

Kütle Aktaran Milisaniye X-Işını Pulsarlarının Evrim Yollarında Olan Düşük Kütleli X-Işını Çiftlerindeki Çift Ve Nötron Yıldızı Evrimi

N. Niang¹ Ü. Ertan¹ A. A. Gençali¹ F. Ertuğrul¹ A. Ulubay² E. Devlen³ M. A. Alpar¹¹Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye²İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye³Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye

I: Giriş

Kütle aktaran milisaniye X-ışın pulsarların keşfi (AMXP'ler), Düşük Kütleli X-Işın Çiftlerinde (LMXB'ler) hızlandırılmış radyo milisaniye pulsarları (RMSP'ler) arasında evrimsel bağlantıların varlığını ortaya koymuştur. Gözlemlenen AMXP'ler, yörünge periyodu (P_{orb}) ve eş yıldız özelliklerine bağlı olarak üç farklı gruba ayrılabilir (bkz. Tablo 1). Çalışmalar, bu AMXP gruplarının LMXB'lerden farklı evrimsel yolları takip ederek evrimleştiğini önermiştir (Deloye, 2007). Bu yollar, MESA (Paxton et al., 2015) gibi olan yıldız evrim kodları kullanılarak incelenabilmektedir. AMXP'lerin oluşum ve evrimi üzerine yapılan çalışmaların çoğu, nötron yıldızının (NS) evrimini göz ardı ederek, çift yıldız ve eş yıldız evrimine odaklanmıştır (Istrate et al., 2014; Sengar et al., 2017; He et al., 2019). NS evrimini dahil ederek AMXP evrimini inceleyen ilk çalışma Kar et al. (2024) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise çift sistem ve NS evrimi birlikte incelenmektedir. NS'nin dönme özelliklerinin uzun vadeli evrimini araştırmak amacıyla MESA kullanarak model çift yıldızları evrimleştirilmekte, çift yıldız ile eş yıldız çıktıları modelimizde girdi olarak kullanılmaktadır. NS dönme evrimi için yararlanılan model; iç disk yarıçapı hesaplamalarını, tork tersinmelerini ve LMXB'lerin dönme fazlarını açıklayabilen analitik bir modeldir (Ertan, 2021).

Tablo 1. Grup bazında donör yıldız kütleleri (M_2), P_{orb} ve ortalama NS periyotları ($\langle P \rangle$). MS: Anadol yıldızı, BD: Kahverengi cüce, WD: Beyaz cüce.

Parametre	Grup 1	Grup 2	Grup 3
#	9	4	10
Donör tipi	MS	BD	WD
M_2 ($M_{\odot}$)	0.1 – 0.5	~ 0.01	~ 0.001
P_{orb} (sa)	3 – 19	1 – 3	< 1.2
$\langle P \rangle$ (ms)	~ 2.2	~ 2.5	~ 5.2

II: AMXP Yollarındaki LMXB'lerde Çift Yıldız Evrimi

MESA ile Çift Yıldız Evrimi

Yörünge açısal momentumundaki değişime katkıda bulunan üç tork mekanizması; kütle kaybı, kütleçekimsel dalga ışınımı (GR) ve manyetik frenlemedir (MB). Van et al. (2019) tarafından geliştirilen ve gözlemlenen LMXB kütle aktarım oranlarıyla uyumlu sonuç üreten konveksiyonla güçlendirilmiş MB modeli kullanılmaktadır. Model çift yıldızların evrimi, NS bir nokta kütle olarak alınmış ve eş yıldız güneş metalitesinde olacak şekilde incelenmektedir. Evrimsel yollarımızın her biri için seçilen başlangıç parametreleri aralığı aşağıdaki tabloda özetlenmiştir. Bir evrimsel yolun AMXP'ler için geçerli sayılması için bir Hubble süresi içinde şu 4 şartı eş zamanlı sağlaması gerekmektedir: **(i) Geçici fazı:** Evrim sonunda sistemin geçici X-ışını evresinde olması. **(ii) $M_2 - R_2$:** Eş yıldız kütle-yarıçap ilişkisinin ilgili AMXP tipleriyle uyumu. **(iii) Yüzey Bileşimi:** MS/BD eş yıldızlar için He-fakir, He WD'ler için He-zengin olması. **(iv) Nihai Değerler:** M_2 ve P_{orb} değerlerinin gözlemlenen grup aralıklarında kalması. Bu koşulu değerlendirmek için bir LMXB kataloğundan (Avakyan et al., 2023) yararlanılacaktır.

Tablo 2. Çift yıldız evrimindeki parametrelerin başlangıç değerleri: $M_{1,i}$ NS'nin ilk kütle, $M_{2,i}$ eş yıldızın ilk kütle, γ_{mb} manyetik frenleme indeksi, β ise kütle aktarım verimini belirleyen parametredir.

Parametre	$M_{1,i}$ ($M_{\odot}$)	$M_{2,i}$ ($M_{\odot}$)	β	γ_{mb}	$P_{\text{orb,i}}$ (gün)		
					BD	UCXB	MS
Kanonik değerler	1.4	1.1	0.5	3	0.5–1.7	1.8–2.45	2.5–3.0
Aralık / değerler	1.2, 1.3, 1.4	0.8–1.5	0.1–0.9	2, 3, 4, 5		0.5–3.5	

Çift Yıldız Evrimi Sonuçları

Üç AMXP grubu için elde ettiğimiz evrim yolları BD-yolu (G2), UCXB-yolu (G3) ve MS-yolu (G1) olarak adlandırılmaktadır (bkz. Şekil 1, 2). Sonuçlarımız, yukarıda bahsedilen 4 koşulun eş zamanlı olarak sağlandığını göstermektedir (Şekil 1, 2). Bu sonuçlar AMXP'lerin gözlemlenen P_{orb} ve M_2 değerleriyle karşılaştırılmaktadır. $P_{\text{orb,i}}$ değeri 0.5 ile 3.1 gün arasında 0.1 adımlarla artırılarak tüm AMXP kaynaklarıyla uyumlu evrim yolları elde edilmiştir ve $P_{\text{orb,i}}$ 'ye olan hassasiyet Şekil 2a'da görülmektedir. Sonuçlarımız diğer çift yıldız (γ_{MB} ve β) parametrelerine çok hassas değildir. Elde edilen kütle aktarım geçmişleri, hem LMXB'lerin hem de AMXP'lerin gözlemlenen X-ışın parlaklıklarıyla uyumludur. Çift yıldız evriminden elde edilen $\dot{M}_1$ (Şekil 1) ve M_1 değerleri, NS evrimini incelemek için aşağıda anlatılan analitik modelde girdi olarak kullanılmaktadır.

Analitik Model (Ertan, 2021)

Nötron yıldızı evrimi için kullanacağımız analitik tork modelinde üç temel dönme evresi bulunmaktadır: güçlü pervane (SP), zayıf pervane (WP) ve hızlanma fazı (SU). Bu fazların detayı Tablo 3'te özetlenmiştir. Durağan bir SP fazının sağlanabilmesi için en büyük iç disk yarıçapı, diskin kütle aktarım oranı $\dot{M}_{\text{in}}$, yıldızın dipol momenti μ ve NS dönme periyodu P 'ye bağlı olarak, $R_{\text{in,max}}^{25/8} [1 - R_{\text{in,max}}^{-3/2}] \simeq 0.22 \alpha_{\text{visc,-1}}^{2/5} M_{1.4}^{-7/6} \dot{M}_{\text{in},16}^{-7/20} \mu_{26} P_{\text{ms}}^{-13/12}$ denkleminde hesaplanmaktadır. Burada $R_{\text{in,max}} = r_{\text{in,max}}/r_{\text{co}}$, $r_{\text{co}} \simeq (GM_1 P^2)^{1/3}$, $\alpha_{-1} = (\alpha/0.1)$ kinematik viskozite parametresi, $M_{1.4} = (M_1/1.4 M_{\odot})$, $\dot{M}_{\text{in},16} = (\dot{M}_{\text{in}}/10^{16} \text{ g s}^{-1})$, $\mu_{26} = (\mu/10^{26} \text{ G cm}^3)$ ve $P_{\text{ms}} = (P/1 \text{ ms})$.

- İç disk yarıçapı $r_{\text{in}} = \eta r_{\text{in,max}}$ ile belirlenir ($\eta \lesssim 1$)
- $\dot{M}_{\star}$ yıldız yüzeyine akan $\dot{M}$
- $B = \mu/r_{\star}^3$
- $\Gamma_{\text{acc}} = \sqrt{GM_{\text{in}} \dot{M}_{\star}}$
- $\Gamma_{\text{D}} = -(\mu^2/r_{\text{in}}^3)(\Delta r/r_{\text{in}})$
- $\Gamma_{\text{dip}} = -16\pi^3 \mu^2/3c^3 P^3$

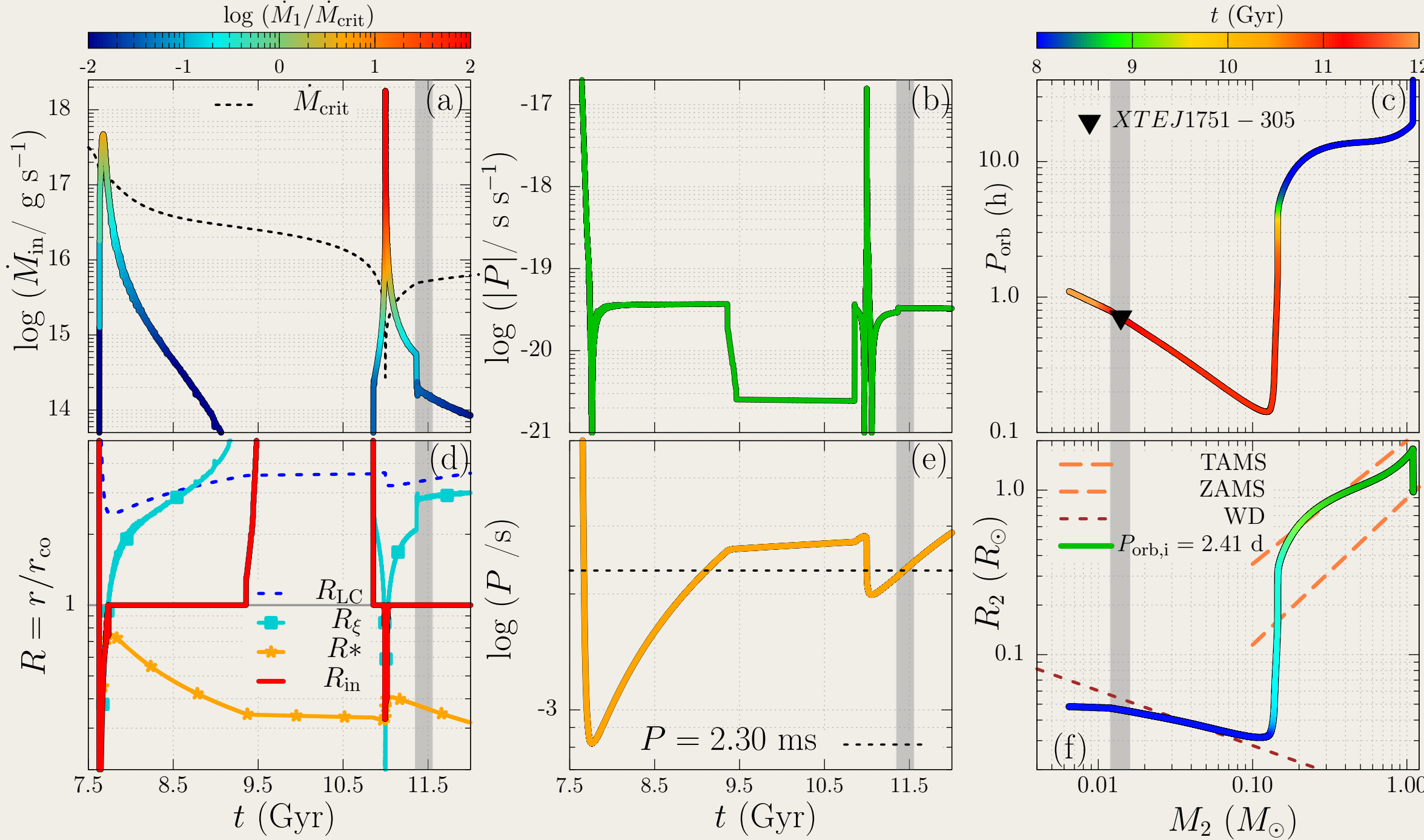
Tablo 3. SP, WP ve SU fazlarında iç yarıçap koşulları ve tork hesaplamaları.

Güçlü pervane (SP)	Zayıf pervane (WP)	Hızlanma fazı (SU)
$\dot{M}_{\star} = 0$	$\dot{M}_{\star} = \dot{M}_{\text{in}}$	$\dot{M}_{\star} = \dot{M}_{\text{in}}$
$r_{\text{in}} > 1.26 r_{\text{co}}$	$r_{\text{in}} = r_{\text{co}}$	$r_{\text{in}} < r_{\text{co}}$
$\Gamma_{\text{tot}} = \Gamma_{\text{D}} + \Gamma_{\text{dip}}$	$\Gamma_{\text{tot}} = \Gamma_{\text{acc}} + \Gamma_{\text{D}} + \Gamma_{\text{dip}}$	$\Gamma_{\text{tot}} = \Gamma_{\text{acc}} + \Gamma_{\text{dip}}$

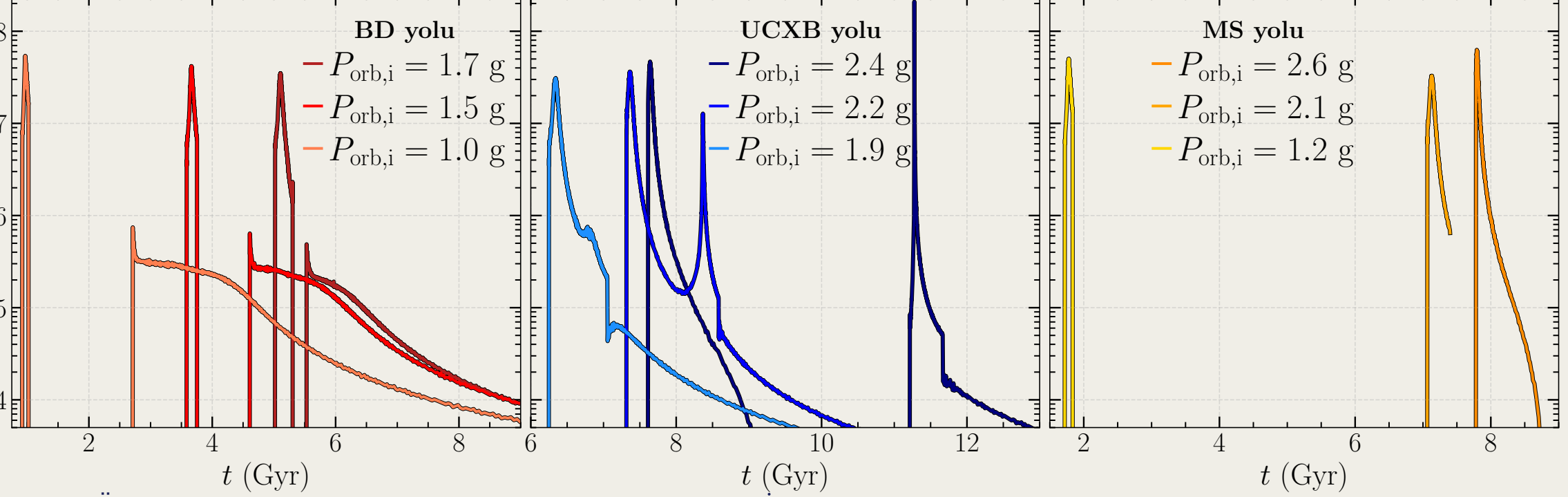
III: AMXP Yollarındaki LMXB'lerde Nötron Yıldız Evrimi

Nümerik hesaplamalar

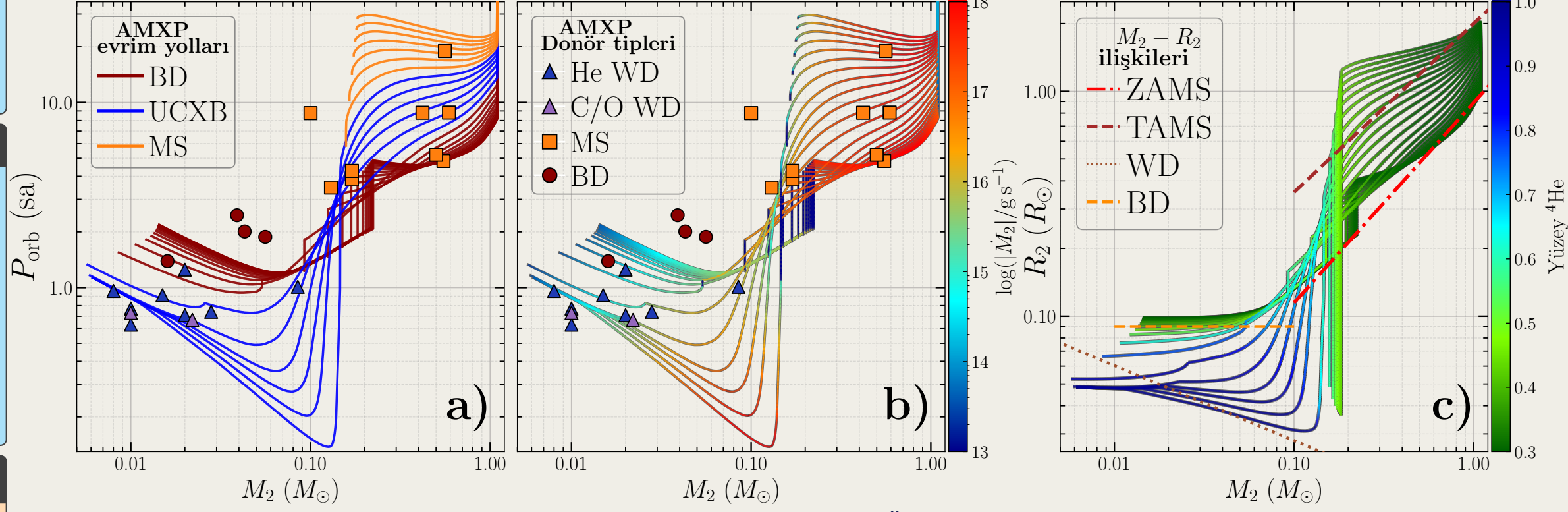
Hızlandırılmış pulsarların manyetik alanının, LMXB'lerin uzun dönemli evriminin erken evrelerinde sönümlendiği tahmin edilmektedir (Srinivasan, 2010). Alan nihayetinde $10^7 \text{ G} \lesssim B_{\text{min}} \lesssim 10^9 \text{ G}$ aralığındaki bir minimum B_{min} değerinde sabitlenmektedir. Hesaplamalarımızda bu B_{min} değeri kullanılmaktadır. MESA'dan alınan $\dot{M}_2$ verisi ile $\dot{M}_{\text{in}} = (1 - \beta)\dot{M}_2$ bağıntısı üzerinden hesaplanmaktadır. Analitik modelin parametreleri ise $\eta = 0.8$, $\Delta r/r_{\text{in}} = 0.2$, NS yarıçapı $r_{\star} = 12 \text{ km}$ ve başlangıç NS periyodu $P_1 = 100 \text{ s}$ olarak alınmıştır. Sonuçlarımız, üç evrimsel yola ait AMXP'lere uygulanmaktadır: BD yolu için HETE J1900.1-2455, UCXB yolu için XTE J1751-305 ve MS yolu için Aql X-1 kaynakları seçilmiştir. XTE J1751-305 kaynağı için $P_{\text{orb,i}} = 2.41 \text{ gün}$ ve $B = 7 \times 10^7 \text{ G}$ kullanılmıştır. $t \simeq 11.4 \text{ Gyr}$ anında evrimsel süreçteki model, gözlemlerle uyumlu sonuçlar üretmektedir. HETE J1900.1-2455 ve Aql X-1 kaynakları için $P_{\text{orb,i}}$ sırasıyla 1.7 ve 2.8 gün, B ise 5×10^7 ve $4 \times 10^8 \text{ G}$ olarak alınmıştır. Gözlemlerle karşılaştırıldığında, model sonuçlarımız ortalama olarak kaynakların gözlenen değerlerinden %15 veya daha az bir sapma göstermektedir (bkz. Tablo 4).



Şekil 3. XTE J1751-305'in çift yıldız ve dönme özelliklerinin evrimi. (a) $\dot{M}_{\text{in}}$ ve $\dot{M}_{\text{crit}}$ 'in (kesikli eğri) evrimi. Renk çubuğu $\dot{M}_1/\dot{M}_{\text{crit}}$ oranını göstermektedir. $\dot{M}_{\text{crit}} = 2.36 \times 10^{15} (M_1/1.4 M_{\odot})^{1/2} (M_2/M_{\odot})^{-1/5} (P_{\text{orb}}/\text{h})^{7/5} \text{ g s}^{-1}$. (b) P 'in evrimi. (c) M_2 'nin bir fonksiyonu olarak P_{orb} 'un evrimi. Renk çubuğu Gyr cinsinden zamanı göstermektedir. (d) R_{in} (düz eğri), R_{LC} (kesikli eğri), R_{c} (kareli düz eğri) ve $R_{\star}$ 'in (yıldızlı düz eğri) evrimi. (e) NS'nin P evrimi. (f) M_2 'nin bir fonksiyonu olarak R_2 'nin evrimi. Renk çubuğu, eş yıldız için yüzey helyum bolluğunun evrimini göstermektedir. Her bir panelde görülen dikey gri şeritler, XTE J1751-305'ün çift yıldız ve NS özelliklerinin eş zamanlı olarak elde edildiği zamanı göstermektedir.



Şekil 1. Üç farklı AMXP grubuna ait önemli kütle aktarım oranı (M_2) tarihçeleri. Kırmızı eğriler BD yolu, mavi eğriler UCXB yolu ve turuncu eğriler MS yolun evrimini göstermektedir.



Şekil 2. $0.5 \text{ g} < P_{\text{orb,i}} < 3.1 \text{ g}$ için elde edilen AMXP evrimsel yolları. (a) Üç temel evrim kolunu gösteren $M_2 - P_{\text{orb}}$ düzlemindeki çift sistem evrimi. Farklı donör tiplerine sahip gözlenen AMXP kaynakları karşılaştırma amacıyla üzerine işlenmiştir, LMXB kataloğu kullanılmıştır (Avakyan et al., 2023). (b) Kütle aktarım oranına ($\log(|M_2|/\text{g s}^{-1})$) göre renklendirilmiş $M_2 - P_{\text{orb}}$ evrimsel yolları. (c) Donör yüzey ^4He (Helyum) bolluğuna göre renklendirilmiş donör kütle-yarıçap ($M_2 - R_2$) evrimi.

Çift yıldız evrimin tartışması

BD, UCXB ve MS yolları, MB ve GR yoluyla gerçekleşen açısal momentum kaybı ile yönetilen farklı evrimsel yolları temsil etmektedir. BD ve UCXB yolları erken veya gecikmeli kütle aktarımı ile dejenere eş yıldızlara yol açarken, MS yolları evrimleşmiş MS eş yıldızlarıyla sonlanan UCXB yollarının LMXB evresine karşılık gelmektedir (Şekil 2a). Bu yolların her biri, AMXP'lerin dönme evrimini incelemek üzere kullanılan farklı bir M tarihçesi üretmiştir (Şekil 1). On altı MESA modeli ile yapılan parametre analizi sonucunda, $\dot{M}_1$ geçmişinin β 'dan ziyade γ_{mb} 'ye duyarlı olduğu ve $\gamma_{\text{mb}} = 3-5$ modellerinin kararlı evrimsel yollar ürettiği görülmüştür. Parametre analizinde, $M_{2,i}$ kütlelerine bağlı olarak $P_{\text{orb,i}}$ değerinde yapılan küçük ($\lesssim \%10$) yüzde ayarlamaları, farklı γ_{mb} değerlerinde benzer evrimsel eğriler sağlamıştır. Buna karşın, sabit bir $P_{\text{orb,i}}$ için farklı γ_{mb} değerleri nitel açıdan tamamen farklı evrimsel süreçlere yol açmıştır.

Tablo 4. Üç AMXP kaynağı için gözlenen özelliklerin ($P, \dot{P}, P_{\text{orb}}, M_2$ ve $\dot{M}_{\text{in}}$) model sonuçları ile karşılaştırılması. HETE J1900.1-2455 ve Aql X-1 için henüz uzun dönemli $\dot{P}$ ölçümü yapılmadığından dolayı, N/A olarak işaretlenmiştir.

Property	HETE J1900.1-2455	XTE J1751-305	Aql X-1
P (ms)	2.6504377 2.6504490	2.2971710 2.2968364	1.817289 1.817543
P_{orb} (sa)	1.39 1.41	0.71 0.81	18.95 19.90
M_2 ($M_{\odot}$)	0.016 0.017	0.014 0.011	0.56 0.38
$\dot{M}_{\text{in}}$ (g s^{-1})	N/A 8.6×10^{13}	$3.21^{+1.64}_{-1.83} \times 10^{14}$ 1.73×10^{14}	1.04×10^{17} 1.22×10^{17}
$\dot{P}$ (s s^{-1})	N/A 1.6×10^{-20}	2.9×10^{-20} 3.2×10^{-20}	N/A 6.1×10^{-19}
$t_{\text{çözüm}}$ (Gyr)	9.14	11.43	7.92

■ Gözlemlenen/Ölçülen değer ■ Modelde elde edilen değer

Nötron yıldız evrimin tartışması

Üç ana AMXP grubu boyunca gözlenen özelliklerle eşleşen çift sistem evrimleri elde ettik. MESA simülasyonlarından elde edilen $\dot{M}_{\text{in}}$ tarihçelerini tork modelimiz için girdi olarak kullanarak, seçilen temsilci kaynakların hem çift sistem (P_{orb}, M_2) hem de dönme ($P, \dot{P}$) özelliklerini eş zamanlı olarak türettik. Nötron yıldızının dönme evriminin P 'ye karşı hassas değışken B 'ye çok hassas olduğunu bulmaktayız. Kar et al. (2024), Bhattacharyya & Chakrabarty (2017) tork modelini kullanarak hızlı AMXP'leri ($P \lesssim 3 \text{ ms}$) açıklamakta başarısız olurken; Ertan (2021) tork modelini Van et al. (2019) MB modeliyle birlikte uygulamamız, yalnızca $P_{\text{orb,i}}$ değerini değiştirerek üç AMXP grubunun tümünün hem çift sistem hem de nötron yıldızı evrimini tutarlı bir şekilde açıklamaktadır.

Sonuçlar

Bu çalışmada, LMXB'lerdeki uzun dönemli çift sistem ve nötron yıldızı evrimi, eş yıldız türüne göre üç farklı evrimsel yol olarak (BD, UCXB ve MS) incelenmiştir. MESA kullanılarak elde edilen çift yıldız evrimi sonuçları şunları göstermektedir: (i) Van et al. (2019) MB modeli kullanarak, LMXB'lerde gözlenen X-ışına gücü ile uyumlu sonuç elde edilmiştir. (ii) Başlangıç yörünge periyodu ($P_{\text{orb,i}}$), evrimi etkileyen en temel parametredir. (iii) Kütle aktarım süresini belirleyen γ_{mb} , kütle aktarım verimliliğini etkileyen β 'ya kıyasla daha baskın bir role sahiptir ve $\gamma_{\text{mb}} \geq 3$ değerleri tercih edilmektedir. Elde edilen evrim yolları, bu çalışmada yer verilmeyen ışıma (irradiation) etkisinin rol oynayabileceği üç kaynak hariç, gözlenen AMXP özellikleriyle güçlü bir uyum sergilemektedir. MESA'dan alınan $\dot{M}_{\text{in}}$ evrimi Ertan (2021) analitik modeline uygulanarak NS'lerin dönme evrimleri hesaplanmıştır. Model, hızlı dönen AMXP'lerin ($P \lesssim 3 \text{ ms}$) evrimini doğal bir şekilde açıklamakta; HETE J1900.1-2455, XTE J1751-305 ve Aql X-1 gibi temsilci kaynakların gözlenen $P, \dot{P}, M_2$ ve P_{orb} değerlerini eş zamanlı olarak başarılı biçimde üretmektedir.

Kaynakça

- Avakyan A., Neumann M., and others 2023, A&A, 675, A199
Bhattacharyya S., Chakrabarty D., 2017, ApJ, 835, 4
Deloye C. J., 2007
Ertan U., 2021, MNRAS, 500
He X., Meng X.-C., Chen H.-L., 2019, Res. Astron. Astrophys., 19, 110
Istrate A. G., M Tauris T., Langer N., 2014, A&A, 571, A45
Kar A., Ojha P., Bhattacharyya S., 2024, MNRAS, 535, 344
Paxton B., et al., 2015, ApJS, 220, 15
Sengar R., Tauris T. M., Langer N., Istrate A. G., 2017, MNRAS, 470, 6
Srinivasan G., 2010, New Astron. Rev., 54, 93
Van K. X., Ivanova N., Heinke C. O., 2019, MNRAS, 483, 5595



Niang vd. 2026