

Galaksi Evrim Modelleri: Phantom of RAMSES (PoR) Evrim Kodu

İnci AKKAYA ORALHAN¹ 

¹Erciyes Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Kayseri, Türkiye

ORCID: İ.A.O. 0000-0003-1787-7418

ÖZ

Galaksi evrim teorilerinin amacı galaksilerin bu karmaşık yapılarının basit fizik ile nasıl açıklanabileceğini göstermektir. Bu yüzden galaksiler, iyi tanımlanmış teorik modellerin hassas bir şekilde testlerini yapmak için uygun gözlemsel alanlardır. Modern galaksi oluşum teorileri, soğuk karanlık maddeyi içerisine alan hiyerarşik modelleri temel alır. Fakat bu modeller birçok gözlemsel gerçekleri açıklayamamaktadır. MOND, galaksilerin gözlemlenen özelliklerini açıklamak için Newton yasalarının modifiye edilmesini öneren bir teori olup karanlık madde olmadan olayları açıklayabilmektedir. MOND sistemine dayalı bir simülasyon kodu olan *PoR*, özellikle yıldız oluşumlarının hidrodinamiğinin ve fiziğinin anlaşılmasında, Poisson denklemlerini de içine alan bir koddur. Bu kod ile galaksi sistemleri (izole veya çift) herhangi bir dış gazın etkisiyle ivmelenmeye veya *karanlık maddeye ihtiyaç duymadan* modellenmiştir. Mevcut astronomik verilerden yola çıkılarak geline sonu, egzotik karanlık madde diye bir şey yoktur. Bu sonuç hemen kabul edilebilir olmasa da gerçekler ile yüzleşmek gereklidir. Çünkü egzotik karanlık madde parçacıklarının varlığına dair ne doğrudan bir kanıt, ne de ardında yatan parçacık fiziğini açıklayan bir kanıt yoktur. Bu yüzden zayıf çekim alanının olduğu yerdeki olayları anlamak için yeni yaklaşımlar bulunmalıdır.

1. Giriş

Galaksi oluşumları fiziksel olarak gözlemleyemediğimiz bir olaydır. Bu yüzden galaksi içerisinde varsa küresel küme sistemlerini, halo yıldızlarını, bulge ve disk yıldızlarının şimdiki halini gözleyerek geçmişteki evrimi hakkında bilgi edinmeye çalışırız. Özellikle evrenin derinliklerine bakarak, geçmişte galaksilerin milyar yıl önceki evrimlerini inceleyebiliriz. Etrafımızdaki tüm galaksilerin ve kendi galaksimizin nereden geldiği sorusuna yanıt olarak iki “*Monolitik (Top-Down)*” ve “*Hiyerarşik (Bottom-Up)*” Model olarak iki karşıt teori karşımıza çıkmaktadır.

Monolitik (Top-Down) Çökme Modeli: Bu modelde, galaksiler erken evrende büyük bir gaz bulutunun çöküşü sonucu oluşmuşlardır. Model ilk olarak 1962’de (Eggen ve diğ., 1962) ortaya

Submitted/Başvuru: 27.09.2019 Accepted/Kabul: 31.01.2020

Corresponding author/Sorumlu yazar: İnci Akkaya Oralhan (Dr. Öğr. Üyesi), Erciyes Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Kayseri, Türkiye. E-mail: iakkaya@erciyes.edu.tr

Citation/Atıf: Akkaya Oralhan, İ. 2021, in: Galaksi Evrim Modelleri: Phantom of RAMSES (PoR) Evrim Kodu, eds. S. Ak & S. Bilir, *Galactic Astronomy Workshop Proceedings Book*, 139. <https://doi.org/10.26650/PB/PS01.2021.001.016>

atılmıştır. Bu modele göre, dev bir molekül bulut dengeye ulaşana kadar çökecektir. Bu noktada gravitasyonel çökme, galaksinin artan dönme hızından kaynaklı merkezkaç kuvvetine eşit olacaktır. Buna göre, galaksi çöküşü devam ederken ilk olarak halo yıldızları oluşmuştur. Bunun anlamı halo yıldızları ve küresel kümeler, tüm galaksi evrimleşirken aynı zamanda oluşmaya başlamıştır. Üstelik, tüm bu yapılar hemen hemen küresel olan dev bir buluttan oluşmuşlardır. Bulutun kendisi büzölmeye ve bir disk oluşturmaya başladığında, halihazırda çökmekte olan küresel küme sistemleri, çekim merkezi etrafında basık yörüngelerde kendi çekim etkisi altında dönmeye başlamıştır. Bu da küresel kümelerin şimdiki yörüngelerini açıklamaktadır. Galaksi çöküşü sırasında, küresel küme yıldızları kendi kinetik enerjilerini koruduklarından basık yörüngelerini korumuşlar ve ilk nesil yıldızları oluşturmuşlardır. Fakat ikinci nesil yıldızlar, içe doğru çökmüş ve çember bir yörüngede hareket eden gazdan oluşmuşlardır. Bu oluşum senaryosu oldukça basittir ancak artık yaygın olarak kabul görmemektedir.

Hiyerarşik (Bottom-Up) Model: Hiyerarşik Kümeleme olarak bilinen ve yaygın olarak kabul edilen bu model, Lambda-Soğuk DM Modelinin oluşturulmasına yol açmıştır. Model hemen hemen evrendeki tüm galaksilerin, Galaktik birleşmelerden oluştuğunu ve büyüdüğünü söylemektedir. Lambda-CDM modelinin ile galaksi rotasyon eğrilerini ve bazı garip galaksi birleşmelerini açıklamak için modele Soğuk DM (CDM) eklenmiştir. Model, büyük gaz bulutlarının çöküşü ile galaksi oluşumu yerine küresel küme boyutlarındaki küçük gaz gruplarının birleşimi sonucu galaksi ve galaksi gruplarının oluştuğunu öngörmektedir. Dolayısıyla gözlemlerin de gösterdiği gibi, model küçük galaksilerin neden büyüklerden sayıca daha çok olduğunu açıklamaktadır.

2. Standart Kozmoloji Modeli (*SMoC*)

Modern galaksi oluşum teorileri, soğuk DM içerisine alan hiyerarşik modelleri temel alır. Gözlemsel kanıtlar ve teorik beklentiler, galaksi oluşumunun devam etmekte olan bir süreç olduğunu göstermektedir. *SMoC*'a göre Evren, DM ($\Omega_c = 0.227 \pm 0.014$), karanlık enerji ($\Omega_\Lambda = 0.728 \pm 0.015$) ve baryonik madde ($\Omega_b = 0.0456 \pm 0.0016$) arasında paylaştığı bir resimdir (Komatsu ve diğ., 2011). Böyle bir kozmolojik modelde Evren 13.75 ± 0.11 Gyl önce oluşmaya başlamış ve muhtemelen ilk galaksiler $z \sim 20-50$ iken oluşmuştur (Gao ve diğ., 2007).

Evrendeki yapının oluşumu, kozmolojik olarak genişlemiş madde yoğunluğundaki dalgalanmalar ile başlar. Basıncı olmayan DM bileşeni çekimsel olarak etkileşime girer ve bu da çekimsel tedirginlikleri artırır. DM yoğunluk dalgalanmaları en sonunda DM halosunu oluşturur. Buna göre küçük yoğunluk dalgalanmaları ile ilk halolar oluşur. DM haloları yüksek yoğunluğa sahip bölgeler olarak karakterize edilir. Bu yüksek yoğunluklu bölgeler virialize olmuştur ve bir virial yarıçapı ile tanımlanır (Eke ve diğ., 1996). DM haloları üç eksenli şekillere ve dağılıma sahiptir. Baryonlar DM dağılımlarının öngördüğü gibi başlangıçta düzgün bir dağılıma sahiptir. Daha sonra baryonik madde, çekimsel olarak baskın DM'nin etkisi altında hareket eder.

2.1. Galaksi Etkileşimleri

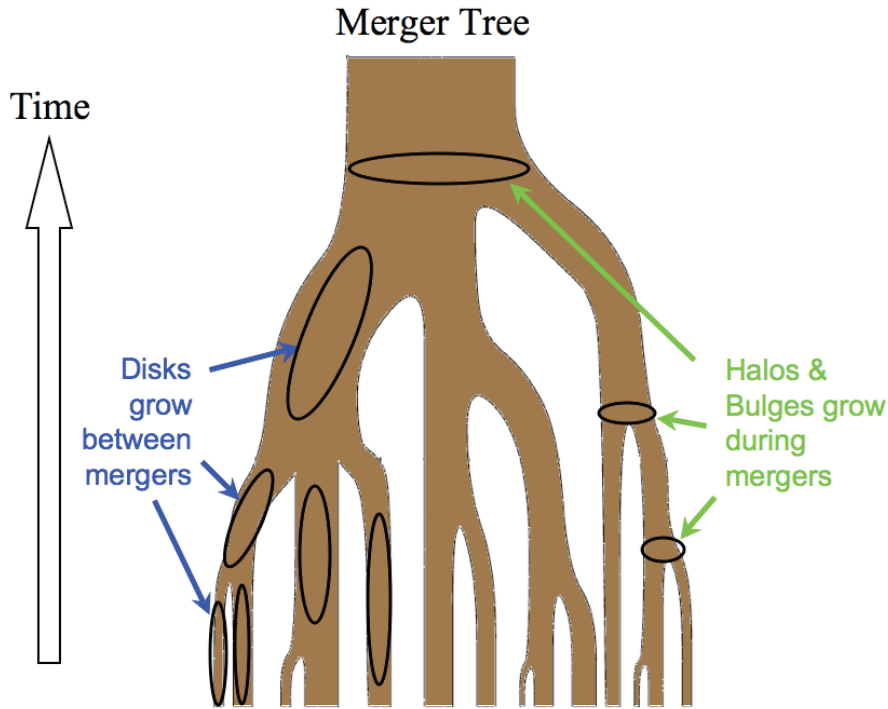
Soğuk DM'nin baskın olduğu evrende, hiyerarşik evrim modellerinin öngördüğü gibi daha küçük kütleli halolar birleşerek daha büyük kütleli haloları oluşturur (Şekil 1). Son yapılan N-cisim simülasyonları bu büyük halolar içerisinde çok sayıda alt-haloları barındırabileceğini göstermiştir. Öyle ki (Kuhlen ve diğ., 2008; Springel ve diğ., 2008) yüksek çözünürlüklü simülasyonlarla

300,000 alt-halo oluşturulmuştur. Bu alt-haloların her biri de uydu galaksi oluşumlarına katkı sağlamıştır. Bu alt-halolar ana galaksisine çekimsel olarak bağlı olup onun yörüngesinde hareket eder. Birleşen alt-halolar, ilk olarak ev sahibi galaksinin virial yarıçapına geçmeli ve yörünge hızları ev sahibi halonun yörünge parametrelerine yakın olmalıdır (Benson, 2005).

2.2. Galaktik Yapı Oluşumları

2.2.1. Disk Oluşumu

Diskler yaygın bir astrofiziksel olgudur ve tüm galaktik diskler kökenlerini aynı temel sürece borçludur. Çekimsel olarak çökmekte olan bir sistemde açısal momentumun korunumuna uygun olarak çökmeyen, dönmenin de etkisiyle aniden durması süreci disklerin oluşumunun temel özelliğidir. Bu nedenle Galaksi disklerinin fiziksel özelliklerini anlaşılması için, onların ilk oluştuğu gazın açısal momentumu ve çekimsel potansiyeli hakkında bilgi gerektirir. Standart kozmoloji modellerine göre, sonunda Galaksi bir disk oluşturacak olan gazın açısal momentumu, DM halosunun oluşumuyla benzer şekilde ortaya çıkar. Halonun baryonik bileşeninin açısal momentumunun büyüklüğü DM halosunun ölçekleriyle karşılaştırıldığında oldukça yakındır. Örneğin, van den Bosch ve diğ. (2002), DM halosu ve ışınım yapmayan gaz için buldukları spin parametreleri ve açısal momentum dağılımların çok benzer olduklarını bulmuşlardır.



Şekil 1. Hiyerarşik evrim modeline göre evrendeki büyük yapı oluşumları¹.

Galaksi disklerin oluşumuna katkı sağlayan farklı senaryolar vardır. Bunlar;

- (a) **Galaksi oluşumunun hiyerarşik doğası:** Buna göre küçük yıldız sistemleri henüz disk oluşmadan önce yığılma gösterir ve bu yığılma galaksinin diski ile aynı düzlemde olacak şekilde kalın disk yapısını oluşturabilir (Villalobos ve Helmi, 2008).

¹ http://people.virginia.edu/~dmw8f/astr5630/Topic02/Lecture_2_old.html

- (b) **Erken, kaotik gaz yığılması:** Biraz farklı bir senaryoya göre de, sayısal simülasyonlarda, kalın disk yıldızlarının bir kısmı, erken dönemlerde gaz sistemlerinin kaotik birleşmeleri sonucu oluşmuştur (Brook ve diğ., 2004).
- (c) **DM altyapısı:** Son yıllarda yapılan çalışmalar, nispeten ince galaksi disklerin hiyerarşik olarak oldukça güçlü bir yapıya sahip olan DM haloları içerisinde hayatta kalabileceğini göstermektedir. DM'yi oluşturan bu altyapılar ile olan etkileşimler galaksi diskinin kalınlaşmasına da katkı sağlamalıdır. Bu dinamik ısınmaya en büyük katkı bu altyapılar içerisinde en büyük kütleyle sahip olanlardan gelmelidir ve oldukça stokastik bir süreçtir. Öyle ki bu süreçler, DM haloları birleşmeleri, yörünge parametreleri ve kütleli altyapılara bağlıdır (Purcell ve diğ., 2009).
- (d) **Moleküler Bulutlar:** Büyük moleküler bulutlar, yakınından geçen yıldızları çekimsel olarak tedirgin edip yörüngelerini galaksi diskinin paralel olacak şekilde değiştirebilir. Bu da disk yapısının kalınlaşmasına neden olur (Lacey, 1984).
- (e) **Spiral kollar:** Spiral yoğunluk dalgalanmaları da yıldızların çekimsel olarak tedirgin olmasına neden olur. Fakat diskin kalınlaşmasına çok az katkıda bulunur (Minchev ve Quillen, 2006).

2.2.2. Bar/Küresel Yapı Oluşumları

Kalın Diskin Oluşumu: Diskteki bozulmaların varlığı, ona ait yapıları daha az dramatik fakat yine de önemli şekillerde etkileyebilir (Sellwood, 2013). Sayısal simülasyonlar, disk yıldızlarının önemli bir kesrinin diskteki karasızlıklardan etkilendiğini ve disk yıldızlarının daha büyük yarıçaplara göç ettiğini göstermektedir. Öyle ki, başlangıçta çember yörüngelerde hareket eden bir yıldız bu etki sonucu enerji ve açısal momentumundaki değişim ile birlikte çember yörüngesini korumak için daha büyük yarıçaplarda bir yörüngeye sahip olacaktır. Bu olay yıldız yoğunluğunun eksponansiyel olarak azaldığı ve tamamen galaksinin iç bölgelerinden göç etmiş yıldızlardan oluşan bir “**dış yıldız diskinin**” oluşumuna neden olabilir. Bu süreç aynı zamanda yaş ve metal bolluğu gradyentlerinin oluşumuna neden olur. Diskin dış kısımlarında metalce fakir fakat daha yaşlı yıldızların olmasının nedeni bu senaryo ile açıklanabilir.

Bulge Oluşumu: Galaktik küresellerin oluşumu iki ayrı yoldan oluşabilir.

Birincisi; galaksi birleşmeleri sırasında önceden var olan yıldız sistemlerinin tahribatıyla, hiyerarşik galaksi oluşumu nedeniyle bu tür küresel yapıların oluşumu: Çekimsel etkileşime sahip iki galaksi arasındaki bileşmelerde, iki galaksinin kütlesi de karşılaştırılabilir olduğunda, yapısal olarak çok önemli değişimlerin olması beklenir. Birleşme sonucu ortaya çıkan kalıntılar ise ana galaksilerin yapısından oldukça farklıdır. Eliptik galaksilerin daha önce var olan başka galaksilerin birleşmesi sonucu oluştuğu düşünülmektedir.

Bu senaryoya göre, çekimsel potansiyelde zaman içerisinde meydana gelen değişimlere bağlı olarak yıldızların yörünge enerjileri değişir ve rasgele yörünge enerji dağılımları meydana gelir. Bunun sonucu olarak da diskteki düzenli yörünge hareketleri düzensizleşir. Bu süreç tam olarak anlaşılmamış olmakla birlikte, sistemin entropisini en üst düzeye çıkaran bir denge hali arar.

Bu büyük birleşmelerin kalıntıları, küresel iken eliptik galaksiler gibi görünmezler. Öyle ki merkezi bölgeleri eliptik galaksilerle karşılaştırıldığında oldukça düşük yoğunluktadır. Bu durum gaz bakımından yeterince zengin galaksiler arasında etkileşimler ile yüksek yoğunluklu çekirdeklerin oluşumuna izin verir.

Galaksi birleşmeleri temelde birincil (kütleleri karşılaştırabilir galaksiler arasında) ve ikincil (galaksilerden biri diğerine göre daha küçük kütleli) olarak ikiye ayrılabilir. Sayısal simülasyonlar kütle oranları $M_2/M_1 \geq 0.25$ olan birleşmelerde, içeri giren galaksinin diskinde bozulmalar meydana gelir ve geride küresel bir kalıntı kalır. Daha düşük kütle oranına sahip olan birleşmelerde galaksi diskleri yerinde kalırken sadece biraz kalınlaşabilir (Bournaud ve diğ., 2005).

İkincisi; galaksi iç dinamikleri sonucu küresel yapıların oluşumu: Galaktik bulge'lar gözlemsel olarak ikiye ayrılır. Bunlar; "klasik bulge" lar: ışık dağılımları ve kinematikleri eliptik galaksilere benzerdir fakat bir disk içerisindedirler, "pseudo-bulge" lar eliptiklere benzemezler ve yüksek rotasyona sahip bar ve spiral yapı belirtileri gösterir.

Galaksilerdeki bazı iç dinamik süreçler soğuk ve nispeten kırılğan diskleri bozabilir. Özellikle, çubuklar (bar: bir disk olgusu) kütle ve açısal momentumun verimli bir şekilde yeniden dağıtılabılır, merkezi kütle yoğunluğunu artırabilir ve birleşmelerle oluşmuş bulge'ın daha da büyümesine neden olabilir. Oluşan bulge'ın büyük birleşmeler sonucu mu yoksa ikincil bir evrimin sonucu mu oluştuğunun anlaşılması için bulge görünümüne bakılmalıdır. Pseudo-bulge oluşumları ikincil evrim sonucu oluşmuş yapılarıdır (Kormendy ve Kennicutt, 2004).

Bu tür ikincil süreçler, oldukça genel dinamik süreçlerin sonucudur ve tüm galaksilerde görülür. Çünkü diskler bu tür bozucu etkilerin varlığında hemen yayılma eğilimi gösterirler. Öyle ki açısal momentum korunumundan sistemin enerjisinin azalmasına bağlı olarak, külesini iç kısımlara aktarırken momentumunu dışa doğru aktarır. Bozucu etkilerin önemli olup olmadığı ise olayın zaman sürecine bağlıdır. Bar kendiliğinden oluşmaya başlar başlamaz, açısal momentumunu diskin dışına doğru atmaya başlar ve genliğini artırır. Bara gaz akışı oldukça önemlidir. Gaz diske girerken ivme kazanır, çıkarken yavaşlar. Bu olay da aşağı yukarı bulge çizgisi boyunca gaz içerisinde bir şok etkisi yaratır. Bu şoklar yörünge enerjisinin bozulmasına ve dolayısıyla gaz girişine neden olur. Galaktik merkeze doğru gaz yoğunluğundaki bu artış yeni yıldız oluşumlarına ve pseudo-bulge oluşumuna neden olur. Bar en sonunda galaksi merkezinde kütle yoğunluğunun artışıyla birlikte kararsız bir hale gelir ve yok olur. Bu genel resim tartışılmaz gibi görünse de, ayrıntıların çoğu (örneğin, barların kırmızıya kayma evrimi, DM halosu ve diskin kozmolojik evrimi) halen tartışmaya açık konulardır.

2.3. Karadelik-Galaksi Evrimi İlişkisi

Son on yıldır, oldukça büyük galaksi örnekleri üzerinden galaksilerin merkezlerindeki süper kütleli karadeliklerin kütlelerin ölçümleri mümkün olmuştur. Karadelik kütlesi ile ev sahibi galaksi arasında güçlü korelasyonların görülmesi, galaksilerin oluşumlarıyla süperkütleli karadelikler arasındaki etkileşimin bir göstergesidir. Genel kabul büyük kütleli haloya sahip galaksilerde büyük kütleli bir karadelik oluşur ve galaksi evrimiyle bağlantılıdır (Benson ve diğ., 2003). Ayrıca, bu süper kütleli karadeliklerin oluşumunu anlamak dahi başlı başına ilginçtir ve bu karadeliklere ait aktif galaktik çekirdek çalışmaları ve çekim dalgalarının gözlemsel olarak tespit edilmesi, galaksi evrimlerine büyük katkılar sağlamaktadır.

Süper kütleli bir karadelik oluşumu yığılma veya birleşme ile olur ve bu karadelikler oluşmadan öncesinde mutlaka var olan (çok büyük kütleli olmayan) bir karadelik olmalıdır. Muhtemelen, bu karadelikler yüksek kırmızıya kaymalarda doğmuş, evrimi sona ermiş ilk nesil POPIII yıldızlarının kalıntılarıdır.

Karadeliğe birkaç yolla gaz akışı sağlanabilir. Bunlardan ilki galaksinin erken dönemlerinde çekimsel olarak kararsız olan diskten bar oluşumu ve buradan merkeze doğru gaz akışı sağlanırken, daha geç zamanlarda galaksi-galaksi birleşmeleriyle merkezi bölgede gaz akışına yol açabilir. Galaksilerin merkezlerine gaz akışı sağlayan başka bir mekanizma ise galaksi halosundan gelen ılık bulutların zaman zaman galaksi merkezini etkilediği ve 10^4 - $10^6 M_{\odot}$ kadar küte aktarımı sağladığı düşünülmektedir (McKernan ve diğ., 2010). Bu mekanizmalarla karadelik etrafında yığılan gaz içerisinde bazı noktalarda gazın açıl momentumu önemli hale gelecek ve yığılan gaz, bir disk oluşturacaktır. Oluşan yığılma diski geometrik olarak ince ve radyatif olabileceği gibi kalın ve radyatif olarak da etkin olmayabilir (Narayan ve Yi, 1994).

2.4. DM Halosunun Galaksi Evrimine Etkisi

Yapılan çalışmalar göstermektedir ki tüm DM halolarında yıldız oluşumu %100 etkin bir şekilde meydana gelmemektedir. Bunun için gözlemsel bazı kanıtlar da vardır. Fakat bunlardan ikisi son derece önemlidir:

- 1) Yıldızlardaki toplam kütle yoğunluğu $\Omega_{\star} = (2.3 \pm 0.34) \times 10^{-3}$ (Cole ve diğ., 2001) iken, evrendeki toplam baryonik kütle yoğunluğu $\Omega_b = (0.0462 \pm 0.0015)$ (Dunkley ve diğ., 2009) olarak bulunmuştur. Bu nedenle, *tüm baryonların sadece küçük bir kısmı yıldızlara dönüşebilmektedir.*
- 2) Galaksi parlaklıklarının dağılımı (ışınma gücü fonksiyonu tarafından tanımlandığı gibi) DM halolarının kütle dağılımlarından oldukça farklıdır. Oysaki eğer tüm halolardaki baryonlar eşit bir şekilde dağılmış ve bu baryonik maddenin yıldızlara dönüştüğünü düşünürsek, bu iki oranın birbirine eşit olması gerekirdi.

2.5. SMOc Tahminleri ve Yetersiz Kaldığı Noktalar

SMoC tahminleri:

1. Tüm Samanyolu (MW) büyüklüğündeki galaksiler DM halosunun virial yarıçapı içerisinde DM bakımından baskın yüzlerce uydu galaksiye sahiptir (Tip A cüceleri). Buradaki DM soğuk veya ılık olmalıdır. Çünkü sıcak DM galaksi-ölçekli yapıların oluşumuna izin vermez.
2. Tip A cüceleri farklı oluşumlarından dolayı ana galaksi halosunun DM parçacık dağılımına göre, ana galaksi etrafında küresel bir şekilde dağılmışlardır. Galaksiler birbiriyle etkileşirken atılan madde ile TDG (Tidal Dwarf Galaxies) oluşur. Burada DM'nin etkisi yoktur.
3. MW-büyüklüğündeki galaksilerin önemli bir kısmı daha önce başka galaksilerle de etkileştikleri için çevresinde TDG'lerde bulunur (Tip B cüce galaksileri). Tip B galaksileri çok fazla miktarda DM içermemektedir.
4. Enerji ve açıl momentum korunumundan dolayı, tip B cüceleri ana galaksinin faz-uzay yapısına bağlı olarak dağılmışlardır. Tip B cücelerinin sayıları dE galaksi sayıları ile karşılaştırılabilir düzeydedir.

SMoC yetersiz kaldığı önemli birkaç nokta:

SMoC modellerine göre ana galaksinin halo dağılımına bağlı olarak bu galaksi etrafında oluşabilecek cüce galaksiler de alt halo guruplarından oluşmalıdır. Ama baktığımızda eğer

DM'den oluşan bu kadar (yüzlerce veya binlerce) galaksi varsa neden şu ana kadar 24 uydu galaksi keşfedilebilmiştir. Bu ortaya kayıp uydu problemini çıkarmaktadır ve model bu problemi açıklayamamaktadır.

SMoC modeline göre tüm büyük yapılar, küçük altyapılardan oluşmuşlardır. Bu teoreme göre Tip A ve B cüce galaksileri aynı zamanda oluşmuşlardır. Oysaki herhangi gerçekçi bir model bu varsayımdan uzaktır. Çünkü büyük ölçekli galaksiler büyük patlama sonrası gazın soğuması sonucu oluşmuşlardır ve küçük ölçekli cüce galaksiler de galaksilerarası etkileşim veya büyük kütleli galaksilerin altyapı oluşumları sonucu oluşmuşlardır. Öyle ki Tip B galaksileri de kozmolojik başlangıcın daha geç zamanlarında oluşmuş galaksilerdir.

SMoC modellerine göre soğuk DM galaksi oluşumlarında önemli rol oynamasına rağmen, Tip A ve Tip B galaksilerinin oluşumlarının ve DM yapılarının birbirinden tamamen farklı olması modelin yetersiz kaldığı noktalardan sadece birkaç tanesidir.

3. Phantom of RAMSES (*PoR*) Evrim Kodu:

3.1. Milgrom Dinamiği: Modifiye Edilmiş Newton Dinamiği (MOND)

MOND, galaksilerin gözlemlenen özelliklerini açıklamak için Newton yasalarının değiştirilmesini öneren bir teoridir. Gökadaların neden şu anda anlaşılan fizik yasalarına uymadıklarını açıklamak açısından DM teorisine bir alternatif olarak 1983'te İsraili fizikçi Mordehai Milgrom tarafından yayınlanan bir teoridir (Milgrom, 1983). Astrofizikçilerin çoğunluğu evrendeki olayları açıklamada DM varlığına dayalı modelleri desteklese de MOND, aksine, aktif olarak sadece bir avuç araştırmacı tarafından çalışılmaktadır. Bu teorinin ortaya çıkmasının ana nedeni, Newton'un mekaniğine göre galaksi dönme eğrilerinin beklenenden neden daha büyük olduğunu açıklamaktır. Gerçekten de MOND sadece baryonların dağılımına bakarak galaksilerin çekimsel potansiyel enerjilerinin tahmininde çok başarılıdır. Bu model ayrıca oldukça büyük kütle ve ölçek aralıklarında tek tek galaksilerin genel ölçeklerini ve detaylı dönme eğrilerini hesaplayabilmektedir.

Newton yasaları yüksek ivmeli ortamlarda (Güneş Sistemi ve Dünya'da) kapsamlı bir şekilde test edilmiş olmasına rağmen, galaksilerin dış kısımlarındaki yıldızlar gibi son derece düşük ivmeli cisimler için doğrulanmamıştır. Bunun için Milgrom, bir cismin gerçek ivmesini, Newton mekaniğinin temeline dayandırarak yeni bir çekim yasası ile tanımlamıştır. Bu yasa,

$$F_N = m\mu\left(\frac{a}{a_0}\right) a$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada a_0 sabit bir ivmelenme ve $\mu(a/a_0)$ interpolasyon fonksiyonudur. Bu fonksiyon interpole edilirse ($a \ll a_0$ için);

$$\mu\left(\frac{a}{a_0}\right) = \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{a}{a_0}\right)^2}} \text{ ve } F_N = m \frac{a^2}{a_0} \text{ şeklinde modifiye çekim elde edilir. Bu çekim ivmesi } M \text{ kütleli}$$

bir cisim etrafında dairesel yörüngede hareket eden m kütlelerine uygulanırsa;

$$\frac{GMm}{r^2} = m \frac{\left(\frac{v^2}{r}\right)}{a_0} \Rightarrow v^4 = GMa_0$$

olarak bulunur. Görüldüğü gibi yıldızın rotasyon hızı r 'den tamamen bağımsızdır. Bu da galaksi dönme eğrisinin neden düzleştiğini açıklar. Milgrom bunu rotasyon eğrileriyle fit ettiğinde $a_0 \approx 1.2 \times 10^{-10}$ m/sn² gibi sabit bir değer bulmuştur.

MOND baryonların dağılımına bakarak galaksilerin çekimsel potansiyel enerjilerinin tahmininde çok başarılıdır. Bu model ayrıca oldukça büyük kütle ve ölçek aralıklarında tek tek galaksilerin genel ölçeklerini ve detaylı dönme eğrilerini hesaplayabilmektedir. Model tamamen vakum ortamının kuantum mekaniksel özelliklerini kullanılır. Gözlemsel olarak elde edilen, baryonik Tully-Fisher ilişkisi (BTFR) ile de oldukça uyumludur.

3.2. *PoR* N-Body Kodu

MOND sistemine dayalı bir simülasyon kodu olan *PoR*, Milgrom çekiminin getirdiği soru işaretlerine cevap vermek için Bonn'da rektörlüğün verdiği küçük bir bütçeyle geliştirilmiştir (Lüghausen ve diğ., 2014). Bilimsel komiteler egzotik DM'nin araştırılması için *SMoC* modelini temel alacak şekilde birçok simülasyon geliştirmesine rağmen *SMoC* tabanlı hiçbir simülasyon gerçeği yansıtmamaktadır.

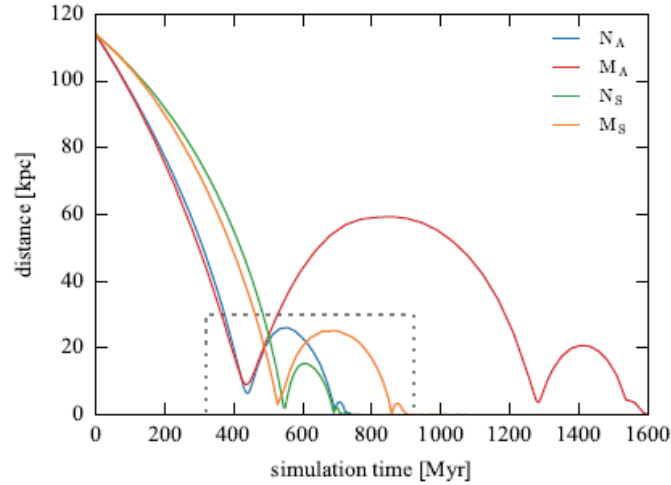
PoR, özellikle yıldız oluşumlarının hidrodinamiğinin ve fiziğinin anlaşılmasında, Poisson denklemlerini de içine alan bir koddur. Bu kod ile galaksi sistemleri (izole veya çift) herhangi bir dış gazın etkisiyle ivmelenmeye veya DM'ye ihtiyaç duymadan modellenmiştir. Modellemelerde, kozmik orjinli mor-ötesi ışınım, yıldız geri beslemesi ve atomik soğuma gibi etkilere de yer verilmiştir. Simülasyonlar oldukça geniş hacimlerde test edilmiştir (6 -400 kpc).

3.3. *PoR* ve *SMoC* Simülasyonlarının Karşılaştırılması

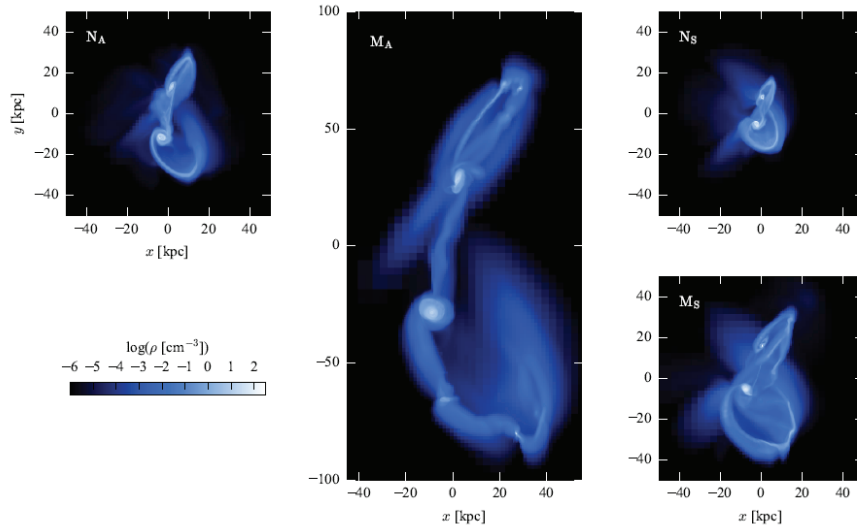
Bu iki simülasyon arasında temelde görülen fark DM nin birinde var diğerinde yok olduğudur fakat pratikte o kadar da basit değildir. Birincisi, Galaksi modelleri her zaman dengede olmalıdır. Baryonik bileşene ait hızlar yerel çekim potansiyeline göre ayarlanmalıdır. Kararlı bir galaksi simülasyonu yapmak için baryonların hız dispersiyonlarının ayarlanması son derece önemlidir. Çünkü farklı hızlar bizi farklı galaksilere götürebilir. Hız ilk olarak galaksinin dönme periyodunu değiştirecek ve bu da alt-yapıların (bar, spiral kollar) ve kısacası galaksi morfolojisinin değişmesine neden olacaktır. İkinci olarak grid tabanlı bu kodlarda *SMoC* sisteminde her bir hücre içerisinde hem baryonik hem de DM bulunmaktadır ve bu da parçacık sayısında bir belirsizliğe neden olmaktadır. Oysaki MOND, DM'yi hesaba katmadığından her bir hücredeki parçacık sayısı net olarak bilinmektedir. Dolayısı ile *SMoC* ve *PoR* simülasyonlarındaki çözünürlük çok farklıdır.

SMoC ve *PoR* modelleri arasındaki farklılıklar iki galaksinin ilk karşılaşmaları yaşanmadan hemen önceki birkaç Myıl'da artmaya başlar. *PoR* modellemelerinde DM halosunun bulunmamasından dolayı dinamik sürtünmedeki değişimler doğrudan yörünge enerjisini değiştirir ve yörüngesel açısal momentumdaki değişimlerin hepsi sadece baryonlara aktarılır ki bu da daha yavaş bir evrimleşmeye neden olur. Şekil 2, *SMoC* ve *PoR* modelleri için iki galaksi arasındaki uzaklıkların değişimini göstermektedir (Renaud ve diğ., 2016)

İki model arasında morfolojik yapı değişimi Şekil 3’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi MOND temelli modeller çekimsel kuyrukların daha genişlemesine neden olmuştur. Karşılaştırmalar gösteriyor ki *SMoC* modelleri TDG’lerin oluşum sürecini tam olarak açıklayamazken MOND dinamikleri başarılı olabilmektedir.



Şekil 2. $t=0$ 'da birbirlerinden 140 kpc uzaklıkta bulunan iki galaksinin aralarındaki uzaklığın *SMoC* ve *POR* modellerine göre değişimi (Renaud ve diğ., 2016).



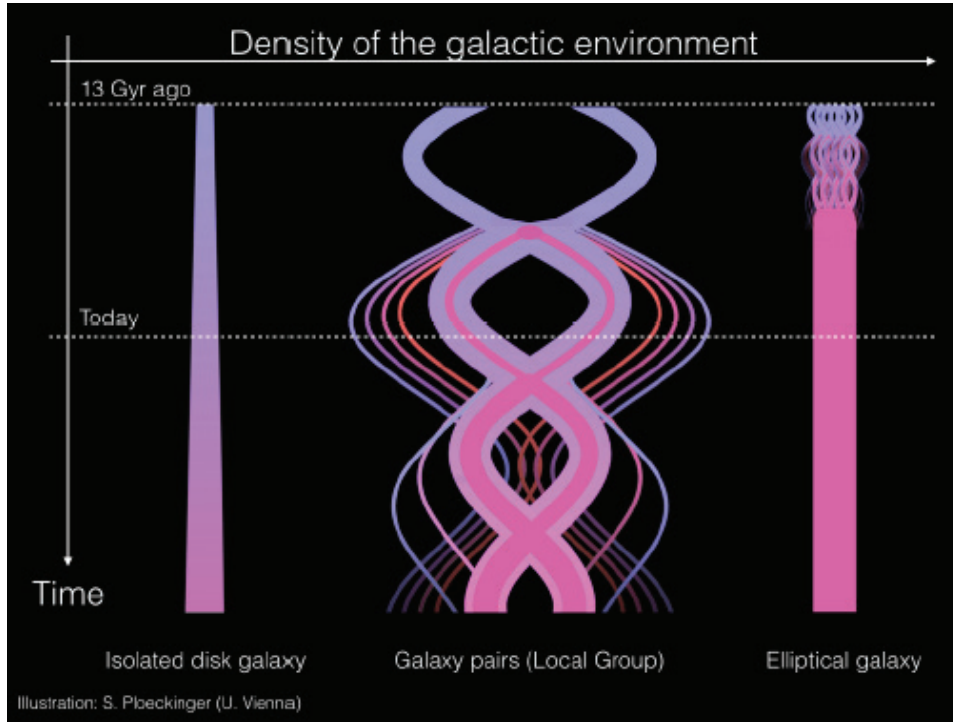
Şekil 3. *SMoC* ve *PoR* modellerine göre galaksilerin morfolojik değişimleri (Renaud ve diğ., 2016).

4. Tartışma ve Sonuç

Einstein alan denklemlerini temel alan teoremlerin doğru olduğunun varsayılarak galaksidede ve ötesindeki ivmelenmeye bakıldığında gözlenen hareketlerin beklenenden önemli miktarda saptığı gözlenmiştir. Bu durumun *SMoC* standart kozmolojik modeliyle açıklanan egzotik DM'nin varlığına dayanmaktadır. *SMoC* modeli halen kabul edilir olsa da gözlemler ve modeller arasında birçok uyumsuzluklar görülmektedir. Özellikle çift cüce galaksi teoreminin *SMoC*'a uygulanmasıyla birlikte bu teorem daha da geçersiz hale gelmeye başlamıştır. Çünkü gözlemlere göre ilkel cüce galaksiler (PDG) ve çekimsel cüce galaksiler (TDG) arasında

dinamik özellik bakımından hiçbir ayırım gözükmezken, *SMoC* modeline göre görülmelidir. Aynı zamanda MW ve Andromeda etrafındaki cüce galaksi dağılımları ile diğer eş dağılımlı olmayan cüce galaksi dağılımlarının incelenmesiyle bunların kuvvetle çekimsel cüce galaksiler olduğu düşünülmektedir. *SMoC*'un öngördüğü dinamik sürtünme için ne etkileşen galaksilerde ne de uydu galaksi hareketlerinde tutarlı bir kanıt bulunmamıştır. Mevcut astronomik verilerden yola çıkılarak gelinen sonuç, egzotik DM diye bir şey yoktur, bu sonuç hemen kabul edilebilir olmasa da gerçeklerle yüzleşmek gereklidir. Çünkü egzotik DM parçacıklarının varlığına dair ne doğrudan bir kanıt, ne de ardında yatan parçacık fiziğini açıklayan bir kanıt yoktur (Kroupa, 2012)

MOND dinamikleri yakın bir ev sahibi galaksinin çekimi altında kalan galaksiler üzerinde baryonik maddeyi içine alan *Tully Fisher* ilişkisi için doğru sonuçlar verirken, bu ilişkiyi DM ile açıklamaya çalışan *SMoC* modelinde yetersiz kalmaktadır. Çünkü DM halosunun dairesel hızı, baryonik olan galaksiyle uyumlu değildir. *SMoC* modellerinin öngördüğü, diskin kararlılığı için bir DM bileşenin varlığı ve bu bileşenin baryonik bileşenle bağlantılı olması, MOND dinamikleriyle açıklanamaz. *PoR* simülasyonuna göre geliştirilmiş galaksi evrimi Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Soğuk ve ılık DM olmadan galaksi evriminin temsili gösterimi.

Şekil 4'e göre baryonik kütlesi $M > 10^{10}M_{\odot}$ olan galaksilerin önemli bir kısmı bundan 6 Gyl önce geç-tipten galaksilerdi (yaklaşık %97'si) ve dinamik sürtünmenin olmamasından dolayı birleşme önemli bir rol oynamamaktaydı. Soldaki mavi parça büyüyen etkileşmeyen "ada-evren" galaksini temsil etmektedir. Bu galaksi eski yıldız popülasyonları oluşmaya başlamasıyla birlikte kızarmaya başlar. Bu galaksi klasik bir bulge'a sahip değildir ama eğer 11 Gyl önce diskte bir yıldız patlaması gerçekleştiyse kalın bir disk gözükebilirdi. Merkezdeki iki kol ise kozmik genişleme ile ayrışır ayrışmaz MW ve Andromeda galaksilerinin birbiri etrafındaki hareketiyle birlikte *Yerel Gurubu* temsil etmektedir. Her karşılaşmada yeni nesil çekimsel cüce

galaksiler ortaya çıkmaktadır. Bu cüce galaksiler günümüze sönük kırmızı cüce küresel galaksi ve çok sönük cüce galaksi olarak evrimleşmişlerdir. Her karşılaşma sonrasında, iki galaksinin bulge'ları daha da belirginleşir. İki ana galaksi soldaki izole galakside olduğu gibi zamanla kızarır. 11 Gyl önce MW ve Andromeda ilk kez karşılaştıklarında bu modele göre tek bir galaksi gibi görülmektedir. Galaksilerin çok az kısmı ise, evrenin ilk zamanlarında çok yoğun ortamlarda, hızlı etkileşimler ve gazın baskın olduğu birleşmelerle eliptik galaksiler olarak evrimleşmişlerdir. Sonrasında daha az pasif olarak evrimleşmişlerdir. Bu şekil, "Birleşme Ağacı"nın yerine geçmekte ve vakum ortamının fiziksel süreçlerinin etkin olarak kabul edildiği Milgrom dinamikleri kullanılabilir hale getirmektedir. Bu dinamik hem MW hem de Andromeda'nın uydu galaksilerinin gözlemsel iç özelliklerini iyi bir şekilde açıklayabilmektedir. Ayrıca bu Galaksilerin uydularının neden anizotropik olarak dağıldığını açıklayabilmektedir. Simetrik olmayan yapının oluşması, MW ve Andromeda'nın çok erken zamanlardaki karşılaşmalarının sonucu olabilir. Bu *SMoC*'a göre mümkün değildir, çünkü iki galaksi DM halosundan dolayı oluşan dinamik sürtünmeyle birleşmelidir.

Dolayısıyla eğer testlerde kullanılan veriler geçerliliğini korursa egzotik DM'nin var olmadığı düşüncesi kaçınılmaz gözükmektedir. Bu yüzden zayıf çekim alanının olduğu yerdeki olayları anlamak için yeni yaklaşımlar bulunmalıdır.

Kaynaklar

- Benson, A.J., Bower, R.G., Frenk, C.S., Lacey, C.G., Baugh, C.M., Cole, S., 2003, ApJ, 599, 38
Benson, A.J., 2005, MNRAS, 358, 551
Brook, C.B., Kawata, D., Gibson, B.K., Freeman, K.C., 2004, ApJ, 612, 894
Bournaud, F., Jog, C.J., Combes, F., 2005, A&A, 437, 69
Cole, S., Norberg, P., Baugh, C.M. ve diğ., 2001, MNRAS, 326, 255
Dunkley, J., Komatsu, E., Nolte, M.R. ve diğ., 2009, ApJS, 180, 306
Eggen, O. J., Lynden-Bell, D., Sandage, A.R., 1962, ApJ, 136, 748
Eke, V.R., Cole, S., Frenk, C.S., Navarro, J.F., 1996, MNRAS, 281, 703
Gao, L., Yoshida, N., Abel, T., Frenk, C.S., Jenkins, A., Springel, V., 2007, MNRAS, 378, 449
Komatsu, E., Smith, K.M., Dunkley, J. ve diğ., 2011, ApJS, 192, 18
Kormendy, J., Kennicutt, R.C., 2004, ARA&A, 42, 603
Kroupa, P., 2012, PASA, 29, 395
Kuhlen, M., Diemand, J., Madau, P., Zemp, M., 2008, Journal of Physics Conference Series, 125
Lacey, C.G., 1984, MNRAS, 208, 687
Lüghausen, F., Famaey, B., Kroupa, P., 2014, MNRAS, 441, 2497
McKernan, B., Maller, A., Ford, K.E.S., 2010, ApJL, 718, L83
Milgrom, M., 1983, ApJ, 270, 365
Minchev, I., Quillen, A.C., 2006, MNRAS, 368, 623
Narayan, R., Yi, I., 1994, ApJ, 428, L13
Purcell, C.W., Kazantzidis, S., Bullock, J.S., 2009, ApJ, 694, L98
Renaud, F., Famaey, B., Kroupa, P., 2016, MNRAS, 463, 3637
Sellwood, J.A., 2013, Planets, Stars and Stellar Systems Vol. 5, by Oswalt, Terry D.; Gilmore, Gerard, ISBN 978-94-007-5611-3. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013, 92
Springel, V., Wang, J., Vogelsberger, M. ve diğ., 2008, MNRAS, 391, 1685
van den Bosch, F.C., 2002, MNRAS, 331, 98
Villalobos, Á., Helmi, A., 2008, MNRAS, 391, 1806

