

# Çift Nötron Yıldız Birleşmelerinin Genel Görelilik Simülasyonu: Hızlı Kara Delik Oluşumu

Kutay Arınç Çokluk<sup>1</sup>  , Kadri Yakut<sup>1</sup> , Bruno Giacomazzo<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 35100, İzmir, Türkiye

<sup>2</sup> Università di Milano - Bicocca, Dipartimento di Fisica G. Occhialini, Piazza della Scienza 3, I-20126 Milano, Italia

Accepted: November 21, 2022. Revised: November 17, 2022. Received: November 6, 2022.

## Özet

Bu çalışmada açık kaynak kodlu Einstein Toolkit ve Lorene paket programları kullanılarak parçalı politropik hal denklemi ile tanımlanmış eş kütleli nötron yıldız çiftlerinin simülasyonları aracılığıyla sistemin başlangıç toplam kütlelerinin etkisi araştırılmıştır. Sistemlerin toplam baryonik kütleleri 3.2, 3.4, 3.6 ve 3.8  $M_{\odot}$  olarak ele alınmıştır. Birleşmenin öncesi ve sonrasını içeren gravitasyonel dalga formu elde edilmiş ve sistemlerin gravitasyonel dalga dedektörleri ile gözlenip gözlenemeyeceği tartışılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda tüm modellerimizin birleşme sonrasında 1 ms'den daha kısa bir süre içerisinde kara deliğe çöktüğü görülmüştür. Son olarak, sistemlere ilişkin simülasyonlar sonucunda elde edilen parametreler tartışılmıştır.

## Abstract

In this study, we investigate the impacts of the initial mass of the system on the equal mass binary neutron star defined piecewise polytropic EOS by using open source codes Einstein Toolkit and Lorene. We restrict ourselves to systems with total baryonic mass 3.2, 3.4, 3.6 and 3.8  $M_{\odot}$ . We extract gravitational waveform, which contains an inspiral and post-merger stage and discuss if gravitational wave detectors may observe our models. The results show all of our models collapse promptly into a BH before 1 ms. Finally, the parameters obtained as a result of the simulations are discussed.

**Anahtar Kelimeler:** Gravitational-wave astrophysics – binary neutron stars – numerical simulations – relativity and gravitation

## 1 Giriş

Nötron yıldızları evrende bilinen en yoğun cisimlerden biri olarak çok büyük yoğunluk değerlerinde maddenin nasıl davrandığını anlamamız için eşsiz birer laboratuarlardır. Genel olarak, nötron yıldızlarının iç ve dış katmanları hakkında bilgi sahibi olsak da iç çekirdekte hangi parçacıkların bulunduğu ve nasıl davranışlar sergiledikleri hala açık bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yoğunluğun nükleer yoğunluğun 2-3 katı olduğu iç çekirdekte ultra yoğun maddenin hal denklemini anlamlandırmak oldukça zorlu bir problemdir (Lattimer 2012).

Nötron yıldızının iç çekirdeğindeki yoğunluk esas olarak iki parametreye bağlıdır: bölgeye uygulanan çekim kuvveti ve bölgede bulunan parçacıkların bu kuvvete karşı uyguladıkları basınç. Süpernova patlamasından sonra madde merkeze çökerek nötron yıldızının son halini almasına olanak tanır. Merkezde toplanan madde, kritik bir değerden sonra daha fazla sıkıştırılmaz hale gelir ve çökmeye karşı bir direnç uygular. Merkezde bulunan parçacıkların uyguladığı bu dirençle birlikte çökme durur ve nötron yıldızının parametreleri belirlenir. Merkezde farklı parçacıkların varsayımıyla oluşturulan hal denklemleriyle belirli bir kütleyle karşılık gelen onlarca yarıçap değeri elde edilmektedir ve bu hal denklemleri içerisinde hangisinin verimli bir şekilde nötron yıldızının iç yapısını temsil ettiği henüz bilinmemektedir (Baiotti & Rezzolla 2017). Ancak, gözlemler ve nümerik simülasyonların çıktıkları birlikte değerlendirilerek problem hakkında fikir sahibi olunabilir.

\* kutay.arinc.cokluk@gmail.com

Gravitasyonel dalgalara ilişkin gözlemsel olarak tespit edilen ilk kaynak GW150917 olup bir çift kara delik birleşme süreci olarak tespit edilmiştir (Abbott ve diğ. 2016). 2015 yılında tespit edilen bu gözlemden sonra günümüzde 90'ı aşkın sıkı cisimlerin birleşme süreçlerine ilişkin sinyaller tespit edilmiştir (Abbott ve diğ. 2019, 2021; The LIGO Scientific Collaboration ve diğ. 2021). Her bir gözlemin ayrı ayrı önemi olmasına karşın GW170817 gözlemiyle birlikte astronomi alanında yeni bir çığır başlamıştır. GW170817 ile ilk kez hem gravitasyonel dalga sinyali (Abbott ve diğ. 2017a) hem de ona eşlik eden geniş elektro-manyetik tayft bölgesinde gözlemler yapılmıştır (örn: Abbott ve diğ. 2017b,c; Troja ve diğ. 2017). Böylece gözlemler farklı bilgi taşıyıcılarının aynı olayda bilgi sağlamları açısından çok önemli olup astronomi alanında yeni bir devir başlamıştır. İlk çift nötron yıldız birleşmesi gözleminde iki yıl sonra, GW190425 olarak adlandırılan ve sistemin toplam kütleleri  $3.4^{+0.3}_{-0.1} M_{\odot}$  olarak hesaplanan bir başka çift nötron yıldız birleşme sinyali tespit edilmiştir (Abbott ve diğ. 2020).

İlk relativistik çift nötron yıldız sistemi simülasyonundan (Shibata 1999; Shibata & Uryū 2000) bu yana çok sayıda başarılı nümerik relativistik simülasyonlar yapılarak nötron yıldız çift sistemlerinin birleşme süreçlerine ilişkin detaylar incelenmiştir. Farklı hal denklemleri, sistemin toplam başlangıç kütleleri ve bileşenlerin kütle oranları, manyetik alan, spin ve presesyon ve basık yörüngeler gibi parametrelerin birleşme öncesi, birleşme anı, birleşme sonrasında ve ardakalan merkezi cismin türüne ve yaşam süresine etkisi üzerine çalışmalar yapılmıştır (örn: Giacomazzo ve diğ. 2011; Tsatsin & Marronetti

**Çizelge 1.** Modellerin başlangıç verileri. İlk kolon modelin ismini temsil etmektedir örn. M32 sistemin toplam başlangıç baryonik kütlelerinin  $3.2 M_{\odot}$  olduğunu belirtmektedir.  $M_b^{1,2}$ , ve  $M^{1,2}$ , sırasıyla, sistemin bileşenlerinin baryonik ve gravitasyonel kütlelerini göstermektedir. Son üç kolon da sırasıyla sistemin başlangıçtaki toplam ADM kütlelerine, açısal momentumuna ve yörünge frekansına karşılık gelmektedir.

Model	$M_b^{1,2}$ ( $M_{\odot}$ )	$M^{1,2}$ ( $M_{\odot}$ )	$M_0$ ( $M_{\odot}$ )	$J_0$ ( $G M_{\odot}/c$ )	$f_0$ (Hz)
M32	1.60	1.37	2.85	7.83	339.64
M34	1.70	1.44	3.01	8.51	346.16
M36	1.80	1.51	3.16	9.33	352.37
M38	1.90	1.57	3.31	10.11	358.42

2013; Kiuchi ve diğ. 2014; Hotokezaka ve diğ. 2015; East ve diğ. 2016; Fujibayashi ve diğ. 2017; Dietrich ve diğ. 2017, 2018).

Çift nötron yıldız birleşmelerinin sonucunda oluşan merkezi cisim kararlı bir nötron yıldızı, kararsız yapıda büyük kütleli bir nötron yıldızının kendi üzerine çökmesiyle oluşan bir kara delik veya doğrudan ve aniden oluşan bir kara delik olabilmektedir. Birleşme sonrasında oluşan cisim belirleyen parametre her bir hal denklemi tarafından belirlenen,  $M_{\text{thres}}$ , eşik küyledir. Eğer sistemin toplam gravitasyonel kütleleri eşik kütlede büyükse,  $M > M_{\text{thres}}$ , sistemin birleşme sonrasında kara delik oluşturması beklenmektedir.

Bu çalışmada, birleşme sonrasında hızlı bir şekilde kara delik oluşturan sistemler üzerine simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve sistemlerin birleşme öncesi ve sonrası durumlarını inceleyerek, birleşme sonrasında oluşan kara deliğin parametreleri üzerine tartışılmıştır. §2’de sıkı cisimlerin simülasyonları için kuramsal altyapı hakkında bilgi verilmiştir. §3’te çalışmada yapılan simülasyonlar ve başlangıç koşulları üzerine bilgi verilmiştir. Son olarak, §4 ve §5’de simülasyonlardan elde edilen bulgular detaylı olarak verilmiş tartışılmıştır.

## 2 Formülasyon

Çift nötron yıldız sistemleri gibi sıkı cisimlerden oluşan dizgelerin birleşmeleri genel görelilik kapsamında tanımlanmaktadır (Einstein 1915, 1916, 1918). Gravitasyonel dalgalar, lineerleştirilmiş Einstein Alan Denklemlerinin bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Lineerleştirilmiş Einstein Alan Denklemi (Denklem 2), Minkowski uzay-zamanına ek olarak tanımlanan çok küçük bir tedirginliğin ( $h_{\mu\nu} \ll 1$ ) sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır.

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \quad (1)$$

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = \frac{-16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \quad (2)$$

Burada  $\bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}h$  ve  $\square$  sembolü d’Alembert operatörü olmak üzere  $\square = -\frac{1}{c^2}\partial_0^2 + \nabla^2$  olarak ifade edilir. Eğer kaynağın dışında, enerji-momentum tensörünün sıfır ( $T_{\mu\nu} = 0$ ) olduğu bölge için çözüm yapıldığında Denklem (3) ile verilen ifade elde edilir.

$$\bar{h}_{\mu\nu} = \text{Re}(A_{\mu\nu}e^{ik_{\alpha}x^{\alpha}}), \quad (3)$$

Bu sonuç, tedirginliğin uzay-zamanda düzlem dalga olarak davrandığı şeklinde yorumlanır. Burada  $A_{\mu\nu}$  dalganın genlik

ve polarizasyonunu ifade ederken,  $k_{\alpha}$  dalganın yayılma doğrultusunu ve frekansını içeren dalga vektörüdür.

Ancak, Einstein Alan Denkleminin sıkı cisimlerden oluşan sistemler için çözülebilmesi için 3+1 formülasyonu ile tanımlanmalıdır (Arnowitz ve diğ. 1959, 2008). Bu amaçla dört boyutlu (4D) Riemann tensörünün, üç boyutlu (3D) hiperyüzeyle düşürülerek Gauss (Denklem 4), Codazzi (Denklem 5) ve Ricci (Denklem 6) denklemleri elde edilir.

$$R_{abcd} + K_{ac}K_{bd} - K_{ad}K_{cb} = \gamma_a^p \gamma_b^q \gamma_c^r \gamma_d^s {}^{(4)}R_{pqrs}, \quad (4)$$

$$D_b K_{ac} - D_a K_{bc} = \gamma_a^p \gamma_b^q \gamma_c^r n^s {}^{(4)}R_{pqrs}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_n K_{ab} = n^d n^c \gamma_a^q \gamma_b^r {}^{(4)}R_{drca} \\ - \frac{1}{\alpha} D_a D_b \alpha - K_b^c K_{ac}, \end{aligned} \quad (6)$$

$${}^{(4)}R_{ab} - \frac{1}{2} {}^{(4)}R g_{ab} = 8\pi T_{ab}, \quad (7)$$

Bu üç denklemin (Denklem 4, 5, 6) Einstein Alan Denklemleriyle (Denklem 7) birlikte çözülmesi ile karşımıza çıkan sınırlayıcı (Denklem 8, 9) ve evrim (Denklem 10, 11) denklemleri genel görelilikteki alan denklemlerinin, nümerik görelilikteki karşılığı olarak tanımlanmaktadır.

$$R + K^2 - K^{ab}K_{ab} = 16\pi\rho, \quad (8)$$

$$D_b K_a^b - D_a K = 8\pi S_a, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_t K_{ab} = -D_a D_b \alpha \\ + \alpha(R_{ab} - 2K_{ac}K_b^c + K K_{ab}) \\ - 8\pi\alpha[S_{ab} - \frac{1}{2}\gamma_{ab}(S - \rho)] \\ + \mathcal{L}_{\beta} K_{ab}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathcal{L}_t \gamma_{ab} = -2\alpha K_{ab} + \mathcal{L}_{\beta} \gamma_{ab}, \quad (11)$$

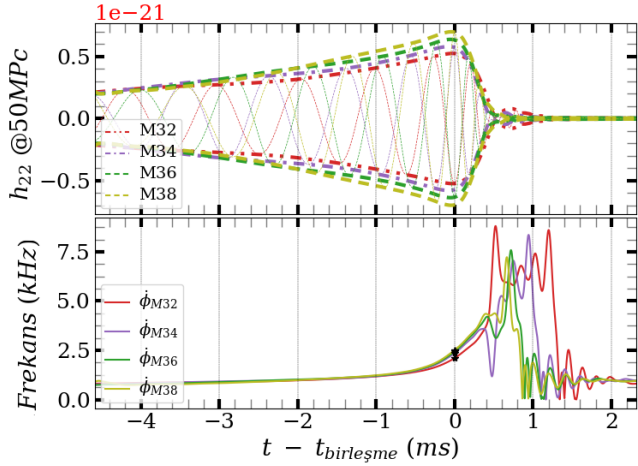
Bu dört denklemin her bir  $t$  zamanındaki çözümüyle kara delik ve/veya nötron yıldızlarından oluşan relativistik çift sistemlerinin evrimleştirilmesi mümkün kılınmaktadır. Kuramsal alt yapının detayları ve yapılan modeller ile ilgili detaylar Çokluk (2021)’de verilmiştir.

## 3 Nümerik varsayımlar ve Genel Görelilik simülasyonları

Bu çalışmada incelediğimiz çift sistemleri oluşturan nötron yıldızlarının başlangıç toplam baryonik kütleleri  $3.2\text{--}3.8 M_{\odot}$  aralığında alınmış ve bileşenlerin kütleleri de eşit kabul edilmiştir. Simülasyonlar için gerekli başlangıç veri setlerini açık kaynak kodlu LORENE (Gourgoulhon ve diğ. 2001) programı kullanılarak elde edilmiştir. Tüm modellerde, bileşenlerin kütle merkezlerinin birbirine uzaklıkları 40 km olacak şekilde oluşturulmuştur. Modellerin başlangıç parametreleri Çizelge 1’de özetlenmiştir.

Böylesi simülasyonlarda başlangıç verilerini oluştururken nötron yıldızlarının iç yapısının da tanımlanması gereklidir. Bu amaçla modellerimiz için (Douchin & Haensel 2001) çalışmasındaki parçalı-politropik SLy hal denklemini kullanılmıştır. Lorene için gerekli ve Parma Gravity Group tarafından sağlanan hal denklemi tablosu, (De Pietri ve diğ. 2016) çalışmasındaki Çizelge 1’de verilen değerler kullanılarak nötron yıldız iç yapısı tanımlanmıştır.

Yukarıda tanımlanan çift nötron yıldız sistemi modellerinin evrimleştirilmesi için Einstein Alan Denklemlerinin nümerik olarak çözülmesi gerekmektedir. Bunun için açık kaynak kodu Einstein Toolkit (Löffler ve diğ. 2012) yazılımının Mayer versiyonundan yararlanıldı. Uzay-zaman metriği Einstein alan



**Şekil 1.** Üst: Modellerinde kütle merkezinden 444 km uzaklıkta algılanan gravitasyonel dalga formunun baskın modu ( $l,m=2,2$ ). Alt: Anlık frekansın zamanla değişimi.

denkleminin BSSNOK formülasyonu (Nakamura ve diğ. 1987; Shibata & Nakamura 1995; Baumgarte & Shapiro 1998; Alcubierre ve diğ. 2000) evrimleştirilmiştir. Genel görelilik hidrodinamik denklemlerin çözümü için GRHydro kodu (Baiotti ve diğ. 2005; Hawke ve diğ. 2005; Mösta ve diğ. 2013) ve PPM (Colella & Woodward 1984) yeniden oluşturma yöntemi kullanılmıştır.

Grid yapısı için Carpet (Adaptive Mesh Refinement for the Cactus Framework) tarafından sağlanan uyarlanabilir ızgara iyileştirme yöntemi kullanılarak en iç grid yapısının iki nötron yıldızını da yörünge hareketi boyunca takip edecek şekilde ayarlanmıştır. Grid hiyerarşisi iç içe geçmiş altı ızgara yapıdan oluşmaktadır. Maksimum hesaplama yapılan grid yarıçapı 1514 km iken en içteki ızgara yapının çözünürlüğü  $\Delta x = 355$  m olarak düzenlenmiştir ancak birleşme sonrasında kara deliğin görünür ufku tespit edildiğinde  $\Delta x = 177$  m çözünürlüğünde ekstra bir grid daha eklenmektedir. Böylece kara delik ve etrafındaki disk yapının daha duyarlı hesaplamaları yapılabilmektedir.

#### 4 Sonuçlar

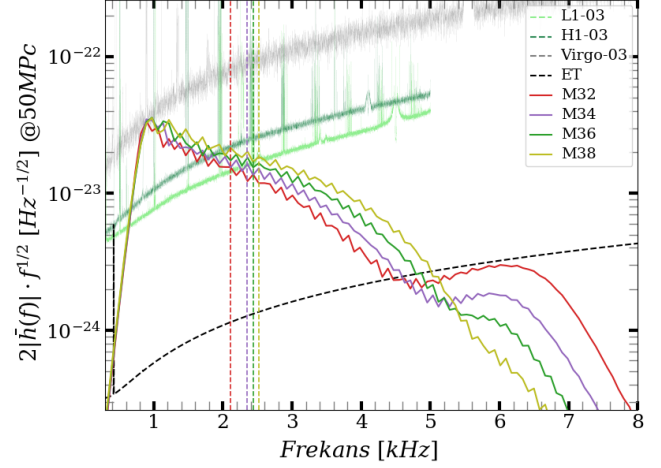
Ş2'de detayları verilen modellerin uzay-zaman evrimi sistemdeki nötron yıldızlarının birleşmesinden 6 ms, yaklaşık birleşmeden üç tam yörünge öncesinden başlatılmış ve birleşme gerçekleşikten 5 ms sonrasına kadar takip edilmiştir.

Simülayondan elde edilen gravitasyonel dalga sinyalinin sistemin kütle merkezinden 444 km uzakta elde edildiği varsayımı altında Newman-Penrose skaleri (Newman & Penrose 1962) ve gravitasyonel dalga formunun genlik polarizasyonları Denklem 12 ve 13 ile hesaplanmıştır:

$$\psi_4 = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \psi_4^{lm}(t, r) {}_{-2}Y_{lm}(\theta, \phi), \quad (12)$$

$$h_+^{lm}(r, t) - ih_x^{lm}(r, t) = \int_{-\infty}^t du \int_{-\infty}^u dv \psi_4^{lm}(r, v) \quad (13)$$

Sistemin anlık frekansı, gravitasyonel dalga formunun evresi  $\phi = \arctan(h_x / h_+)$  olmak üzere Denklem 14 ile verilen



**Şekil 2.** 50 Mpc uzaklıkta oluşan gravitasyonel dalga sinyalinin güç tayfı yoğunluğu ve Virgo (gri kesikli), aLIGO (yeşil ve açık yeşil kesikli) ve gelecekte yapılması planlanan Einstein Teleskobunun (siyah kesikli) duyarlılık eğrileri.

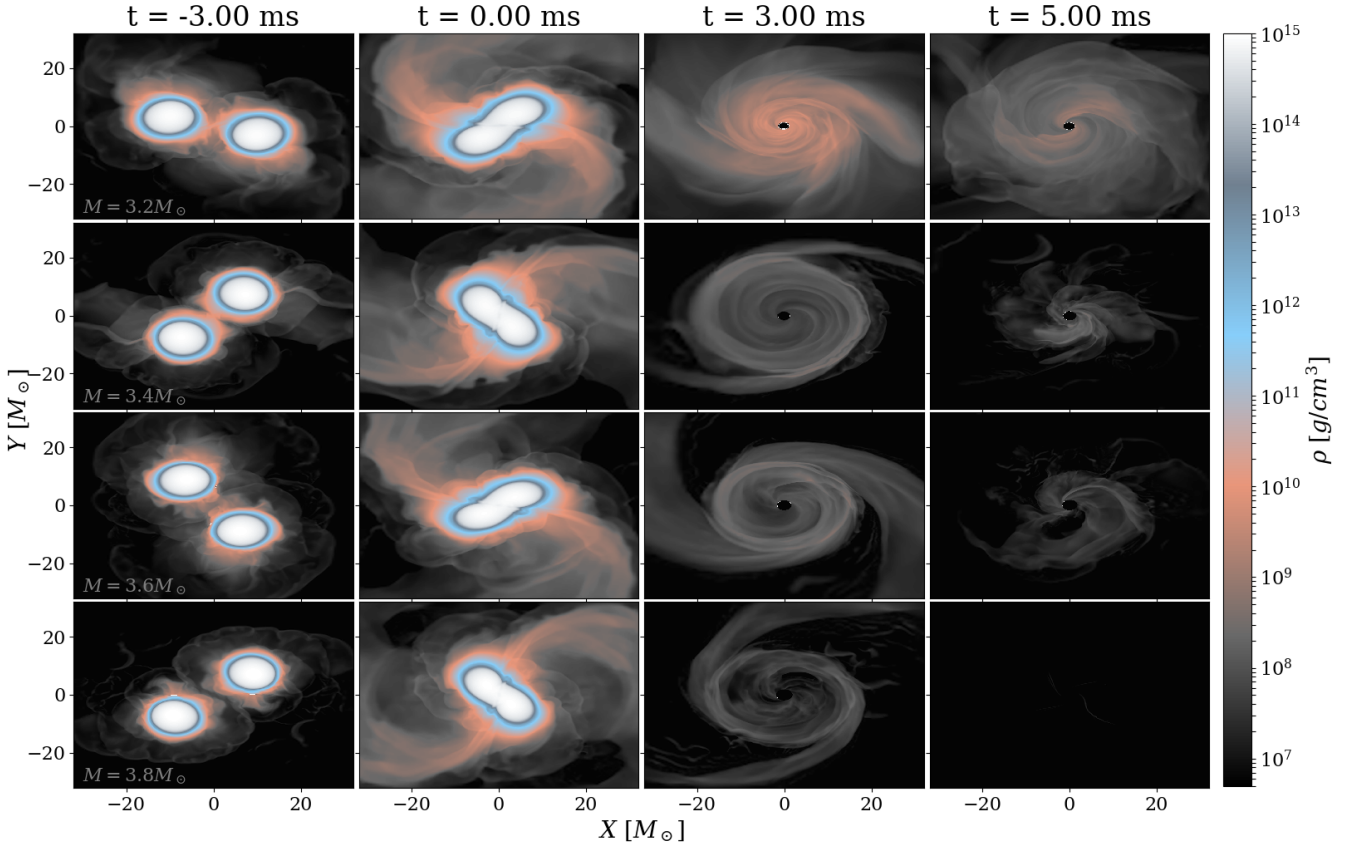
ifadeyle hesaplanır.

$$f_{GW} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} \quad (14)$$

Gravitasyonel dalga formu ve anlık frekansın zamana göre değişimi Şekil 1'de sunulmuştur. Tüm modeller için gravitasyonel dalga formunun kısa bir *inspiral* dönemine sahip olduğu ve birleşme sonrasında hızlıca kara deliğe çökerek sönümlenme gösterdiği görülmektedir. Tüm modellerin frekans evrimini ve gravitasyonel dalga formunu aynı anda ele alırsak simülasyonun başlangıcından birleşme anına kadar birbirlerine benzer şekilde frekans ve gravitasyonel dalga genliği artmaktadır. Bu durum nötron yıldızlarının yörünge hareketleri sürdükçe birbirlerine yaklaşmaları ve yörünge hızlarının artmasının bir göstergesidir. Birleşmeden hemen sonra iki çekirdeğin birbirlerine temasıyla birlikte cismin sıklığı artmaktadır ve bunun sonucu olarak cismin dönme hareketi hızlanmaktadır. Bu nedenle frekanstaki artış birleşme sonrasında devam ederken, alınan gravitasyonel dalga sinyali azalmaktadır. Bir mili saniyeden hemen önce kara deliğin olay ufku tespit edildiğinde, diğer bir deyişle kara delik oluşumu gerçekleştiğinde frekanstaki salınımlar bir süre daha devam edip, 1.5 kHz dolaylarında sönümlenmeye başlamaktadır.

Bu çalışmada elde edilen simülasyon sonuçlarının mevcut ve yapılması planlanan gravitasyonel dalga dedektörleri ile gözlenebilirliğini ortaya koymak üzere güç tayfına karşı dedektörlerin duyarlılık eğrileri Şekil 2'de verilmiştir. Sonuçlarımız, birleşme öncesi ve sırasında Virgo'nun dedektörü haricinde aLIGO ve Einstein Teleskobu tarafından gözlenebilir olduğu görülmektedir. Birleşme sonrasında ise sinyal tüm modellerde monoton olarak azalmaktadır. Bu durumda birleşme sonrasında olası bir kara delik ya da nötron yıldız oluşumunda bilgi alabileceğimiz dedektörün gelecek yıllarda yapılması planlanan Einstein Teleskobu olduğu görülmektedir. Einstein Teleskobu sayesinde birleşme sonrasında yüksek frekanslarda yayınlanan gravitasyonel dalga sinyallerinin tespiti kara delik oluşumuna ışık tutabilir.

Sistemin durgun kütle yoğunluğunun birleşmeden 3 ms önce, birleşme anında, birleşmeden 3 ms ve 5 ms



Şekil 3. Durgun kütle yoğunluğunun ekvatoryel düzlemindeki dağılımı.

sonra ekvatoryel düzlem boyunca davranışı Şekil 3'de gösterilmektedir. Görselde kolonlar ilgili zamanı temsil ederken, satırlar ise modelleri temsil etmektedir. Birleşme öncesi dönemde, nötron yıldızlarının yörünge hareketleri boyunca dış katmanlarındaki maddenin atılmaya başlandığı görülebilir.  $t=0$  ms anında nötron yıldızlarının çekirdekleri temas halindedir ve arkalarında, birleşme öncesindeki yüksek yörünge hızlarından dolayı oluşmuş çekimsel kuyruk görülmektedir. Çizelge 2'den de görülebileceği üzere birleşmeden sonra 1 ms içerisinde tüm sistemler kara deliğe çökmektedir. Şekil 3'ün üçüncü kolonunda, kara delik oluşumundan yaklaşık 2–2.5 ms sonra merkezde kara deliklerin görünür ufku ve etrafındaki maddeler görülebilmektedir.

Modellerimizde, önceki çalışmalarda da görüldüğü üzere sistemin başlangıç kütlelerinin artmasıyla beraber etrafındaki maddenin azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni, sistemin başlangıç kütlesi arttıkça birleşme sonrasında kara delik oluşumunun hızlanmasıyla sistemin açısal momentumu maddeye aktarabilmek için yeterli süre olmadığı ve maddenin büyük çoğunluğu kara delik tarafından toplanmış olmasıdır. Çizelge 2'de oluşan kara delik kütlelerini göz önüne aldığımızda sistemin başlangıç kütlelerinin %98–99 kadarını içerisinde barındırmaktadır. Disk kütlelerinin de bu kütlelerden çok küçük olduğu göz önüne alındığında sistemin arda kalan %1–2'lik kütleinin gravitasyonel dalga olarak sistemden yayıldığı sonucuna ulaşılabilir.

Çizelge 2. Simülasyonlardan elde edilen nümerik sonuçlar. Birinci kolon model ismini temsil etmektedir.  $t_{\text{BH}}$ ,  $M_{\text{BH}}$ ,  $\chi_{\text{BH}}$  ve  $M_{\text{disk}}$ , sırasıyla, görünür ufku oluşma süresi, kara deliğin kütlesi, boyutsuz spin ve merkezi cisim etrafındaki disk kütlesi değerlerini içermektedir.

Model	$t_{\text{BH}}$ (ms)	$M_{\text{BH}}$ ( $M_{\odot}$ )	$\chi_{\text{BH}}$ ( $J/M^2$ )	$M_{\text{disk}} \times 10^{-5}$ ( $M_{\odot}$ )
M32	0.6807	2.8242	0.7967	7.9207
M34	0.4856	2.9754	0.7860	0.1324
M36	0.4015	3.1297	0.7710	0.9103
M38	0.3509	3.2601	0.7595	0.0825

## 5 Tartışma

Bu çalışmada iç yapısı parçalı politropik SLy hal denklemi ile tanımlanmış, eş kütleli çift nötron yıldız sistemlerinin nümerik relativistik simülasyonları elde edilmiştir. Simülasyon birleşmeden üç tam yörünge önce başlatılmış ve birleşmeden 5 ms'ye kadar takip edilmiştir. Sistemlerin gravitasyonel dalga formları, frekanslarının yörünge boyunca değişimi incelenmiş ve sistemlerin mevcut ve gelecekte yapılması planlanan dedektörlerle gözlenip gözlenemeyeceği tartışılmıştır. Modellerin tamamında birleşme sonrasında görünür ufuk tespit edilmiş ve merkezi kara deliğin ve etrafındaki yapılar hakkında elde edilen veriler sunulmuştur. Bu çalışmanın sonraki aşaması olarak çok daha yüksek çözünürlüklü simülasyonlar yapılmaya devam edilmektedir (hazırlanıyor: Çokluk, Giacomazzo &

Yakut, 2023). Bu şekilde elde edilen bulgular hakkında daha güvenilir sonuçlar elde edilmesi hedeflenmektedir.

### Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 117F188 and 119F077 nolu projeler tarafından desteklenmektedir. KAC, 2210-C ve 2211-A programları tarafından burs desteği sağlanmasından dolayı TÜBİTAK'a; simülasyonların gerçekleşmesi için kullanılan HPC-EUROPA3 (INFRAIA-2016-1-730897) ile HPC-CINECA küme bilgisayar ağlarına ve bilimsel ziyaret süresince desteklerinden dolayı Milano-Bicocca Üniversitesi'ne, Fizik Bölümüne ve Bruno Giacomazzo'ya teşekkür eder.

### Kaynaklar

- Abbott B. P., ve diğ., 2016, *Physical Review Letters*, 116  
 Abbott B. P., ve diğ., 2017a, *Physical Review Letters*, 119  
 Abbott B. P., ve diğ., 2017b, *The Astrophysical Journal*, 848, L12  
 Abbott B. P., ve diğ., 2017c, *The Astrophysical Journal*, 848, L13  
 Abbott B. P., ve diğ., 2019, *Phys. Rev. X*, 9, 031040  
 Abbott B. P., ve diğ., 2020, *The Astrophysical Journal*, 892, L3  
 Abbott R., ve diğ., 2021, *Phys. Rev. X*, 11, 021053  
 Alcubierre M., Brügmann B., Dramlitsch T., Font J. A., Papadopoulos P., Seidel E., Stergioulas N., Takahashi R., 2000, *Physical Review D*, 62  
 Arnowitt R., Deser S., Misner C. W., 1959, *Phys. Rev.*, 116, 1322  
 Arnowitt R., Deser S., Misner C. W., 2008, *General Relativity and Gravitation*, 40, 1997  
 Baiotti L., Rezzolla L., 2017, *Reports on Progress in Physics*, 80, 096901  
 Baiotti L., Hawke I., Montero P. J., Löffler F., Rezzolla L., Stergioulas N., Font J. A., Seidel E., 2005, *Physical Review D*, 71  
 Baumgarte T. W., Shapiro S. L., 1998, *Phys. Rev. D*, 59, 024007  
 Colella P., Woodward P. R., 1984, *Journal of Computational Physics*, 54, 174  
 De Pietri R., Feo A., Maione F., Löffler F., 2016, *Physical Review D*, 93  
 Dietrich T., Ujevic M., Tichy W., Bernuzzi S., Brügmann B., 2017, *Physical Review D*, 95  
 Dietrich T., Bernuzzi S., Brügmann B., Ujevic M., Tichy W., 2018, *Phys. Rev. D*, 97, 064002  
 Douchin F., Haensel P., 2001, *Astronomy & Astrophysics*, 380, 151–167  
 East W. E., Paschalidis V., Pretorius F., Shapiro S. L., 2016, *Physical Review D*, 93  
 Einstein A., 1915, *Sitzungsberichte Preußische Akademie der Wissenschaften Berlin*  
 Einstein A., 1916, *Annalen der Physik*, 354, 769  
 Einstein A., 1918, *Sitzungsberichte Preußische Akademie der Wissenschaften Berlin*  
 Fujibayashi S., Sekiguchi Y., Kiuchi K., Shibata M., 2017, *The Astrophysical Journal*, 846, 114  
 Giacomazzo B., Rezzolla L., Baiotti L., 2011, *Phys. Rev. D*, 83, 044014  
 ourgoulhon E., Grandclément P., Taniguchi K., Marck J.-A., Bonazzola S., 2001, *Physical Review D*, 63  
 Hawke I., Löffler F., Nerozzi A., 2005, *Physical Review D*, 71  
 Hotokezaka K., Kyutoku K., Okawa H., Shibata M., 2015, *Phys. Rev. D*, 91, 064060  
 Kiuchi K., Kyutoku K., Sekiguchi Y., Shibata M., Wada T., 2014, *Phys. Rev. D*, 90, 041502  
 Lattimer J. M., 2012, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 62, 485  
 Löffler F., ve diğ., 2012, *Classical and Quantum Gravity*, 29, 115001  
 Mösta P., ve diğ., 2013, *Classical and Quantum Gravity*, 31, 015005  
 Nakamura T., Oohara K., Kojima Y., 1987, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 90, 1

Newman E., Penrose R., 1962, *Journal of Mathematical Physics*, 3, 566

Shibata M., 1999, *Phys. Rev. D*, 60, 104052

Shibata M., Nakamura T., 1995, *Phys. Rev. D*, 52, 5428

Shibata M., Uryū K. b. o., 2000, *Phys. Rev. D*, 61, 064001

The LIGO Scientific Collaboration ve diğ., 2021, preprint, ([arXiv:2111.03606](https://arxiv.org/abs/2111.03606)), *ADS*

Troja E., ve diğ., 2017, *Nature*, 551, 71

Tsatsin P., Marronetti P., 2013, *Phys. Rev. D*, 88, 064060

Çokluk K., 2021, Master's thesis, University of Ege

Access:

M23-0336: *Turkish J.A&A — Vol.4, Issue 3.*