



Nötron Yıldızı Birleşmelerinden Kara Delik Oluşumu: Gravitasyonel Dalga Çıkarımı ve Sayısal Modelleme

Nisa Çoşkun ■ Kadri Yakut
Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü



Özet

Bu çalışmada, her biri izole ADM/gravitasyonel kütle olarak $1.7 M_{\odot}$ hedeflenen, boyutsuz spinleri sıfır ve iç akışları irrotasyonel iki nötron yıldızının birleşmesi üç boyutlu sayısal görelilik yöntemleriyle incelenmiştir. Başlangıç verisi FUKA/KADATH ile bu fiziksel sistem için üretilmiş, ardından Einstein Toolkit içinde uzay–zaman ve genel görelilikli hidrodinamik denklemleri birlikte evrilmiştir. Öncü simülasyon, yaklaşık 4.55 koordinat çevrimi sonrasında temas göstergesini; birleşmeden kısa süre sonra ise ortak görünür ufku göstermektedir. İlk doğrulanmış ortak görünür ufuk $t = 2867.2 M_{\text{tot}}$ 'de bulunmuş, temiz veri $t = 3036.8 M_{\text{tot}}$ 'ye kadar sürmüştür. Baskın Ψ_4^{22} modu çeşitli sonlu yarıçaplarda çıkarılmış; FFI ile elde edilen h_{22} yalnız yönetsel bir tanı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada LIGO–Virgo–KAGRA veya başka bir dedektörün gözlem verisi kullanılmamıştır; gözlemsel bağlantı, sayısal dalga biçiminin gelecekte dedektör modelleriyle karşılaştırılabilmesine dayanmaktadır.

1. Giriş

Çift nötron yıldız sistemleri, güçlü gravitasyonel alanları ve nükleer yoğunluk koşullarında maddeyi aynı olay içinde sınavan başlıca çoklu-haberci kaynaklardır. Yörüngesel enerji ve açılal momentumun gravitasyonel dalgalarla taşınması sistemi yakınlaştırır; son yörüngelerde yıldızlar temas eder ve şoklanma, diferansiyel dönme ile güçlü alan dinamikleri kalıntının kade-rini belirler^[7,11]; kilonova modelleri bu sürecin çoklu-haberci bağlamını tamamlar^[12].

Toplam kütleli hal denkleminin destekleyebileceği sınırın yeterince üzerinde olan sistemlerde birleşme sonrası kalıntı kısa zaman ölçeğinde kara deliğe çökebilir. Bunun güvenilir biçimde gösterilmesi, yalnız merkez yoğunluğuna değil; zaman ilerleme fonksiyonu (lapse), kısıt tanıları, görünür ufuk ve dalga çıkarımı gibi birbirinden bağımsız ölçütlere birlikte bakılmasını gerektirir.

Bu çalışma, $1.7 + 1.7 M_{\odot}$ eş-kütleli sistem için FUKA başlangıç verisinden başlayarak birleşme ve ortak görünür ufuk oluşumuna ulaşan denetlenabilir bir iş akışını sunmaktadır. Hazır bir galeri sonucunun yeniden çizimi değil, bu çalışma için hesaplanan başlangıç çözümünün Einstein Toolkit ile evrimi-dir.

Temel soru: Birleşme sonrası yoğunluk ve uzay–zaman tanıları, ortak görünür ufukla tutarlı bir kara delik oluşumunu gösteriyor mu; çıkarılan Ψ_4^{22} dalgası sonlu yarıçaplar arasında ne ölçüde tutarlıdır?

2. Teorik altyapı

Geometrik birimlerde ($G = c = 1$) Einstein alan denklemleri

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

ile, mükemmel akışkan için enerji–momentum ve baryon sayısı korunumu

$$\nabla_{\mu} T^{\mu\nu} = 0, \quad \nabla_{\mu} (\rho_0 u^{\mu}) = 0$$

biçiminde yazılır. $3 + 1$ ayrıştırmasında uzay–zaman; lapse α , kayma vektörü β^i , uzaysal metrik γ_{ij} ve dışsal eğrilik üzerinden evrilir. Bu çalışmada BSSN formülasyonunun ML_BSSN gerçekleştirmesi kullanılmıştır^[4].

Soğuk başlangıç yıldızları tek parçalı politropik hal denklemiyle tanımlanmıştır:

$$P = K \rho_0^{\Gamma}, \quad \Gamma = 2, \quad K = 123.6133145.$$

Bu tercih kontrollü bir yöntem sınaması ve çökme senaryosu sağlar; gerçekçi, sıcaklık ve bileşim bağımlı bir nükleer hal denkleminin yerini tutmaz. Gravitasyonel ışının Weyl skaleri üzerinden çıkarılmıştır. Kullanılan işaret konvansiyonuna bağlı olarak

$$\Psi_4^{22} \propto \frac{d^2}{dt^2} (h_+^{22} - i h_{\times}^{22}).$$

Bu nedenle Ψ_4 'ün iki kez zaman integrasyonu gerinimi verir; düşük frekanslı sürüklenmeyi sınırlamak amacıyla sabit frekanslı integrasyon (FFI) kullanılmıştır^[8].

Kütle oranı ve spin etkileri, karşılaştırmalı çift kara delik dalga-biçimi taramalarında incelenmiştir^[9,10]; mevcut BNS öncü modellemesinde bu değişkenler $q = 1$ ve $\chi_1 = \chi_2 = 0$ olarak sabittir.

3. Sayısal yöntem ve yeni simülasyonlar

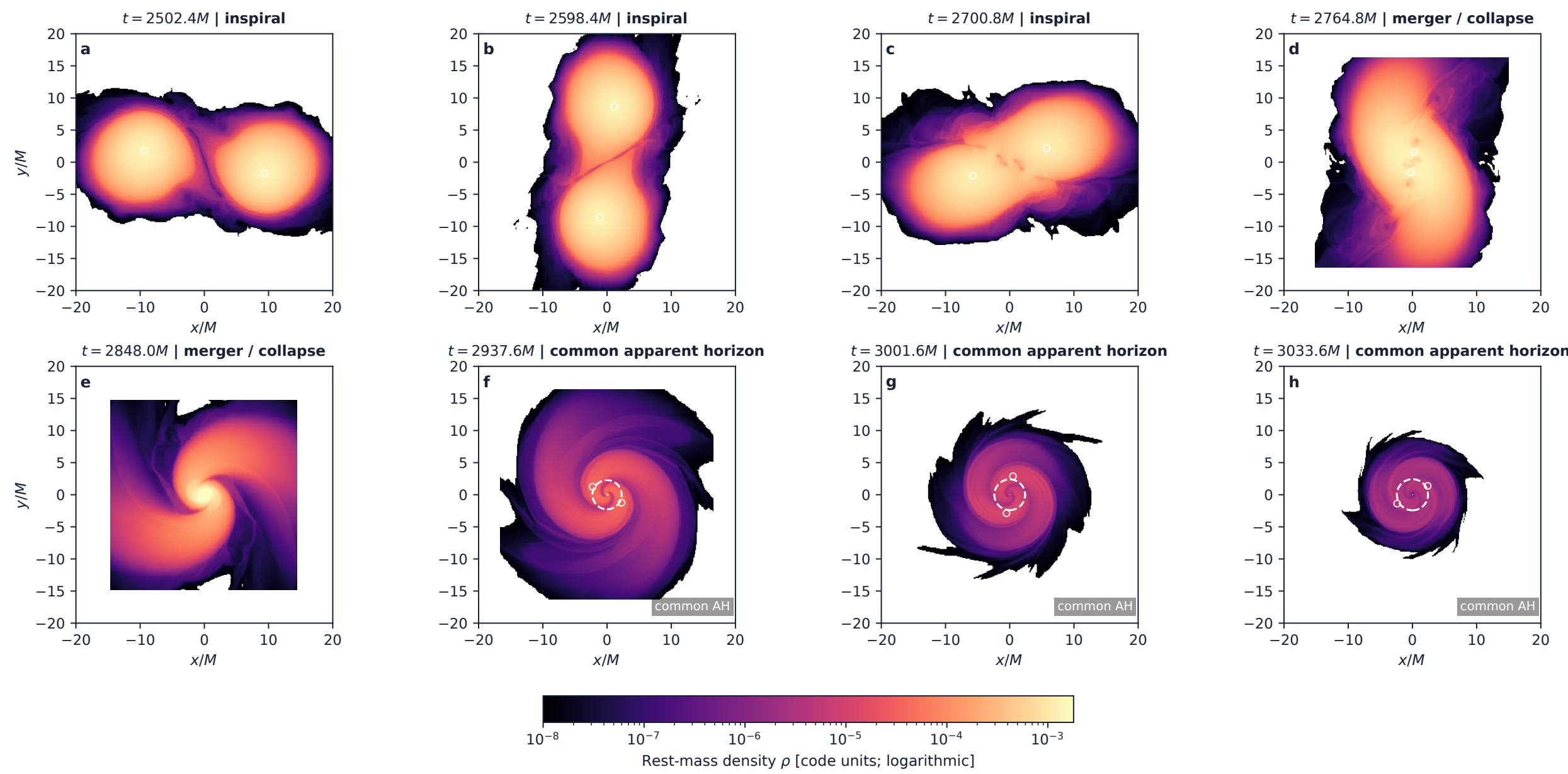
Başlangıç verisi FUKA'nın spektral eliptik çözücülerle üretilmiştir^[1]. FUKA alanları KadathImporter aracılığıyla Einstein Toolkit Hypatia (ET_2026_05) sürümüne aktarılmıştır^[2,3]. Uzay–zaman ML_BSSN, akışkan ise GRHydro ile evrilmiştir. Sayısal akı için HLLE, yeniden yapılandırma için geliştirilmiş PPM, zaman integrasyonu için dördüncü mertbe Runge–Kutta kullanılmıştır.

Nicelik	Değer ve bilimsel tanım
Bileşen kütleleri	$M_1^{\text{ADM,iso}} = M_2^{\text{ADM,iso}} = 1.7 M_{\odot}$
Kütle ölçeği	$M_{\text{tot}} = 3.4 M_{\odot}$; hedef izole kütlelerin toplamı
Kütle oranı	$q = 1$
Dönme / akış	$\chi_1 = \chi_2 = 0$; spinsiz ve dönmesiz
Başlangıç ayırımı	$d = 34 = 10 M_{\text{tot}} \simeq 50.2 \text{ km}$
Hal denklemi	$\Gamma = 2, K = 123.6133$
Başlangıç çözümü	FUKA R09; dışmerkezlik azaltma aşaması etkin
Örgü	İki hareketli, yedi düzeyli AMR hiyerarşisi
Izgara aralığı	$\Delta x_{\text{coarse}} = 8 M_{\text{tot}}; \Delta x_{\text{fine}} = 0.125 M_{\text{tot}} \simeq 0.628 \text{ km}$

Uzaysal türevler dördüncü mertbedir; Courant katsayısı başlangıçta 0.4, çökme sonrası devam kolunda 0.2'dir. Hesaplama 180° dönme ve z -yansıma simetrilерinden yararlanmıştır. Görünür ufuk AHFinderDirect, ufuk nicelikleri QuasiLocalMeasures, gravitastonel dalga ise WeylSca14/Multipole ile izlenmiştir^[5,6].

Kütle notu: Buradaki $1.7 M_{\odot}$ değerleri FUKA girdisindeki her bir izole yıldızın hedef ADM/gravitasyonel kütesidir; baryonik kütle değildir. $3.4 M_{\odot}$ grafik normalizasyon ölçeğidir ve ayrıca ölçülmüş ikili-sistem ADM kütesi olarak sunulmamıştır.

Birleşme ve kara delik oluşumunun uzaysal görünümü



Şekil 1. Birleşme çevresindeki sekiz seçilmiş zamanda xy düzlemindeki özkütle dağılımı. Paneller $t = 2502.4\text{--}3033.6 M_{\text{tot}}$ aralığını, yani yaklaşık 41.9–50.8 ms'yi kapsar. $t = 2704 M_{\text{tot}}$ temas göstergesinden sonra yoğunluk çekirdekleri birleşir; beyaz eğri ortak görünür ufku gösterir. Logaritmik renk ölçeği nicel kütle hesabı değildir.

4. Sonuç ve tartışmalar

Temiz tanı serisi $t = 32\text{--}3036.8 M_{\text{tot}}$ aralığını kapsar; son zaman $M_{\text{tot}} = 3.4 M_{\odot}$ için 50.86 ms'dir. $t = 3040 M_{\text{tot}}$ anında sayısal ıraksama (NaN) nedeniyle bu nokta analiz dışı bırakılmıştır.

Koordinat ayrımının $12 M_{\text{tot}}$ 'ye düştüğü temas göstergesi $t = 2704 M_{\text{tot}}$ 'de (45.28 ms) gerçekleşmiştir. Bu ana kadarki birikimli faz 4.55 koordinat çevrimidir; ayar-bağımsız yörünge sayısı değildir.

İlk doğrulanmış ortak görünür ufuk

$$t_{\text{AH}} = 2867.2 M_{\text{tot}} \simeq 48.02 \text{ ms}$$

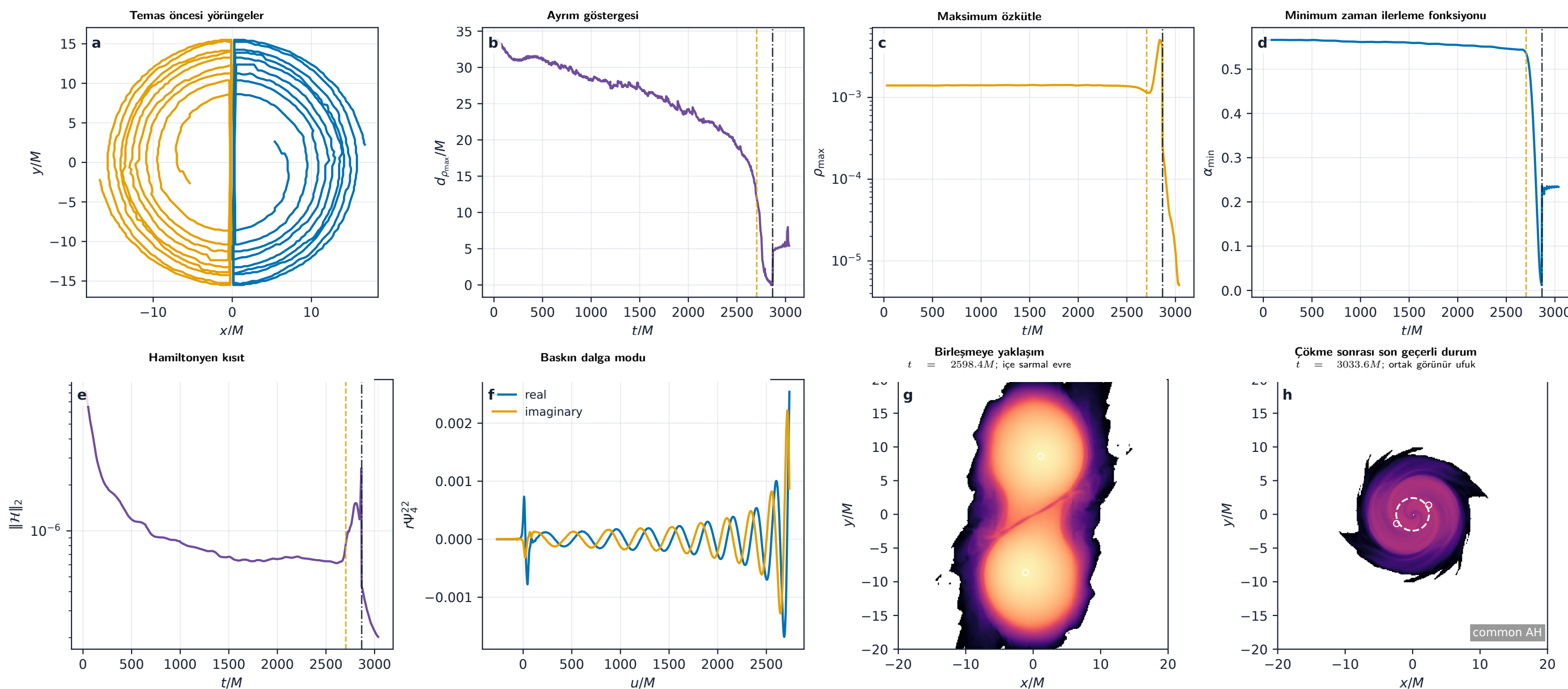
zamanında bulunmuştur. Ufuk örnekleri boyunca alan %3.6, indirgenemez kütle %1.8 artmıştır. Son temiz zamanda $\alpha_{\text{min}} = 0.234$ ve Hamiltonyen kısıdın L_2 normu 2.02×10^{-7} 'dir. Maksimum özkütle başlangıcın %0.363'üne düşmüştür; bu değer ortak ufuk ve lapse ile birlikte yorumlanmıştır. $r = 250 M_{\text{tot}}$ ile $r = 300 M_{\text{tot}}$ Ψ_4^{22} serilerinin görelî L_2 farkı %2.33, faz farkı 0.007 radyandır. $r = 200 M_{\text{tot}}$ için değerler %5.61 ve 0.030 radyandır. Bu karşılaştırma sonlu-yarıçap tutarlılık tanısıdır; sonsuz-yarıçap ekstrapolasyonu değildir.

Temel sonuç: Yoğunluk çekirdeklerinin birleşmesi, lapse çöküşü ve ortak görünür ufuk birlikte, bu $1.7 + 1.7 M_{\odot}$ öncü çalışmasında birleşme sonrası kara delik oluşumunu göstermektedir.

Sınırlılıklar

Tek FUKA R09 ve tek ET-L çözünürlüğü kullanılmıştır. Yakınsama serisi, gerçekçi nükleer hal denklemi, nötrino/manyetik alan fiziği, sonsuz-yarıçap dalga ekstrapolasyonu ve dedektör eşleştirmesi tamamlanmadan sonuçlar nicel astrofiziksel kestirim olarak kullanılmamalıdır.

Simülasyonun özeti



Şekil 2. Birleşme simülasyonunun birbirini tamamlayan sekiz tanısı: temas öncesi koordinat yörüngeleri, ayırım göstergesi, maksimum özkütle, minimum zaman ilerleme fonksiyonu, Hamiltonyen kısıdın L_2 normu, baskın $r\Psi_4^{22}$ modu, birleşmeye yaklaşım ve ortak görünür ufuk içeren son temiz yoğunluk haritası. Turuncu kesikli çizgi $t = 2704 M_{\text{tot}}$ temas göstergesini, siyah kesik-noktalı çizgi ilk doğrulanmış ortak görünür ufku ($t = 2867.2 M_{\text{tot}}$) gösterir. Şekil, yoğunluk ve uzay–zaman tanıların aynı fiziksel yorumu desteklediğini özetler; çözünürlük yakınsaması ya da dedektör gerinimi değildir.

Referanslar

- [1] Papenfort ve ark., *Phys. Rev. D* **104**, 024057 (2021).
- [2] Löffler ve ark., *Class. Quantum Grav.* **29**, 115001 (2012).
- [3] Einstein Toolkit Consortium, *HyPatia, ET_2026_05* (2026).
- [4] Baumgarte ve Shapiro, *Phys. Rev. D* **59**, 024007 (1998).
- [5] Schnetter, Hawley ve Hawke, *Class. Quantum Grav.* **21**, 1465 (2004).
- [6] Thornburg, *Class. Quantum Grav.* **21**, 743 (2004).
- [7] Baiotti ve Rezzolla, *Rep. Prog. Phys.* **80**, 096901 (2017).
- [8] Reisswig ve Pollney, *Class. Quantum Grav.* **28**, 195015 (2011).
- [9] Özbakır ve Yakut, *Turkish J. Astron. Astrophys.* **4**(S13), 57–66 (2023), doi:10.55064/tjaa.1203577.
- [10] Özbakır ve Yakut, *Physics and Astronomy Reports* **3**(2), 81–93 (2025), doi:10.26650/PAR.2025.00009.
- [11] Çökük, Yakut ve Giacomazzo, *MNRAS* **527**, 8043–8053 (2024), doi:10.1093/mnras/stad3752.
- [12] Çökük ve Yakut, *Turkish J. Astron. Astrophys.* **6**(S1), 70–75 (2025), doi:10.55064/tjaa.1592681.