drive Shocks: An Integral Field Study of GOALS Galaxies”. *ApJS* 221.2, 28 (2015. dec.), 28. old. DOI: 10.1088/0067-0049/221/2/28. arXiv: 1509.08468 [astro-ph.GA].
- [56] Rodriguez-Gomez, Vicente és tsai. “The merger rate of galaxies in the Illustris simulation: a comparison with observations and semi-empirical models”. *MNRAS* 449.1 (2015. máj.), 49–64. old. DOI: 10.1093/mnras/stv264. arXiv: 1502.01339 [astro-ph.GA].
- [57] Roy, Arpita. “Progenitors of Long-Duration Gamma-ray Bursts”. *Galaxies* 9.4 (2021. okt.), 79. old. DOI: 10.3390/galaxies9040079. URL: <https://doi.org/10.33902Fgalaxies9040079>.
- [58] Rubin, V. C., Ford W. K., Jr. és Whitmore, B. C. “Luminosity-dependent line ratios in disks of spiral galaxies.” *ApJL* 281 (1984. jún.), L21–L24. old. DOI: 10.1086/184276.
- [59] Rupke, David S., Veilleux, Sylvain és Sanders, D. B. “Outflows in Active Galactic Nucleus/Starburst-Composite Ultraluminous Infrared Galaxies1”. *ApJ* 632.2 (2005. okt.), 751–780. old. DOI: 10.1086/444451. arXiv: astro-ph/0507037 [astro-ph].
- [60] Rupke, David S., Veilleux, Sylvain és Sanders, D. B. “Outflows in Infrared-Luminous Starbursts at $z < 0.5$. II. Analysis and Discussion”. *ApJS* 160.1 (2005. szept.), 115–148. old. DOI: 10.1086/432889. arXiv: astro-ph/0506611 [astro-ph].

-
- [61] Saleem, M és tsai. “Exploring short-GRB afterglow parameter space for observations in coincidence with gravitational waves”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 474.4 (2017. dec.), 5340–5350. old. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/stx3104. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/474/4/5340/23259363/stx3104.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stx3104>.
- [62] Scudder, Jillian M., Ellison, Sara L. és Mendel, J. Trevor. “The dependence of galaxy group star formation rates and metallicities on large-scale environment”. *MNRAS* 423.3 (2012. júl.), 2690–2704. old. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21080.x. arXiv: 1204.2828 [astro-ph.CO].
- [63] Sijacki, Debora és tsai. “The Illustris simulation: the evolving population of black holes across cosmic time”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 452.1 (2015. júl.), 575–596. old. DOI: 10.1093/mnras/stv1340. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stv1340>.
- [64] Springel, V. és tsai. “The Aquarius Project: the subhaloes of galactic haloes”. *MNRAS* 391.4 (2008. dec.), 1685–1711. old. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.14066.x. arXiv: 0809.0898 [astro-ph].
- [65] Springel, Volker. “iE pur si muove: iGalilean-invariant cosmological hydrodynamical simulations on a moving mesh”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 401.2 (2010. jan.), 791–851. old. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2009.15715.x. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15715.x>.
- [66] Springel, Volker, Di Matteo, Tiziana és Hernquist, Lars. “Modelling feedback from stars and black holes in galaxy mergers”. *MNRAS* 361.3 (2005. aug.), 776–794. old. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2005.09238.x. arXiv: astro-ph/0411108 [astro-ph].
- [67] Springel, Volker és tsai. “First results from the IllustrisTNG simulations: matter and galaxy clustering”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 475.1 (2017. dec.), 676–698. old. DOI: 10.1093/mnras/stx3304. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stx3304>.
- [68] Springel, Volker és tsai. “Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars”. *Nature* 435.7042 (2005. jún.), 629–636. old. DOI: 10.1038/nature03597. arXiv: astro-ph/0504097 [astro-ph].
- [69] Strickland, David K. és Heckman, Timothy M. “Supernova Feedback Efficiency and Mass Loading in the Starburst and Galactic Superwind Exemplar M82”. *ApJ* 697.2 (2009. jún.), 2030–2056. old. DOI: 10.1088/0004-637X/697/2/2030. arXiv: 0903.4175 [astro-ph.CO].

-
- [70] Tagliaferri, G. és tsai. “An unexpectedly rapid decline in the X-ray afterglow emission of long γ -ray bursts”. *Nature* 436.7053 (2005. aug.), 985–988. old. DOI: 10.1038/nature03934. arXiv: astro-ph/0506355 [astro-ph].
- [71] van den Heuvel, E. P. J. és Portegies Zwart, S. F. “Are Superluminous Supernovae and Long GRBs the Products of Dynamical Processes in Young Dense Star Clusters?”. *ApJ* 779.2, 114 (2013. dec.), 114. old. DOI: 10.1088/0004-637X/779/2/114. arXiv: 1303.6961 [astro-ph.HE].
- [72] Veilleux, S. és tsai. “Fast Molecular Outflows in Luminous Galaxy Mergers: Evidence for Quasar Feedback from Herschel”. *ApJ* 776.1, 27 (2013. okt.), 27. old. DOI: 10.1088/0004-637X/776/1/27. arXiv: 1308.3139 [astro-ph.CO].
- [73] Vergani, S. D. és tsai. “Are long gamma-ray bursts biased tracers of star formation? Clues from the host galaxies of the Swift/BAT6 complete sample of LGRBs . I. Stellar mass at $z < 1$ ”. *A&A* 581, A102 (2015. szept.), A102. DOI: 10.1051/0004-6361/201425013. arXiv: 1409.7064 [astro-ph.HE].
- [74] Virgili, F. J. és tsai. “GRB 091024A and the nature of ultra-long gamma-ray bursts”. (2013). DOI: 10.48550/ARXIV.1310.0313. URL: <https://arxiv.org/abs/1310.0313>.
- [75] Vogelsberger, M. és tsai. “Properties of galaxies reproduced by a hydrodynamic simulation”. *Nature* 509.7499 (2014. máj.), 177–182. old. DOI: 10.1038/nature13316. URL: <https://doi.org/10.1038/nature13316>.
- [76] Vogelsberger, Mark és tsai. “A model for cosmological simulations of galaxy formation physics”. *MNRAS* 436.4 (2013. dec.), 3031–3067. old. DOI: 10.1093/mnras/stt1789. arXiv: 1305.2913 [astro-ph.CO].
- [77] Vogelsberger, Mark és tsai. “Introducing the Illustris Project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the Universe”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 444.2 (2014. aug.), 1518–1547. old. DOI: 10.1093/mnras/stu1536. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stu1536>.
- [78] White, Simon D. M. és Frenk, Carlos S. “Galaxy Formation through Hierarchical Clustering”. *ApJ* 379 (1991. szept.), 52. old. DOI: 10.1086/170483.
- [79] Wiersma, Robert P. C. és tsai. “Chemical enrichment in cosmological, smoothed particle hydrodynamics simulations”. *MNRAS* 399.2 (2009. okt.), 574–600. old. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2009.15331.x. arXiv: 0902.1535 [astro-ph.CO].
- [80] Woo, Jong-Hak, Son, Donghoon és Bae, Hyun-Jin. “Delayed or No Feedback? Gas Outflows in Type 2 AGNs. III.” *ApJ* 839.2, 120 (2017. ápr.), 120. old. DOI: 10.3847/1538-4357/aa6894. arXiv: 1702.06681 [astro-ph.GA].
- [81] Woosley, S. E. “Gamma-Ray Bursts from Stellar Mass Accretion Disks around Black Holes”. *ApJ* 405 (1993. márc.), 273. old. DOI: 10.1086/172359.

- [82] Yonetoku, D. és tsai. “Gamma-Ray Burst Formation Rate Inferred from the Spectral Peak Energy–Peak Luminosity Relation”. *The Astrophysical Journal* 609.2 (2004. júl.), 935–951. old. DOI: 10.1086/421285. URL: <https://doi.org/10.1086/421285>.
- [83] York, Donald G. és tsai. “The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary”. *The Astronomical Journal* 120.3 (2000. szept.), 1579–1587. old. DOI: 10.1086/301513. URL: <https://doi.org/10.1086/301513>.
- [84] Zhang, Bin-Bin és tsai. “CURVATURE EFFECT OF A NON-POWER-LAW SPECTRUM AND SPECTRAL EVOLUTION OF GRB X-RAY TAILS”. *The Astrophysical Journal* 690.1 (2008. dec.), L10–L13. old. DOI: 10.1088/0004-637x/690/1/L10. URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637x/690/1/L10>.
- [85] Zhang, Bing és Meszaros, Peter. “An Analysis of Gamma-Ray Burst Spectral Break Models”. *The Astrophysical Journal* 581.2 (2002. dec.), 1236–1247. old. DOI: 10.1086/344338. URL: <https://doi.org/10.1086/344338>.