

Ani Kara Delik Oluşumu ile Sonuçlanan Çift Nötron Yıldız Birleşmeleri: Elektromanyetik Sinyaller ve Kilonova Işık Eğrisi Modelleri

Kutay Arıncı Çokluk^{1,2}  , Kadri Yakut^{1,2} 

¹ Ege Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 35100, İzmir, Türkiye

² Ege Üniversitesi, Ege Gravitasyonel Astrofizik Araştırma Grubu (eGRAVITY), 35100, İzmir, Türkiye

Accepted: February 23, 2025. Revised: February 23, 2025. Received: November 28, 2024.

Özet

Bu çalışmada, çift nötron yıldızlarının birleşme simülasyonlarından elde edilen veri setleri kullanılarak kilonova ışık eğrileri incelenmiştir. Simülasyonlar, başlangıçta toplam baryonik kütlesi $3.2 M_{\odot}$ olan ve kütle oranları $q=[1.0:2.0]$ arasında değişen sistemler için gerçekleştirilmiştir. Nötron yıldızlarının birleşmesi sonucunda sistemden atılan dinamik madde ve disk rüzgarlarının özellikleri, kilonova ışık eğrilerinin farklı hız ($v=0.10c, 0.20c, 0.30c$) varsayımlarına göre modellenmesinde temel alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, kütle oranının artmasıyla atılan madde miktarının ve maksimum parlaklığa ulaşma süresinin arttığını, buna karşın maksimum parlaklığın özellikle kızılötesi bölgede daha yüksek değerlere ulaştığını göstermektedir. Simülasyonlar sonucunda, mavi bölgede kısa süreli, kırmızı bölgede ise uzun süreli baskın ışınlamalar gözlemlenmiştir. Bu durum, nötron yıldızlarından atılan maddenin fiziksel özellikleri, opaklık ve nükleosentez süreçleri ile ilişkilendirilmiştir. Çalışma, kilonova gözlemlerinin kompakt çift sistemlerin fiziksel parametrelerini anlamada nasıl kullanılabileceğini ve nötron yıldızlarının durum denklemi gibi bilinmeyen özelliklere ışık tutabileceğini vurgulamaktadır. Gelecekteki çoklu haberci gözlemleri ve artan dedektör hassasiyeti ile bu sistemlerin fiziksel parametrelerinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi mümkün olacaktır.

Abstract

In this study, kilonova light curves were analyzed using data obtained from the simulations of binary neutron star mergers. The simulations were performed for systems with an initial total baryonic mass of $3.2 M_{\odot}$ and mass ratios ranging from $q=[1.0:2.0]$. The properties of dynamically ejected matter and disk winds resulting from the neutron star mergers served as the basis for modeling kilonova light curves under different velocity assumptions ($v=0.10c, 0.20c, 0.30c$). The results indicate that an increase in the mass ratio leads to a larger amount of ejected matter and a longer time to reach peak brightness, while the peak brightness reaches higher values, particularly in the infrared region. The simulations revealed that the blue band exhibits a short-duration dominant emission, whereas the red band shows a long-duration dominant emission. This behavior is linked to the physical properties of the ejected matter, opacity, and nucleosynthesis processes. The study highlights how kilonova observations can be utilized to understand the physical parameters of compact binary systems and shed light on unknown properties such as the equation of state of neutron stars. Future multimessenger observations and improved detector sensitivity will enable more detailed investigations into the physical parameters of these systems.

Anahtar Kelimeler: Neutron stars merger – kilonovae – multimessenger astronomy – gravitational waves – numerical simulations – relativity and gravitation

1 Giriş

Çift nötron yıldızı (ÇNY) sistemlerinin birleşmeleri, evrendeki ekstrem fiziksel ortamları temsil ederek, yüksek yoğunluklu madde, güçlü çekim alanları ve relativistik fenomenleri incelemek için benzersiz bir laboratuvar sunar (Baiotti & Rezzolla 2017; The LIGO Scientific Collaboration ve diğ. 2018; Abbott ve diğ. 2019). LIGO-Virgo iş birliği tarafından 2017 yılında ilk kez bir ÇNY birleşmesinden kaynaklanan gravitasyonel dalganın (GW170817) tespiti (Abbott ve diğ. 2017a), çoklu haberci astronomisinin başlangıcını işaret etmiştir. Aynı zamanda bu olayın elektromanyetik (EM) karşılıklarının, özellikle de bu birleşme ile ilişkilendirilen

kilonovanın (Abbott ve diğ. 2017a,b), eş zamanlı olarak gözlemlenmesi, kompakt cisimlerin fiziği, nükleosentez süreçleri ve ekstrem koşullarda maddenin doğası hakkında yeni ufuklar açmıştır.

Kilonovalar, hızlı nötron yakalama süreci ile sentezlenen ağır elementlerin radyoaktif bozunmasından kaynaklanan EM parlama olaylarıdır (Metzger ve diğ. 2010; Perego ve diğ. 2022). Bu olaylar, optik ve kızılötesi dalga boylarında karakteristik ışık eğrileri sergiler ve bu ışık eğrilerinin özellikleri, birleşme öncesi kompakt sistemin bileşenlerinin özellikleri, birleşme sonrası atılan maddenin kütlesi, hızı, kimyasal bileşimi, opaklığı, nötron maddesinin hal denklemi, nötrino etkileşimleri, manyetik alan gibi parametrelerden doğrudan etkilenir (Metzger 2019; Radice ve diğ. 2018; Kawaguchi ve diğ. 2016; Tanaka & Hotokezaka 2013; Patricelli & Bernardini 2020; Perego ve diğ.

* kutay.arinci.cokluk@ege.edu.tr

2014). Kilonovalar, birleşme dinamiği, nötron yıldızlarının durum denklemleri, hızlı nötron yakalama süreci nükleosentezi hakkında kritik bilgiler sağlar. Nötron maddesinin hal denklemi, nötron yıldızlarının yapısal ve termal özelliklerini belirleyen temel bir fiziksel parametre olup halen tam olarak anlaşılmış değildir (Perego ve diğ. 2020, 2022).

Bu sistemlerin gözlemsel veri setlerinin doğru bir şekilde yorumlanması ve bu süreçleri yöneten fiziksel mekanizmaların incelenmesi için nümerik relativistik simülasyonlar büyük önem taşır. Nümerik relativistik simülasyonlar, birleşme sırasında ortaya çıkan gravitasyonel dalga sinyallerini, madde atım dinamiklerini modelleyerek bu sistemlere dair detaylı bilgiler sunar (Baiotti & Rezzolla 2017). Özellikle atılan maddenin miktarı, dağılımı, hızı ve bileşimi, kilonova ışık eğrilerinin özelliklerini doğrudan etkileyerek bu sistemlerin fiziksel parametrelerine dair ipuçları verir.

Bu çalışma, toplam baryonik kütlesi $3.2M_{\odot}$ olan ve kütle oranları $q=[1.0-2.0]$ arasında değişen ÇNY birleşmelerine odaklanmaktadır. Simülasyonlardan elde edilen dinamik madde ve disk rüzgarı özellikleri kullanılarak, farklı madde atım hızları ($v=0.10c, 0.20c, 0.30c$) varsayımları altında kilonova ışık eğrileri modellenmiştir. Bu çalışmanın amacı, kütle oranı ve madde atım hızındaki değişimlerin kilonovanın maksimum parlaklığı, maksimuma ulaşma süresi ve spektral evrimi üzerindeki etkilerini incelemektir. Çalışma, kilonovaların gözlenebilirliği ve birleşen sistemlerin fiziksel özellikleri ile ilişkisine dair değerli bilgiler sunmayı amaçlamaktadır.

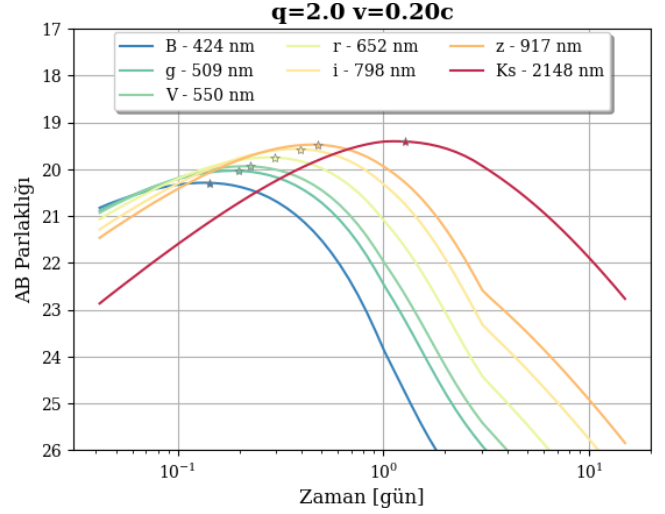
Bu makale şu şekilde düzenlenmiştir: §2’de, yöntemler, nümerik simülasyon ve kilonova modellemesi ayarları anlatılmaktadır. §3’te, simülasyon sonuçları ve ışık eğrisi analizleri sunulmaktadır. §4’te ise elde edilen bulguların tartışması ve gelecekteki çoklu haberci gözlemlerine yönelik çıkarımlar yer almaktadır.

2 Yöntem

Relativistik hidrodinamik denklemlerinin çözümü için Einstein Toolkit yazılımının (Löffler ve diğ. 2012) Katherine Johnson (Brandt ve diğ. 2021) versiyonundan yararlanılmıştır.

Başarıyla tamamlanan simülasyonların çıktıları Python kütüphanesi olan Kuibit (Bozzola 2021) kullanılarak geliştirilen Python scriptleri ile analiz edildi. Maddenin dört-vektörün zaman bileşeninin $u_t < -1$ olduğu kısmı sistemden atılan madde olarak ele alınmıştır. Ayrıca tüm hesaplama alanında nötron yıldızın yapay atmosfer değeri olan $\rho_{\text{atm}} = 6.2 \times 10^6 \text{ g cm}^{-3}$ değerinden büyük olan tüm maddeden, sistemden atılan maddeler hariç tutularak, eğer oluştuysa, merkezi nihai cismin etrafındaki diskin kütlesi hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler, Çokluk ve diğ. (2024) çalışmasının Çizelge 2’sindeki altıncı ve yedinci kolonlarda M_{disc} ve M_{ejec} olarak verilmiştir. Bu çalışmada her bir model için verilen bu iki değer kullanılarak kilonova parlamaları modellenmiştir.

Kilonova parlamalarının modellenmek amacıyla çoklu-bileşen yarı-analitik kilonova modelleme yazılımı olan xkn (Ricigliano ve diğ. 2024) kullanılmıştır. Kilonova ışık eğrileri modellenirken sistemden atılan madde miktarı ve maddenin bileşenleri doğrudan kilonova ışık eğrisinin biçimine etki etmektedir. Bu çalışmada sistemden maddenin hem dinamik olarak hem de disk rüzgarları ile atıldığı varsayımı yapılmıştır. Dinamik atımı miktarı için doğrudan (Çokluk ve diğ. 2024) çalışmasında verilen M_{ejec} değerleri kullanılmıştır. Her bir kilonova modeline disk rüzgarının ek katkısı ise $0.05 M_{\text{disc}}$ olarak varsayılmıştır. Ek olarak sistemden atılan maddelerin atım



Şekil 1. Toplam baryonik kütlesi $3.2M_{\odot}$ olan ve bileşenlerin kütle oranları $q=2.0$ olan nötron yıldız çiftinin birleşmesi sonrasında ortaya çıkan kilonova ışık eğrisi. Modelleme esnasında atılan maddenin hızı, $v=0.20c$ olacak şekilde göz önünde bulundurulmuştur. Işık eğrisi VLT’nin B, g, V, r, i, z ve Ks filtrelerinde modellenmiştir. Her bir filtrenin maksimum parlaklığa ulaştığı zamana ve parlaklığa denk gelen noktalar gri yıldız sembolü ile belirtilmiştir.

hızlarına bağlı olarak parlaklık davranışlarının karakteristiği değişmektedir. Bu bağlamda kilonova ışık eğrileri sistemden atılan maddenin iki bileşeni göz önünde bulundurularak yavaş, orta ve hızlı atım hızları varsayımı altında hesaplanmıştır. Bu nedenle bu çalışmadaki kilonova ışık eğrileri farklı kütle oranları modeller arasındaki atım miktarındaki farkı yansıtmaktadır.

Kilonovaların parlaklıkları ve parlamalarının maksimuma çıkış sürelerinin sistemin yörünge normal doğrultusu ile gözlemci arasındaki bakış açısına, θ , ve nötron yıldızlarının ne kadar uzakta birleştiği, D , varsayımına göre değiştiği göz önüne alındığından bu parametreler $\theta=45^\circ$ ve $D=50$ Mpc olacak şekilde sabit tutulmuştur. Kilonova parlaklıklarının hesaplamasında kullanılan alçak ve yüksek enlemlerden atılan maddenin opasitesi sırasıyla $\kappa_{\text{low}}=1 \text{ cm}^{-2} \text{ g}^{-1}$ ve $\kappa_{\text{high}}=10 \text{ cm}^{-2} \text{ g}^{-1}$ olarak ele alınmıştır.

Çift nötron yıldız birleşme simülasyonlarına ilişkin kuramsal yaklaşımlar Çokluk (2021); Çokluk ve diğ. (2023, 2024) çalışmalarında detaylı olarak ele alınmıştır.

3 Sonuçlar

Şekil 1’de toplam baryonik kütleleri $3.2M_{\odot}$ ve bileşenleri arasında kütle oranı $q=2.0$ olan çift nötron yıldız sisteminin birleşmesinden meydana gelen kilonovaların $v=0.20c$ hızla sistemden madde atımı gerçekleştiği varsayımıyla modellenen ışık eğrileri gösterilmektedir. Şekilde her bir renk, farklı merkez dalga boylarını temsil eden bir filtreyi göstermektedir. Filtreleri temsil eden renkler kısa dalgaboylarında mavi, uzun dalgaboylarında kırmızı olacak şekilde seçilmiştir. Farklı dalgaboylarının maksimum parlaklıkları ve karşılık gelen zamanın farklı olduğu görülmektedir. Bu durum fotosferik sıcaklık evriminden kaynaklı olarak öncelikle B bandının parlaklığı ilk birkaç saatte maksimum seviyesine ulaşır. Diğer filtreler de B filtresini takiben bir gün içerisinde sırasıyla maksimum noktalarına ulaşmaktadır. Ancak Ks filtresinin birleşmeden yaklaşık bir gün sonra maksimum parlaklığına

Çizelge 1. Farklı kütle oranlarına sahip sistemlerin, $v=0.20c$ durumunda, farklı dalgaboylarında sahip olduğu maksimum parlamaya karşılık gelen zamanı (t) ve parlaklığı (m) göstermektedir. İlk kolon sistemin bileşenlerinin kütle oranlarını, q , diğer kolonlar, sırasıyla, 424, 509, 550,652, 798, 917, 2148 nm merkezli dalgaboylarına karşılık gelen B , g , V , r , i , z ve Ks filtreleri için maksimum parlaklık zamanı ve parlaklık değerlerini vermektedir.

q	t_B (gün)	m_B (m)	t_g (gün)	m_g (m)	t_V (gün)	m_V (m)	t_r (gün)	m_r (m)	t_i (gün)	m_i (m)	t_z (gün)	m_z (m)	t_{Ks} (gün)	m_{Ks} (m)
1.00	0.049	21.821	0.640	21.794	0.071	21.793	0.086	21.821	0.104	21.895	0.119	21.971	0.221	22.828
1.10	0.086	20.937	0.112	20.795	0.125	20.750	0.154	20.681	0.199	20.633	0.232	20.633	0.547	21.025
1.20	0.113	20.561	0.152	20.357	0.170	20.288	0.220	20.143	0.292	20.019	0.352	19.959	0.928	20.026
1.30	0.127	20.419	0.172	20.188	0.195	20.107	0.254	19.935	0.341	19.780	0.415	19.701	1.120	19.670
1.40	0.131	20.388	0.179	20.151	0.203	20.062	0.263	19.895	0.352	19.740	0.425	19.661	1.133	19.645
1.60	0.138	20.351	0.188	20.110	0.212	20.026	0.275	19.851	0.367	19.695	0.442	19.618	1.147	19.633
1.80	0.140	20.328	0.192	20.081	0.218	19.987	0.282	19.812	0.377	19.649	0.458	19.558	1.188	19.543
2.00	0.144	20.293	0.198	20.036	0.225	19.937	0.294	19.751	0.396	19.572	0.481	19.479	1.280	19.400

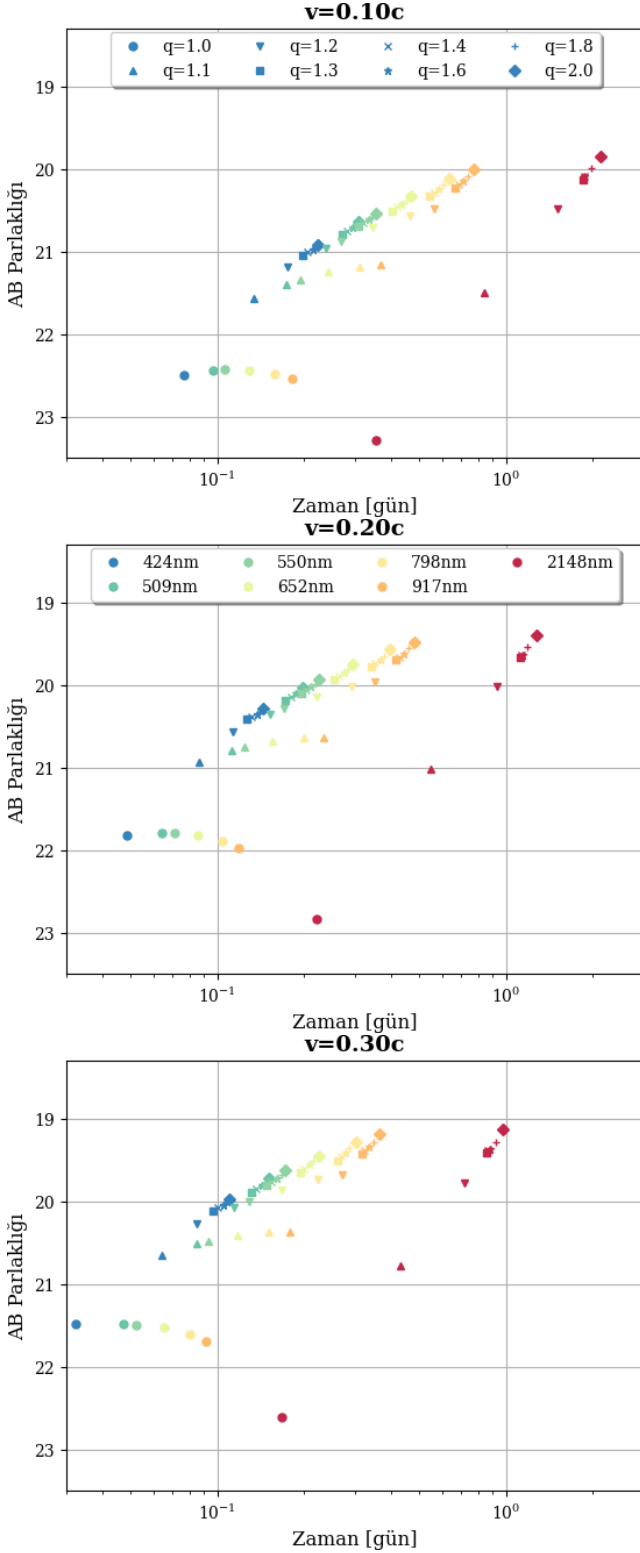
ulaştığı görülmektedir. Kısa dalgaboylarında parlamalar maksimuma ulaştıktan sonra, uzun dalgaboyuna oranla çok daha hızlı bir şekilde sönümlenmektedir. Bu durum opaklık, termal soğurma ve atılan maddenin özelliklerindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Mavi dalgaboylarında, lantanitler ve aktinitler gibi hızlı nötron yakalama süreci ile oluşmuş ağır elementlerin varlığı nedeniyle opaklık oldukça yüksektir ve bu nedenle kilonovaların erken döneminde kısa dalgaboylarında yayımlanan ışınım soğurulur. Atılan madde genişledikçe soğur ve termal spektrum daha uzun dalga boylarına kaymaya başlar. Kızılötesi bölgesinde opaklığın oldukça düşük olması, uzun dalgaboyundaki ışık eğrisinin daha uzun süre baskın olmasına neden olur. Kilonova parlamasıyla ilişkili olduğu düşünülen GRB 211211A'nın gözlemsel veri setleri erken dönemde mavi bileşenin hızla sönümlendiğini ve kızılötesi bölgesinin uzun süre ışık eğrisinde baskın olduğunu göstermektedir (Rastinejad ve diğ. 2022).

Bu çalışmada kullanılan her bir kütle oranlarına sahip sistemlerin $v=0.20c$ madde atım hızı varsayımında kilonovalarının farklı dalgaboylarında maksimum çıkış süreleri ve maksimum parlaklıkları Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelgenin ilk kolonu birleşme öncesinde sistemlerin bileşenlerinin kütle oranlarını verirken, sonraki sütunlar sırasıyla 424, 509, 550, 652, 798, 917 ve 2148 nm dalgaboyu merkezli filtrelerinde maksimum çıkış süresi (t) ve maksimum AB parlaklıkları (m), verilmiştir.

Çizelge 1'de verilen değerlere $v=0.10c$ ve $v=0.30c$ varsayımı altında modellenen ışık eğrilerini de dahil ederek Şekil 2'de görselleştirildi. Şekilde her bir kütle oranı farklı sembol ile belirtilirken her bir filtre dalgaboyuna uygun olarak farklı renklerle temsil edilmiştir. Buna göre farklı v hızları varsayımında bileşenlerin kütle oranlarının kilonova karakteristiğine nasıl etki ettiğinin görselleştirilmesi amaçlanmıştır. Parlaklığın maksimuma çıkış zamanının kütle oranının artmasıyla uzadığı görülmüştür. Bu atılan madde miktarının artmasından dolayı optikçe daha kalın bir ortam olduğundan ışının maddeden geçmesi için gereken süresinin uzadığı anlamına gelmektedir. Kütle oranının düşmesiyle bu maksimum parlaklığa çıkış daha erken zamanda oluşurken, örneğin $q=1.0$ modeli her bir v hızı için maksimuma $t<1$ gün'de ulaşmaktadır. Aynı süreç $q=2.0$ modelinde $t=1-2.5$ gün arasında gerçekleşmektedir. Bu durumu daha iyi görselleştirmek adına Şekil 3'de modellerin kütle oranlarına karşı maksimum çıkış hızları çizdirilmiştir. Maksimum parlaklığa ulaşma süresinin kütle oranı arttıkça artma eğiliminde olduğu

görülmektedir. Yüksek madde atım hızı, $v=0.30c$ varsayımında tüm dalgaboyundaki her bir model maksimum zamana $t<1$ gün'den önce ulaştığı, hızların azalmasıyla bu durumun, özellikle Ks filtresi için, $t\approx 2$ gün dolaylarına kadar arttığı gözlenmektedir. $\lambda_{\text{merkez}}<1000$ nm olan filtrelerinde durum Ks filtresindeki kadar yüksek bir artış görünmese de yine de maksimuma çıkış süresinde gecikmeler görülmektedir.

Şekil 4'de ise kütle oranına ve gözlenen filtrenin merkezi dalgaboyuna göre maksimum parlaklıkların nasıl değişim gösterdiği görselleştirilmiştir. Burada maddenin atım hızının düşük hızlardan yüksek hızlara gittikçe maksimum kilonova parlaklığının tüm dalgaboylarında ve tüm kütle oranı değerlerinde arttığı görülmektedir. Yüksek atım hızları maddenin daha hızlı genişlemesine ve maddenin yoğunluğunun azalmasına neden olarak optik derinlikte azalma meydana getirir. Böylece hızlı nötron yakalama süreci element oluşumları sırasında beta bozunması nedeniyle açığa çıkan ışının verimli olarak maddeden kaçısına neden olur ve daha parlak bir kilonova gözlenmesini mümkün kılar (Radice ve diğ. 2018). Bileşenler arası kütle oranının artmasıyla gözlenebilirliği daha olası kilonovalar elde edilebilmektedir çünkü bileşenlerin kütle farklarının artmasıyla birleşme esnasında daha fazla miktarda madde sistemden atılıyor ve yüksek madde miktarı radyoaktif bozunma sürecinden daha fazla enerji üretilmesine neden olarak elektromanyetik ışınım katkıda bulunuyor. Ancak Şekil 4'den çıkarılabilecek başka bir sonuçta eş kütleli durumlarda mavi baskın bir kilonova gözlemlerken kütle oranı arttıkça daha kilonovanın kırmızı bileşeni baskın ve parlak duruma gelmektedir. Birleşen nötron yıldız çifti sistemlerinde bileşenlerin kütle dağılımları eşit olduğunda atılan madde simetrik bir şekilde dağılır ve genellikle kutup bölgelerine yakın enlemlerde $\theta=0^\circ-30^\circ$ düşük opaklığa sahip, lantanit açısından fakir madde simetrik olarak dağılır ve bu da kilonovanın erken evrenlerinde mavi ışığın baskın olarak mavi bölgede daha parlak bir durum ortaya çıkarır. Kütle oranı arttıkça madde sistemden hem daha asimetric olarak atıldığından hem de birleşme esnasında büyük kütleli bileşenin düşük kütleli bileşenin bütünlüğünü bozarak (bkz. Şekil 5, Çokluk ve diğ. 2024) lantanit açısından zengin maddenin ekvatoryel düzlemde dağılmasına neden olur. Bu ağır elementler atılan maddenin opaklığını artırarak mavi ışığın sönümlenmesine neden olarak kızılötesi ışının daha da parlamasına katkı sağlar (Radice ve diğ. 2018; Kasen ve diğ. 2017; Fernández & Metzger 2016). Ayrıca kütle asimetrisinin yüksek olduğu durumlarda nötronca zengin maddenin ekvatoryel düzleme yakın bölgelerde



Şekil 2. Çizelge 1'de verilen değerlerin $v=0.10c$ (üst), $v=0.20c$ (orta) ve $v=0.30c$ (alt) varsayımlarında maksimum parırlıklarının noktalanması verilmiştir. Her kütle oranı farklı sembollerle ve her filtre de farklı renklerle temsil edilmiştir.

artmasına katkıda bulunarak hızlı nötron yakalama süreci nükleosentezini destekleyerek kıvıltısı bölgede daha baskın bir kilonova parlamasına neden olur. Ek olarak bu durum hiperkütleli nötron yıldızı ya da hızlı kara delik oluşumu süreçleri de bu duruma katkıda bulunduğu bilinmektedir. Uzun ömürlü hiperkütleli nötron yıldızları kara deliğe çökmeden önce maddenin elektron fraksiyonunu arttırarak mavi bileşenin parırlıklığına ek katkıda bulunur (Fernández & Metzger 2016). Ancak ani kara delik oluşumu sürecinde bu durum ortadan kalktığı için kırmızı baskın bir kilonova karşımıza çıkar. Bu çalışmada incelenen tüm sistemler birleşme sonrası ani kara delik oluşumu gösterdiklerinden kırmızı baskın bir kilonova ışık eğrisi görülmesi beklenen bir durumdur.

Şekil 3 ve 4 veri setleri kullanılarak, $v=0.20c$ varsayımı altında, $\lambda_{\text{merkez}}=424, 917$ ve 2148 nm filtrelerinde kütle oranına (q) göre değışimler incelenmiş ve bu değışimler üçüncü dereceden bir polinom ile modellenmiştir. Elde edilen katsayılar, Denklem 1 yardımıyla elektromanyetik tayfın mavi, kırmızı ve yakın kıvıltısı bölgelerinde kütle oranına bağılı değışimini temsil etmektedir. Bu analiz, farklı dalga boylarındaki maksimum parırlık ve zamanlarının kütle oranına bağılı evrimini matematiksel olarak ifade etmeyi ve kilonova olaylarının fiziksel parametrelerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamayı amaçlamaktadır.

$$t_p(B, 0.20c) = 0.309q^3 - 1.552q^2 + 2.590q - 1.297$$

$$m_p(B, 0.20c) = -7.049q^3 - 34.586q^2 - 55.887q + 50.074$$

$$t_p(z, 0.20c) = 1.1971q^3 - 5.9868q^2 + 9.9501q - 5.046$$

$$m_p(z, 0.20c) = -11.374q^3 + 55.784q^2 - 90.158q + 67.596$$

$$t_p(Ks, 0.20c) = 4.0782q^3 - 20.131q^2 + 32.934q - 16.683$$

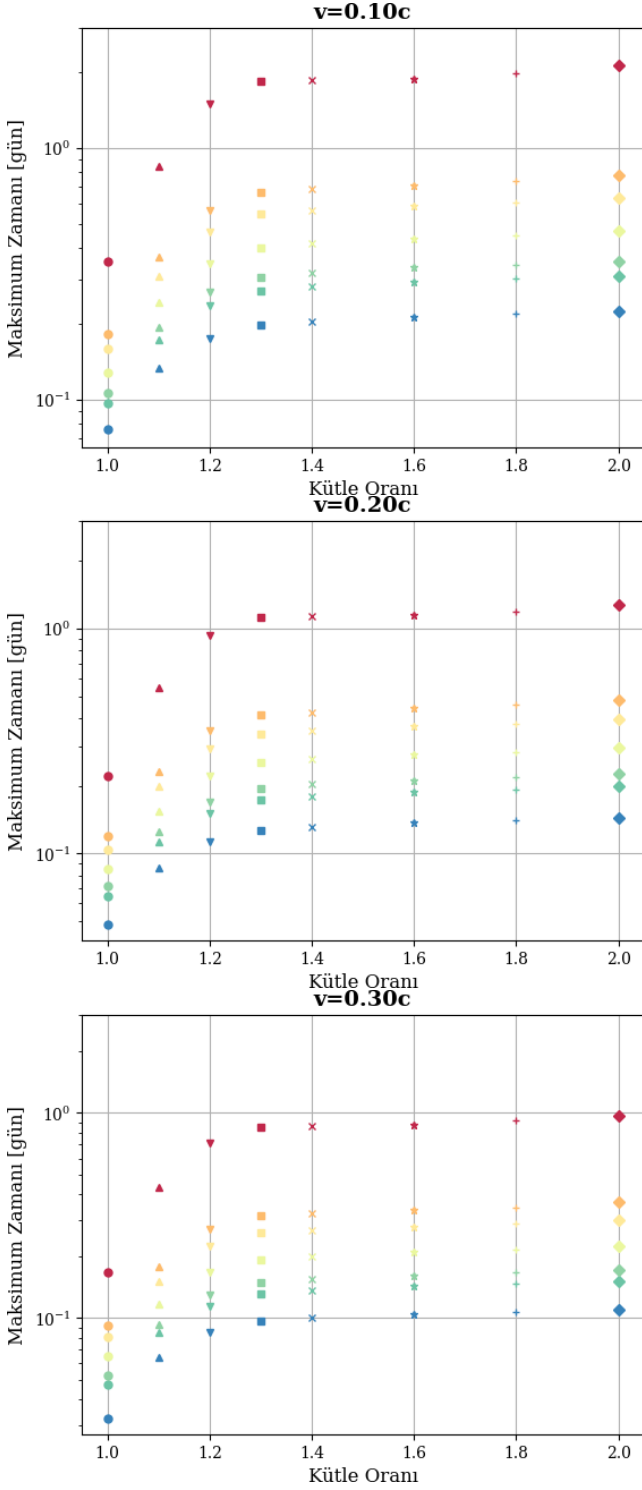
$$m_p(Ks, 0.20c) = -16.386q^3 + 80.057q^2 - 128.83q + 87.834 \quad (1)$$

4 Tartışmalar

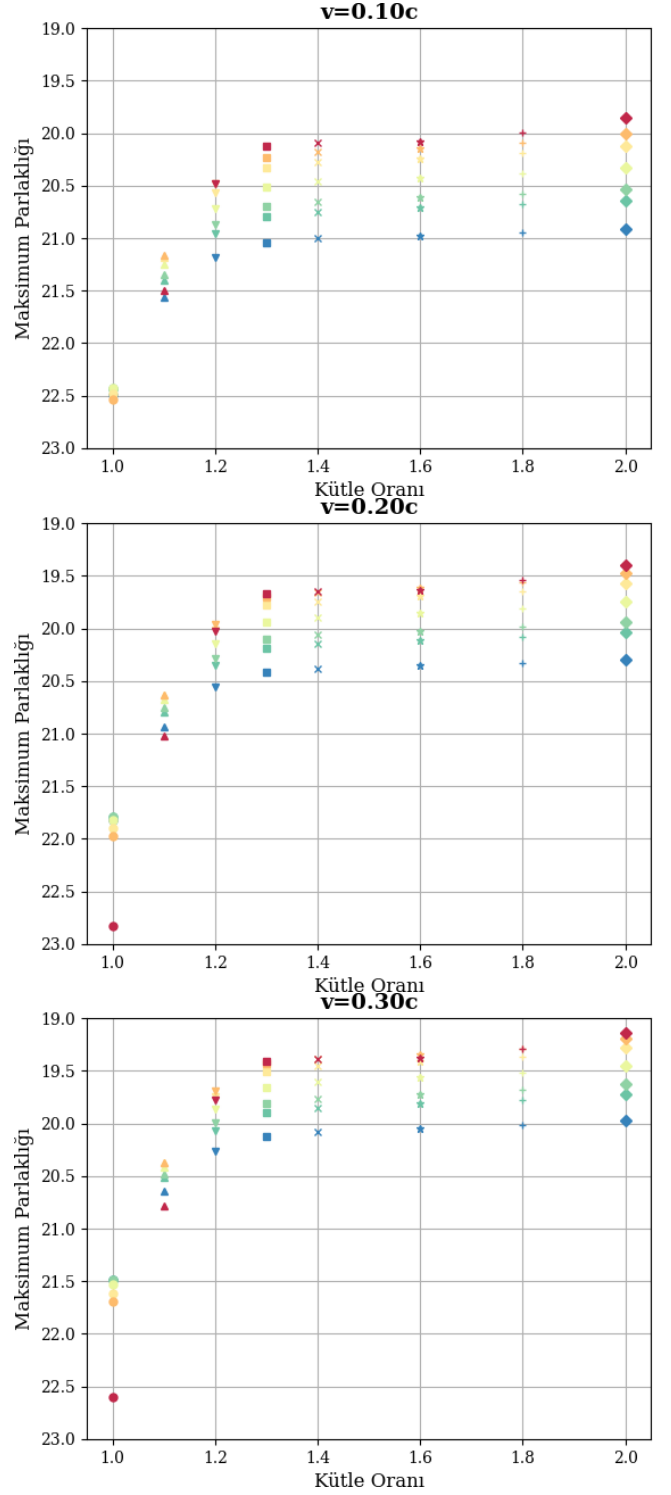
Bu çalışmada, çift nötron yıldızı birleşmelerinden kaynaklanan kilonova ışık eğrilerinin, kütle oranı ve sistemden atılan maddenin hızı gibi fiziksel parametrelere olan bağımlılığı incelenmiştir. Simülasyonlardan elde edilen veri setleri, kilonovanın maksimum parırlık ve maksimum zamanlarının çift sistemin başlangıç koşulları tarafından güçlü bir şekilde belirlendiğini göstermektedir.

Kütle oranının artmasıyla daha büyük miktarda madde atıldığı ve bunun kilonovanın daha uzun süreli bir parlama sergilemesine neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, büyük kütle oranına sahip sistemlerde birleşme sırasında daha fazla madde atımı gerçekleşmesiyle ilişkilendirilebilir. Atılan madde miktarının artışı, radyoaktif bozunma sürecinden salınan enerjinin daha fazla bir optik kalınlıkla yayılmasına ve ışık eğrisinin kıvıltısı bölgede baskın hale gelmesine neden olmaktadır. Özellikle $q=2.0$ gibi büyük kütle oranlarında kıvıltısı emisyonun baskın olması, bu tür birleşmelerin gözlemsel tespitinin kıvıltısı teleskoplarla yapılmasını kritik hale getirmektedir.

Eş kütleli sistemlerde ise, atılan madde simetrik bir şekilde dağıldığı için mavi bileşenin erken dönemlerde baskın olduğu görülmüştür. Ancak, mavi bileşenin bu hızlı evrimi, kısa sürede sönümlenmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu durum,



Şekil 3. $v=0.10c$ (üst), $v=0.20c$ (orta) ve $v=0.30c$ (alt) varsayımlarında kütle oranına göre maksimuma çıkış sürelerinin değişimi noktalanmıştır. Semboller ve renkler Şekil 2'deki ile aynı durumları temsil etmektedir.



Şekil 4. $v=0.10c$ (üst), $v=0.20c$ (orta) ve $v=0.30c$ (alt) varsayımlarında kütle oranına göre maksimum parlaklıklarının değişimi noktalanmıştır. Semboller ve renkler Şekil 2'deki ile aynı durumları temsil etmektedir.

düşük kütle oranlarına sahip sistemlerde atılan maddenin hızlı nötron yakalama süreci açısından daha fakir olmasından kaynaklanabilir.

Atım hızının etkisi incelendiğinde, $v=0.30c$ gibi yüksek hızlarda maksimum parlaklığa ulaşma süresinin kısaldığı ve parlaklığın tüm dalga boylarında daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Yüksek hızlar, maddenin daha hızlı genişlemesine ve optik derinliğin azalmasına neden olarak ışıının daha verimli bir şekilde kaçışını sağlamaktadır. Buna karşılık, $v=0.10c$ gibi düşük hız varsayımlarında, ışık eğrileri daha uzun bir zaman ölçeğinde gelişmekte ve daha düşük maksimum parlaklık değerleri sergilemektedir.

Çalışmanın sonuçları, birleşen nötron yıldızlarının başlangıç koşullarının, kilonovanın gözlemlenebilir özellikleri üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, özellikle gelecekteki gözlemsel çalışmalar için önem taşımaktadır. Einstein Teleskobu ve Cosmic Explorer gibi yeni nesil gravitasyonel dalga dedektörlerinin, daha uzak birleşmeleri tespit etmesiyle, bu tür sistemlerin fiziksel parametrelerini daha ayrıntılı bir şekilde incelemek mümkün olacaktır. Bununla birlikte, kilonovaların kıvılcığı bölgede baskın olan uzun süreli yayılımı, bu olayların takibi için yüksek hassasiyetli kıvılcığı teleskopların önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada kullanılan modeller bazı sınırlamalara sahiptir. Örneğin, kullanılan atım hızları ve opaklık varsayımları basitleştirilmiş bir yaklaşım sunmaktadır. Daha detaylı nötrino taşınım modelleri veya üç boyutlu simülasyonlar, kilonova ışık eğrilerinin daha gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlayabilir. Ayrıca, nötron yıldızlarının manyetik alanlarının ve başlangıç dönme hızlarının etkisi de göz önünde bulundurularak daha kapsamlı bir analiz yapılabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma, kilonova ışık eğrilerinin fiziksel parametrelerle olan ilişkisini inceleyerek, çoklu haberci gözlemleri için temel bir çerçeve sunmaktadır. Bu sistemlerin daha iyi anlaşılması, nötron yıldızlarının durum denklemi, hızlı nötron yakalama süreci nükleosentezi ve evrendeki ağır element oluşumu hakkında daha derin bilgiler sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma KAÇ'ın doktora çalışmasının bir kısmından üretilmiştir. Bu çalışma TÜBİTAK 119F077 nolu projeler tarafından desteklenmektedir. KAÇ, 2211/A, 2211/C ve 2214/A programları tarafından burs desteği sağlanmasından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder. Bu araştırmada yer alan nümerik hesaplamaların bir kısmı TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

- Abbott B. P., ve diğ., 2017a, *Phys. Rev. Lett.*, 119
 Abbott B. P., ve diğ., 2017b, *ApJ*, 848, L12
 Abbott B. P., ve diğ., 2019, *Phys. Rev. Lett.*, 123, 011102
 Baiotti L., Rezzolla L., 2017, *Reports on Progress in Physics*, 80, 096901
 Bozzola G., 2021, *The Journal of Open Source Software*, 6, 3099
 Brandt S. R., ve diğ., 2021, The Einstein Toolkit, *Zenodo*, doi:10.5281/zenodo.5770803
 Fernández R., Metzger B. D., 2016, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 66, 23
 Kasen D., Metzger B., Barnes J., Quataert E., Ramirez-Ruiz E., 2017, *Nature*, 551, 80
 Kawaguchi K., Kyutoku K., Shibata M., Tanaka M., 2016, *arXiv*, 825, 52

- Löffler F., ve diğ., 2012, *Classical and Quantum Gravity*, 29, 115001
 Metzger B. D., 2019, *Annals of Physics*, 410, 167923
 Metzger B. D., ve diğ., 2010, *MNRAS*, 406, 2650
 Patricelli B., Bernardini M. G., 2020, *arXiv*
 Perego A., Rosswog S., Cabezón R. M., Korobkin O., Kappeli R., Arcones A., Liebendorfer M., 2014, *MNRAS*, 443, 3134
 Perego A., ve diğ., 2020, *arXiv*
 Perego A., Thielemann F. K., Cescutti G., 2022, *r-Process Nucleosynthesis from Compact Binary Mergers*. Springer Nature Singapore, Singapore, pp 555–610, doi:10.1007/978-981-16-4306-4_13, https://doi.org/10.1007/978-981-16-4306-4_13
 Radice D., Perego A., Hotokezaka K., Fromm S. A., Bernuzzi S., Roberts L. F., 2018, *ApJ*, 869, 130
 Rastinejad J. C., ve diğ., 2022, *Nature*, 612, 223
 Ricigliano G., Perego A., Borhanian S., Loffredo E., Kawaguchi K., Bernuzzi S., Lippold L. C., 2024, *MNRAS*, 529, 647
 Tanaka M., Hotokezaka K., 2013, *ApJ*, 775, 113
 The LIGO Scientific Collaboration ve diğ., 2018, *Phys. Rev. Lett.*, 121, 161101
 Çokluk K. A., 2021, Master's thesis, University of Ege
 Çokluk K. A., Yakut K., Giacomazzo B., 2023, *Turkish J.A&A*, 4, 34
 Çokluk K. A., Yakut K., Giacomazzo B., 2024, *MNRAS*, 527, 8043

Access:

M25-0312: *Turkish J.A&A* — Vol.6, Issue 3.