



Nümerik Rölativistik Simülasyonlar Kara Delik–Nötron Yıldızı Birleşmelerinin İncelenmesi

Alp Saltık ■ Kadri Yakut

Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü



Özet

Bu çalışmada, başlangıçtan itibaren bir kara delik içeren $4.0 + 1.2 M_{\odot}$ kara delik–nötron yıldızı sisteminin son yörüngeleri, nötron yıldızının gravitasyonel parçalanması ve maddenin kara delik tarafından yakalanması üç boyutlu sayısal görelilik yöntemiyle incelenmiştir. Bu fiziksel sistem için başlangıç verisi FUKA/KADATH ile hesaplanmış, ardından Einstein Toolkit içinde uzay–zaman ve genel görelilikçi hidrodinamik denklemleri birlikte evrilmiştir. Temiz hesaplama $t = 787.5 M_{\text{tot}}$ zamanına ulaşmıştır; bu değer yaklaşık 20.2 ms 'ye karşılık gelmektedir. Yoğunluk ve ızgara üzerindeki baryonik durgun kütle azalması, görünür ufuk alanı ve indirgenemez kütledeki artışla aynı geç evrim aralığında gözlenmiştir. Baskın Ψ_4^{22} modu sonlu yarıçaplarda çıkarılmış, sabit frekanslı integrasyonla elde edilen h_{22} yalnız keşifsel bir tanı olarak kullanılmıştır.

1. Giriş

Kara delik–nötron yıldızı çiftleri, güçlü gravitasyonel alanlar ile nükleer yoğunluktaki maddenin aynı olayda etkileştiği olası gravitasyonel dalga kaynaklarıdır. Sistemin son durumu; kütle oranı, kara delik spini, nötron yıldızının kompaktlığı ve hal denklemi tarafından belirlenir^[7,9,10]. Gravitasyonel gradyent bozunumu kara deliğin en kararlı yörüngesinin dışında gerçekleşirse madde kuyruğu ve bağlı bir kalıntı oluşabilir; daha içte gerçekleşirse yıldız büyük ölçüde doğrudan yakalanabilir^[7].

Bu koşullarda noktasal parçacık yaklaşımı yeterli değildir. Einstein alan denklemleri, akışkanın korunum yasaları, hareketli uyarlamalı ağ, görünür-ufuk izleme ve dalga çıkarımı aynı hesaplama içinde yürütülmelidir. Ayrıca “birleşme” yorumu tek bir değişkene dayandırılmamalı; madde, ufuk ve dalga tanılarının zaman bakımından tutarlılığı sınanmalıdır. Yüksek kütleli BNS ve kilonova çalışmaları nötron yıldızlı birleşmeler için komşu madde/çoklu-haberci bağlamı sağlar^[11,12]; buradaki hesap ise ayrı bir BHNS başlangıç-değer problemidir.

Burada $q_{\text{NS/BH}} = 0.30$ ve sıfır spinli, çalışmaya özgü bir BHNS sistemi ele alınmıştır. Amaç, bu belirli başlangıç koşullarında nötron yıldızının gravitasyonel gradyent bozunumunu ve mevcut kara deliğin büyümesini izleyen denetlenebilir bir öncü hesaplama üretmektir.

Temel soru: Yoğunluk, baryonik durgun kütle, görünür ufuk ve Ψ_4^{22} tanıları birlikte değerlendirildiğinde, nötron yıldızının bozulup mevcut kara delik tarafından yakalandığı sonucunu destekliyor mu?

2. Teorik altyapı

Geometrik birimlerde ($G = c = 1$) uzay–zaman ve madde

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}, \quad \nabla_{\mu} T^{\mu\nu} = 0, \quad \nabla_{\mu}(\rho_0 u^{\mu}) = 0$$

denklemleriyle tanımlanır. $3 + 1$ ayrıştırmasında zaman ilerleme fonksiyonu (lapse) α , kayma vektörü β^i , uzaysal metrik γ_{ij} ve dışsal eğrilik evrilir. Bu çalışmada kısıt sönümlemeli CCZ4 formülasyonunun ML_CCZ4 gerçekleştir-mesi kullanılmıştır^[5].

Başlangıç yıldızı soğuk politropik hal denklemiyle tanımlanmıştır:

$$P_{\text{cold}} = K \rho_0^{\Gamma}, \quad \Gamma = 2, \quad K = 100.$$

Evrimde şokla ısınmayı yaklaşık temsil eden $\Gamma_{\text{th}} = 2$ ısı katkısı eklenmiştir. Bu basitleştirilmiş model, yöntem sınaması için uygundur; sıcaklık ve bileşim bağımlı nükleer hal denkleminin yerini tutmaz.

Gravitasyonel parçalanma, kabaca diferansiyel gerilme yarıçapı r_{tid} ile kara deliğin güçlü alan yörünge ölçeklerinin karşılaştırılmasıyla anlaşılır:

$$r_{\text{tid}} \sim R_{\text{NS}} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{M_{\text{NS}}} \right)^{1/3}.$$

Bu ifade yalnız nitel bir ölçektir; genel görelilikçi dinamik simülasyonun ye-rine kullanılmamıştır.

Gravitasyonel ısınım Weyl skaleriyle çıkarılmıştır. Kullanılan işaret konvansi-yonuna bağlı olarak

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

İki kez zaman integrasyonunda oluşabilecek düşük frekanslı sürüklenmeyi sınırlamak amacıyla sabit frekanslı integrasyon (FFI) kullanılmıştır^[8].

3. Sayısal yöntem ve yeni simülasyon

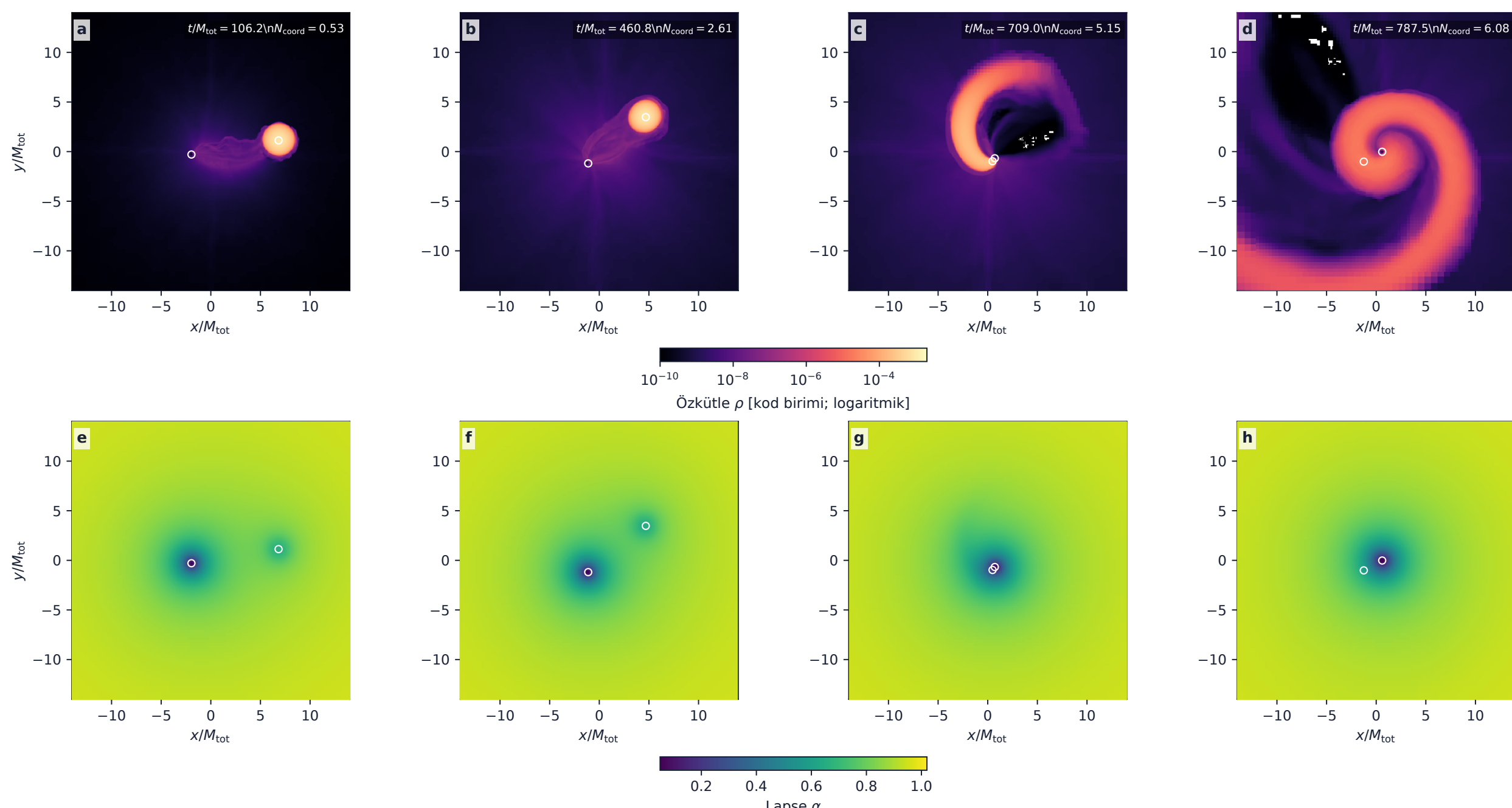
Başlangıç verisi FUKA'nın spektral eliptik çözücülerile bu sistem için üretilmiş^[1], alanlar KadathImporter ile Einstein Toolkit Hypatia (ET_2026_05) sürümüne aktarılmıştır^[2,3]. Uzay–zaman ML_CCZ4, akışkan IllinoisGRMHD ile evrilmiştir^[4,5]. Dördüncü mertbe uzaysal türevler, RK4 zaman integrasyonu ve sekiz düzeyli hareketli AMR kullanılmıştır. Gö-rünür ufuk AHFinderDirect, ufuk nicelikleri QuasiLocalMeasures ile izlenmiştir^[6].

Nicelik	Değer ve bilimsel tanım
Kara delik	$M_{\text{BH}}^{\text{ch}} = 4.0 M_{\odot}$; Christodoulou kütlesi
Nötron yıldızı	$M_{\text{NS}}^{\text{ADM,iso}} = 1.2 M_{\odot}$; izole hedef ADM/gravitasyonel kütle
Kütle ölçęi	$M_{\text{tot}} = 5.2 M_{\odot}$; bileşen hedef kütlelerinin toplamı
Kütle oranı	$q_{\text{NS/BH}} = 0.30$
Spinler	$\chi_{\text{BH}} = \chi_{\text{NS}} = 0$
Başlangıç ayrımı	$d = 46.8 = 9 M_{\text{tot}}$
Hal denklemi	$\Gamma = 2, K = 100; \Gamma_{\text{th}} = 2$

Uzaysal koordinat alanı ± 672 kod birimini kapsar; Courant katsayısı $0.4'$ tür. Parametre dosyasının teknik omurgası yerleşik ET/FUKA yöntemleriyle uyumludur, ancak kütleler, ayırım ve başlangıç çözümü bu çalışma için yeni-den oluşturulmuştur.

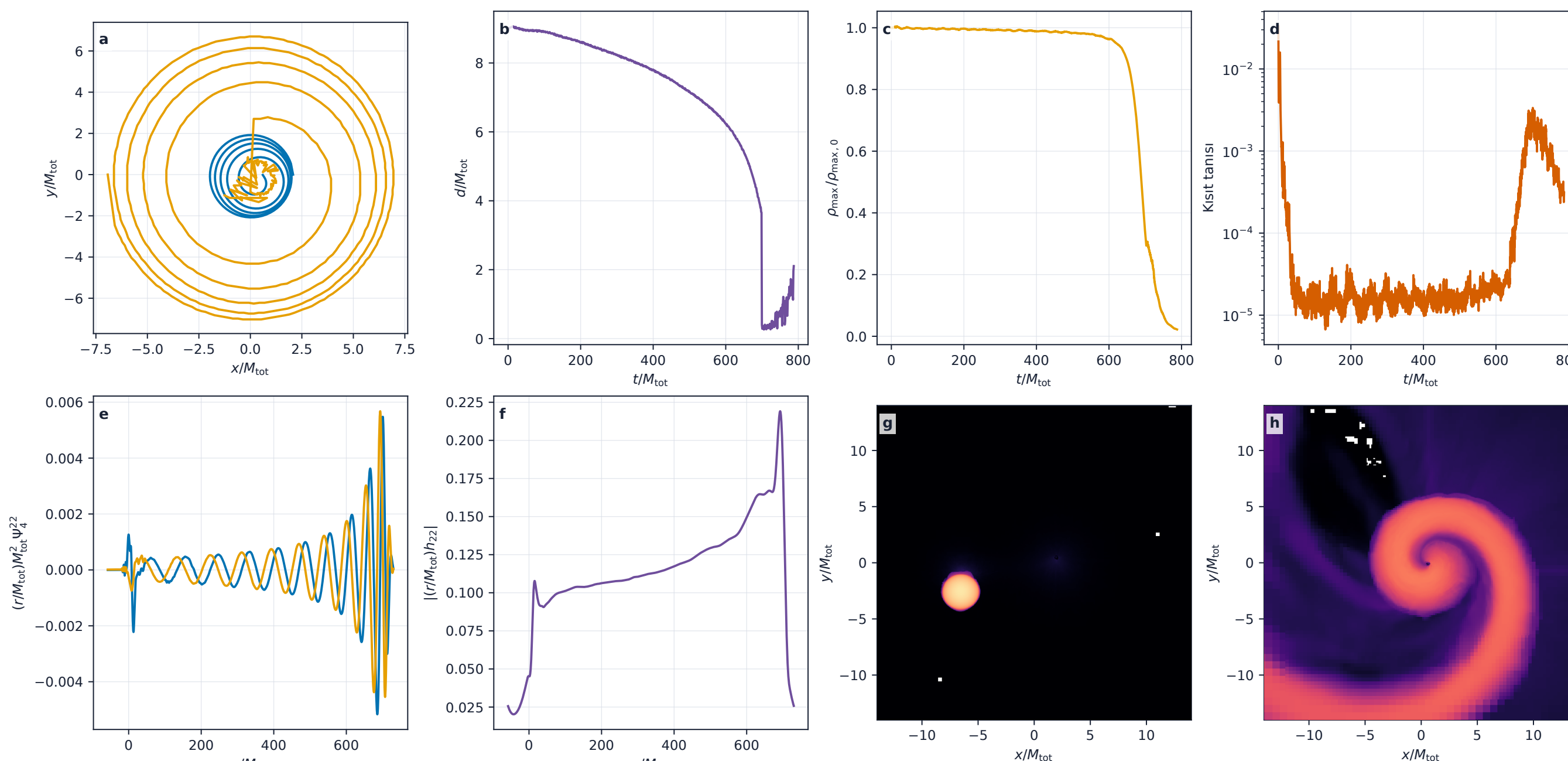
Kütle notu: $5.2 M_{\odot}$, grafiklerin normalizasyonunda kullanılan hedef bileşen kütleleri toplamıdır; ayrıca ölçülmüş ikili-sistem ADM kütlesi değildir. Nötron yıldızının $1.2 M_{\odot}$ değeri baryonik kütle olarak yorumlanma-malıdır.

Gravitasyonel Parçalanma ve Madde Yakalanmasının Uzaysal Görünümü



Şekil 1. Dört seçilmiş zamanda xy düzlemindeki özkütle (üst sıra) ve lapse (alt sıra) haritaları. Paneller erken yörüngeyi ($t/M_{\text{tot}} = 106.2$), geç yörüngeyi (460.8), yakalanma tanı penceresini (709.0) ve son temiz durumu (787.5) gösterir. Beyaz işaretler kara delik tekiliğini sayısal olarak temsil eden puncture konumu ile en yoğun madde noktasını belirtir.

Simülasyonun bilimsel özeti



Şekil 2. Birbirini tamamlayan sekiz tanı: kara delik ve yoğunluk tepesinin koordinat yolları, koordinat ayrımı, normalize maksimum özkütle, Hamiltonyen kısıt tanısı, baskın Ψ_4^{22} modu, keşifsel FFI h_{22} genlik vekili ve başlangıç/son özkütle haritaları. Geç zamandaki hızlı yoğunluk kaybı, dalga tepe yapısı ve madde kuyruğu aynı evrim aşamasına işaret eder.

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] Etienne ve ark., *Class. Quantum Grav.* **32**, 175009 (2015).
- [5] Alic ve ark., *Phys. Rev. D* **85**, 064040 (2012).
- [6] Thornburg, *Class. Quantum Grav.* **21**, 743 (2004).
- [7] Shibata ve Taniguchi, *Living Rev. Relativ.* **14**, 6 (2011).
- [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] Çokluk, Yakut ve Giacomazzo, *MNRAS* **527**, 8043–8053 (2024), doi:10.1093/mnras/stad3752.
- [12] Çokluk ve Yakut, *Turkish J. Astron. Astrophys.* **6**(S1), 70–75 (2025), doi:10.55064/tjaa.1592681.