

Kütle Aktaran Milisaniye X-Işını Pulsarlarına Parlama ve Durgun Evreleri ile Uzun Dönem Evrimlerinde Etki Eden Torklar

Fatmanur Ertuğrul¹ Ali Arda Gençali¹ Ünal Ertan¹ Ndiogou Niang¹
¹Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul, Türkiye

Özet

Amaç: Kütle aktaran milisaniye X-ışını pulsarları (AMXP'ler), düşük kütleli X-ışını çiftlerinde (LMXB) eş yıldızlarından kütle aktarımıyla milisaniye periyotlarına hızlandırılmış ve şu anda parlama ve durgun evreleri arasında geçişler gösteren nötron yıldızlarıdır. Bu çalışmanın amacı analitik tork modelimizi kullanarak: (1) AMXP'lerin parlama ve durgun evrelerindeki tork ve X-ışına gücü değişimlerinin incelenmesi, (2) AMXP'lerin uzun dönemli dönme evrimlerinde gözlenen yavaşlama davranışının açıklanmasıdır.

Yöntem: Bu çalışmada, bugüne kadar birden fazla parlama dönemine girmiş ve hem parlama hem de durgun evrelerinde dönme periyodu türevleri ölçülmüş beş AMXP'nin gözlemsel verileri kullanılmıştır. Kaynakların bu evrelerdeki tork ve X-ışına gücü değişimleri, daha önce LMXB'lerin tipik davranışlarını açıklamakta kullanılan analitik tork modeli kullanılarak incelenmiştir. Model çerçevesinde; aktarım torku, disk torku ve manyetik dipol torku kullanarak kaynakların her iki evredeki dönme özellikleri gözlemlerle karşılaştırılmıştır.

Sonuç: Model sonuçları, incelenen beş kaynağın parlama ve durgun dönemlerinde gözlenen X-ışına güçleri ve dönme özellikleriyle uyumludur. Daha kısa süren parlama evrelerinde etkin olan toplam hızlanma torklarının, çok daha uzun süren durgun evrelerindeki toplam yavaşlama torklarına kıyasla zayıf kaldığı ve bu nedenle sistemlerin uzun dönemde yavaşladığı gösterilmiştir. Sonuçlarımız, AMXP'lerin uzun dönemli dönme evriminin aktarım torku, disk torku ve manyetik dipol torkuyla, başka bir baskın torka ihtiyaç duymadan, açıklanabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte sonuçlarımız, zamanlama ve X-ışına gücündeki belirsizlikler nedeniyle kütleçekimsel ışınım torklarını dışlamak için yeterli değildir.

Giriş

Kütle aktaran milisaniye X-ışını pulsarları (AMXP'ler), düşük kütleli X-ışını çiftlerinde (LMXB) bulunan ve eş yıldızından gerçekleşen madde aktarımı sayesinde milisaniye periyotlarına kadar hızlanmış nötron yıldızlarıdır. Bugüne kadar, dönme periyodu $P < 10$ ms olan ve üçü geçişken milisaniye pulsarı olmak üzere 26 AMXP gözlenmiştir. LMXB evriminin son aşamalarında yer alan bu sistemler geçici X-ışını kaynaklardır; parlama ve durgun evreleri arasında geçişler gösterirler. AMXP'ler parlama evrelerinde periyodik X-ışını atmaları gösterirler ve bu evrede genellikle dönme hızları artar ($\langle \dot{P}_{\text{outburst}} \rangle < 0$) (detaylı bilgi için örn. bkz. Patruno ve Watts 2021; Di Salvo ve Sanna 2022).

Gözlemler, bu kaynakların çok daha uzun süren durgun evrelerinde ve uzun evrimlerinde dönme hızlarının azaldığını ($\dot{P}_{\text{secular}} > 0$) göstermektedir. Ancak, AMXP'leri nihayetinde radyo milisaniye pulsarlarına dönüştüren disk-alan etkileşimi ve tork mekanizmaları hala belirsizdir. Sürekli kaynaklarda dönme evrimi ortalama kütle aktarım hızı ($\dot{M}_{\text{in}}$) ile belirlenirken, geçici X-ışını kaynaklarında bu hız parlama ve durgun evreler arasında büyük ölçüde değişir. Bazı geleneksel modeller, gözlemlenen bu uzun dönemli yavaşlama davranışını açıklamakta yetersiz kalmakta ve disk ile manyetik dipol torklarına ek olarak kütleçekimsel ışınım gibi dış yavaşlatıcı tork mekanizmalarına ihtiyaç duymaktadır (Bhattacharyya ve Chakrabarty 2017).

Bu çalışmada, AMXP'lerin parlama ve durgun evrelerindeki dönme özellikleri ile X-ışına gücü değişimleri analitik bir tork modeli kullanılarak incelenmiştir. Analiz kapsamında, birden fazla parlama evresinde gözlenmiş ve hem parlama hem de durgun evrelerinde dönme periyodu türevleri ölçülmüş beş AMXP kaynağının gözlemsel verileri kullanılmıştır. Çalışmamız, kısa süren parlama evrelerinde etkin olan hızlanma torklarının, çok daha uzun süren durgun evrelerindeki yavaşlama torkları tarafından baskılandığını göstermektedir. Model sonuçlarımız, incelenen bu beş kaynağın gözlenen X-ışına gücü ve dönme özellikleriyle uyum göstermektedir. AMXP'lerin uzun dönemli yavaşlama davranışı, model çerçevesinde aktarım torku, disk torku ve manyetik dipol torku ile açıklanabilmektedir.

Model

Bu çalışmada iç disk yarıçapı, r_{in} , ve tork hesaplamaları için Ertan (2021) tarafından geliştirilen analitik model kullanılmıştır. Modelde nötron yıldızının dönme evrimi, $\dot{M}_{\text{in}}$ 'e bağlı olarak üç temel fazda incelenmektedir: güçlü pervane (SP) fazı, zayıf pervane (WP) fazı ve hızlandırma (SU) fazı.

Durağan güçlü pervane fazının sağlanabilmesi için gereken en büyük iç disk yarıçap şu bağıntıyla belirlenir:

$$R_{\text{in,max}}^{25/8} |1 - R_{\text{in,max}}^{-3/2}| \simeq 0.22 \alpha_{-1}^{2/5} M_{1.4}^{-7/6} \dot{M}_{\text{in,16}}^{-7/20} \mu_{26} P_{-3}^{-13/12} \quad (1)$$

Burada $R_{\text{in,max}} = r_{\text{in,max}}/r_{\text{co}}$, $\alpha_{-1} = \alpha/0.1$ kinematik viskozite parametresi, $M_{1.4} = M/(1.4 M_{\odot})$, $\dot{M}_{\text{in,16}} = \dot{M}_{\text{in}}/(10^{16} \text{ g s}^{-1})$, $\mu_{26} = \mu/(10^{26} \text{ G cm}^3)$ yıldız dipol momenti ve $P_{-3} = P/(1 \text{ ms})$. İç disk yarıçapı $r_{\text{in}} = r_{\eta} = \eta r_{\text{in,max}}$ ile belirlenir ($\eta \lesssim 1$).

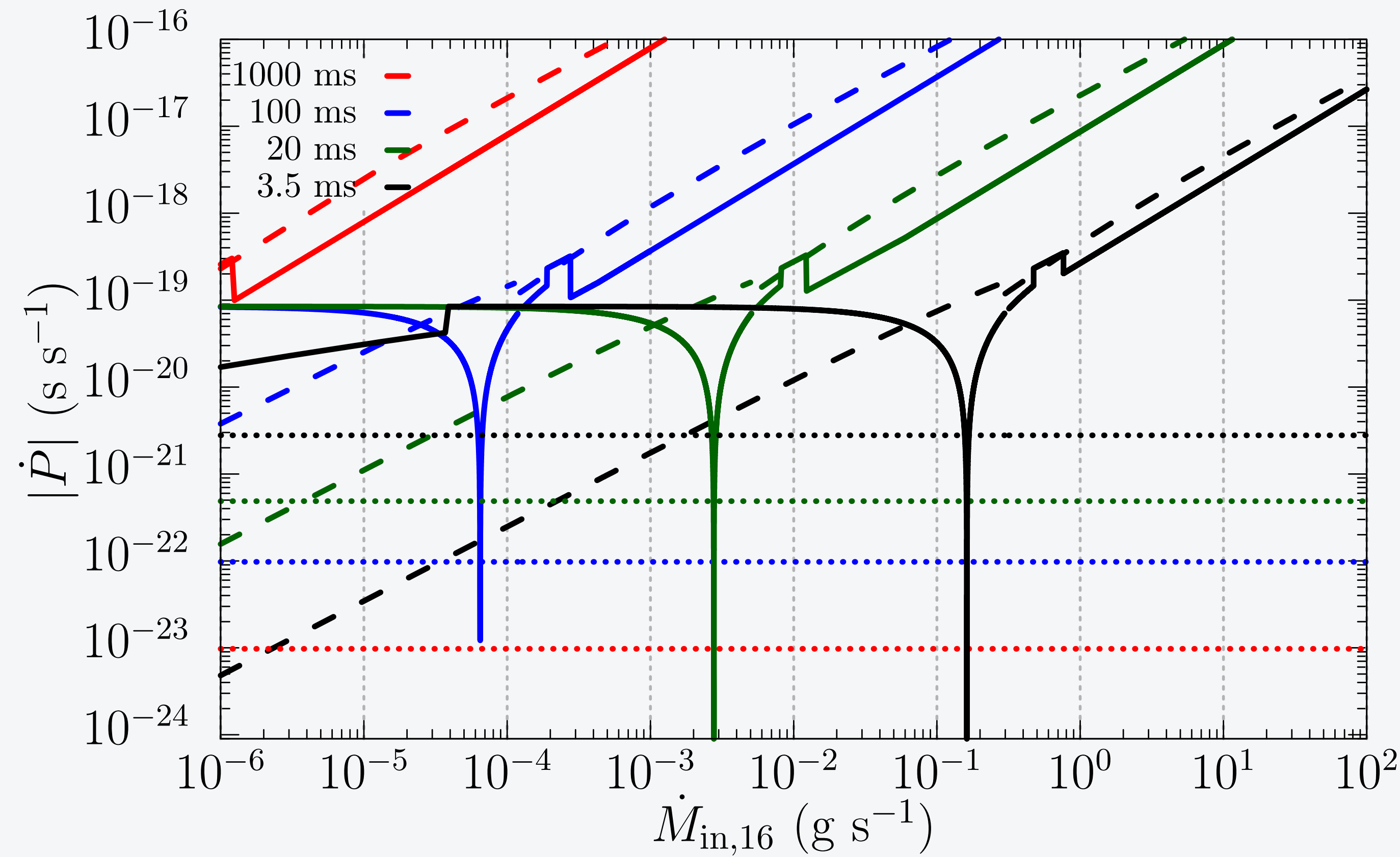
Yıldız etkileyen toplam tork:

$$\Gamma = \dot{M}_* \sqrt{GM r_{\text{in}}} - \frac{\mu^2}{r_{\text{in}}^3} \left(\frac{\Delta r}{r_{\text{in}}} \right) - \frac{2\mu^2 \Omega_*^3}{3c^3} \quad (2)$$

Burada G kütle çekim sabiti, M nötron yıldızının kütlesi, Ω_* yıldızın açısal dönme hızı ve c ışık hızıdır. Terimler sırasıyla aktarım torku (Γ_{acc}), disk torku (Γ_{D}) ve manyetik dipol torkudur (Γ_{dip}).

- Düşük $\dot{M}_{\text{in}}$ değerlerinde yıldız SP fazındadır. Durağan bir SP fazı için $r_{\text{in}} = r_{\eta} > 1.26 r_{\text{co}}$ (Şekil 2'de B noktası) olmalıdır. Bu fazda yıldız kütle aktarılmaz ve yıldız yavaşlar. $\Gamma = \Gamma_{\text{D}} + \Gamma_{\text{dip}}$.
- Orta seviyede $\dot{M}_{\text{in}}$ değerlerinde yıldız WP fazındadır ve üstüne kütle aktarılırken yavaşlar. Bu fazda $r_{\text{in}} = r_{\text{co}}$ koşulu geniş bir M_{in} aralığında sağlanır (Şekil 2'de D noktasından E noktasına kadar) ve tüm torklar aktiftir.
- Yüksek $\dot{M}_{\text{in}}$ seviyelerinde $r_{\text{in}} < r_{\text{co}}$ olmasıyla yıldız SU fazına girer (Şekil 2'de E noktası). Bu fazda $r_{\text{in}} = r_{\eta}$ 'dir. Yıldız, üzerine akan madde ile hızlanır ve $\Gamma = \Gamma_{\text{acc}} + \Gamma_{\text{dip}}$.

Tartışma



Şekil 1: Model eğrileri $M = 1.4 M_{\odot}$, $r_{\text{co}} = 10^6$ cm, $\alpha = 0.1$, $\Delta r/r_{\text{in}} = 0.25$, $\eta = 0.8$, $\xi = 0.8$, $B = 1.0 \times 10^8$ G parametreleri ile farklı P değerleri kullanılarak üretilmiştir. Grafikteki düz eğriler analitik tork modeliyle elde edilen sonuçları gösterirken, noktalı yatay çizgiler yalnızca Γ_{dip} torkundan kaynaklanan P değerlerini temsil etmektedir. Kesikli eğriler ise Bhattacharyya ve Chakrabarty (2017)'de kullanılan tork formülleri temel alınarak çizilmiştir.

Sabit bir manyetik alan (B) değeri için farklı P değerleriyle elde edilen model eğrileri Şekil 1'de gösterilmektedir. Karşılaştırma amacıyla, Bhattacharyya ve Chakrabarty (2017)'de kullanılan tork modeliyle elde edilen P değişimleri kesikli çizgilerle verilmiştir. Modelimizde hesaplanan yavaşlama torku, geniş bir $\dot{M}_{\text{in}}$ aralığında geleneksel modele göre birkaç mertebe daha büyüktür. Bunun temel nedeni, zayıf pervane fazında $r_{\text{in}} = r_{\text{co}}$ olması ve Γ_{D} 'nin neredeyse sabit kalmasıyla sistem tork tersinmesine yakın değilken Γ_{acc} 'na baskın gelmesidir. Güçlü pervane fazında ise r_{in} 'in $\dot{M}_{\text{in}}$ 'e bağımlılığı Alfvén yarıçapına göre daha zayıf olduğundan, geleneksel modellere kıyasla daha güçlü yavaşlama torku elde edilir.

Kullanılan AMXP Kaynakları

AMXP Adı	P (ms)	$\langle \dot{P}_{\text{outburst}} \rangle$ ($10^{-18} \text{ s s}^{-1}$)	$\dot{P}_{\text{secular}}$ ($10^{-20} \text{ s s}^{-1}$)	Zirve L_X ($10^{36} \text{ erg s}^{-1}$)	Durgun L_X ($10^{32} \text{ erg s}^{-1}$)	Kay.
XTE J1751–305	2.30	$-(1.96 \pm 0.53)$	2.9 ± 0.6	27.0	< 4.6	a
IGR J17494–3030	2.66	> -12.7	14.5 ± 0.5	2.2	< 10.4	b
Swift J1756.9–2508	5.50	> -9.05	2.2 ± 0.78	9.6	< 10.0	c
IGR J17511–3057	4.10	$-(2.42 \pm 0.30)$	3.83 ± 1.83	11.0	$3.5\text{--}5.2$	d
IGR J00291+5934	1.70	$-(1.42 \pm 0.08)$	0.89	8.1	$1.0\text{--}4.2$	e

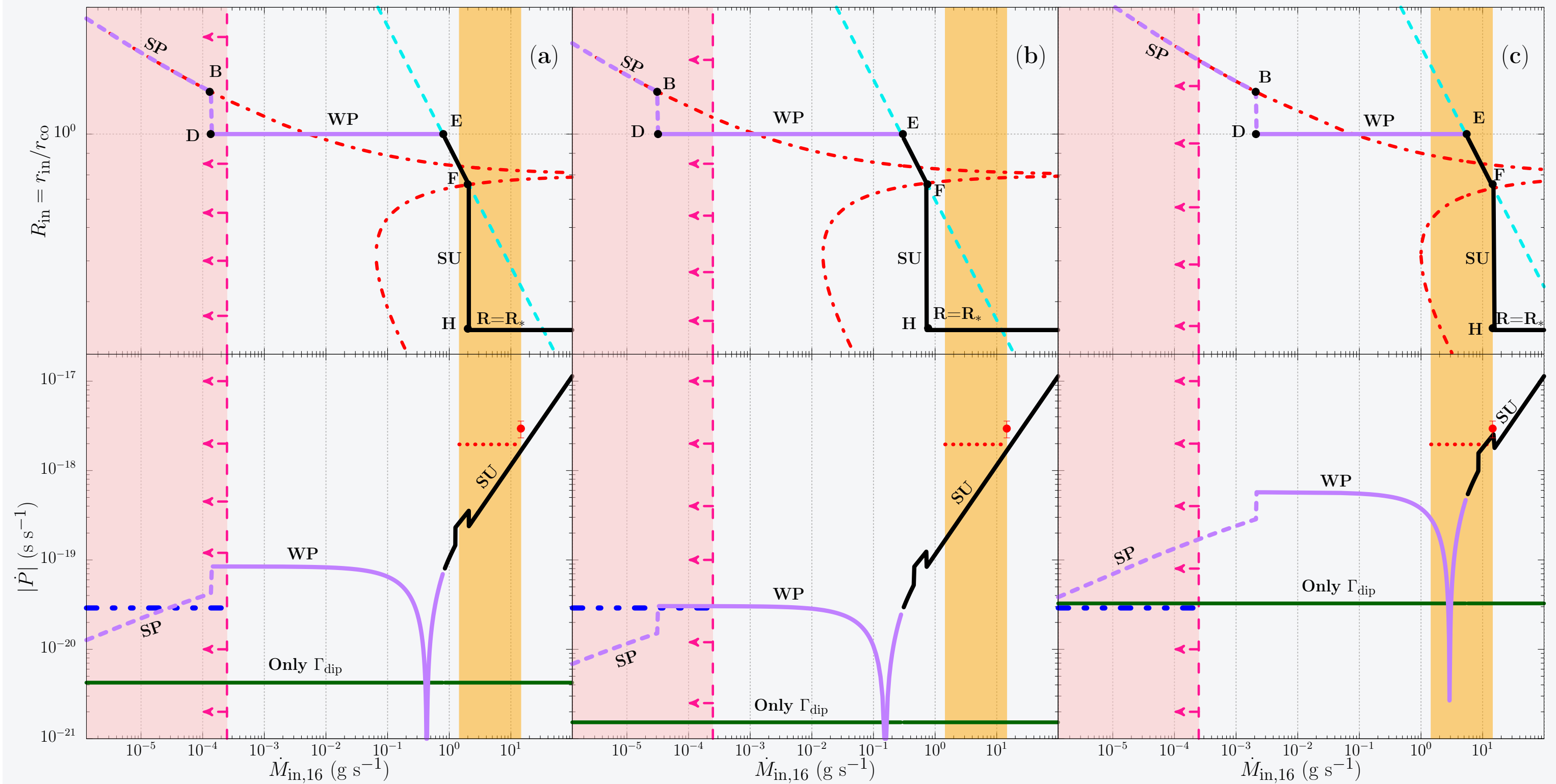
Not. ^a Markwardt vd. (2002), Wijmans vd. (2005), Gierliński ve Poutanen (2005), Papitto vd. (2008) ve Riggio vd. (2011); ^b Armas Padilla vd. (2013), Chakrabarty vd. (2013) ve Ng vd. (2021); ^c Krimm vd. (2007), Papitto vd. (2007), Patruno vd. (2010), Mukherjee vd. (2015) ve Bult vd. (2018); ^d Markwardt vd. (2009), Altamirano vd. (2010), Riggio vd. (2011), Sanna vd. (2025) ve Illiano vd. (2026); ^e Markwardt vd. (2004), Jonker vd. (2005), Galloway vd. (2005), Papitto vd. (2011) ve De Falco vd. (2017).

Durgun evredeki sistemler için üç senaryo test edilmiştir: (1) SP fazı, (2) WP fazı ve (3) iç diskin buharlaştığı, sistemin sadece manyetik dipol torkuyla yavaşladığı durum. İncelenen her kaynak için (1) ve (2) durumlarındaki B değerleri tork modelimiz kullanılarak ölçülen $\dot{P}_{\text{secular}}$ değerlerinden türetilmiş; (3) durumu için ise standart dipol formülü kullanılmıştır. Elde edilen bu B değerleri kullanılarak her üç senaryo için $\langle \dot{P}_{\text{outburst}} \rangle$ tahmin edilmiş ve gözlemlerle kıyaslanmıştır.

Kaynak Bazında Bulgular

Kaynak	Durgun Evre Fazı	Temsili B
XTE J1751–305	SP, WP ve iç diskin buharlaştığı durumlar olasıdır.	$0.6\text{--}2.6 \times 10^8$ G
IGR J17494–3030	SP, WP ve iç diskin buharlaştığı durumlar olasıdır.	$1.3\text{--}6.3 \times 10^8$ G
Swift J1756.9–2508	SP, WP ve iç diskin buharlaştığı durumlar olasıdır.	$0.5\text{--}3.5 \times 10^8$ G
IGR J17511–3057	WP tercih edilir.	7×10^7 G
IGR J00291+5934	WP tercih edilir.	3.5×10^7 G

XTE J1751–305



Şekil 2: XTE J1751–305 için model eğrileri. Şekil 1'de kullanılan parametreler ve $P = 2.3$ ms ile oluşturulmuştur. (a) SP (kesikli mor eğri), WP (düz mor eğri) ve SU (düz siyah eğri) fazları boyunca artan $\dot{M}_{\text{in}}$ ile R_{in} (üst panel) ve P (alt panel) değişimi. Üst paneldeki kırmızı nokta-kesikli eğri R_{in} çözümünü, turkuaz kesikli çizgi ise R_{in} 'i göstermektedir. Alt paneldeki kırmızı noktalı ve mavi iki-nokta-kesikli çizgi parçaları, sırasıyla gözlemlenen $\langle \dot{P}_{\text{outburst}} \rangle$ (negatif) ve $\dot{P}_{\text{secular}}$ (pozitif) değerlerini belirtmektedir. Oklu dikey kesikli çizgi, durgun evredeki $\dot{M}_{\text{in}}$ seviyesinin üst sınırına karşılık gelmektedir. SU fazındaki turuncu gölgeli alan, parlama sırasında X-ışını atmalarının gözlemlendiği $\dot{M}_{\text{in}}$ aralığını gösterir. Hata çukuklarına sahip kırmızı nokta, 2002 parlamasının zirvesinde ölçülen P değerini belirtmektedir. Bu model eğrileri $B \simeq 1.0 \times 10^8$ G varsayılarak elde edilmiştir. (b) $B \simeq 6.0 \times 10^7$ G olması haricinde (a) paneli ile aynıdır. (c) $B \simeq 2.6 \times 10^8$ G olması haricinde (a) paneli ile aynıdır. Düz yeşil çizgiler, yalnızca Γ_{dip} kullanılarak üretilen P değerini göstermektedir.

Şekil 2'de görüldüğü üzere kaynak, durgun evrede $\dot{M}_{\text{in}}$ ve B 'ye bağlı olarak SP fazında (Şekil 2a) veya muhtemelen WP fazında (Şekil 2b) bulunabilir. Şekil 2a'da model $B \simeq 1.0 \times 10^8$ G ile kaynak SP fazındayken (kütle aktarımı yokken) $\dot{M}_{\text{in}} \simeq 2.85 \times 10^{11} \text{ g s}^{-1}$ ile gözlemlenen $\dot{P}_{\text{secular}}$ değerini yeniden üretmektedir. Şekil 2b, kaynağın durgun evrede WP fazında olması koşuluyla makul model eğrilerini göstermektedir; bu durumda gözlemlenen $\dot{P}_{\text{secular}}$ değerini açıklayabilmek için $B \simeq 6.0 \times 10^7$ G gerekmektedir. Ayrıca, durgun evrede iç diskin buharlaşmış olabileceği olasılığını da göz önünde bulunduruyoruz (Şekil 2c). Bu durumda dipol torklarıyla gerçekleşen yavaşlama, $B \simeq 2.6 \times 10^8$ G ile ölçülen $\dot{P}_{\text{secular}}$ değerini açıklayabilmektedir.

Durgun evredeki iç disk özelliklerinden bağımsız olarak kaynak, parlama sırasında keskin bir şekilde artan $\dot{M}_{\text{in}}$ ile SU fazına girer. XTE J1751–305 için sonuçlarımız, durgun evrede iç diskin buharlaşması ihtimalini dışlamaktadır. Durgun evrede X-ışınlarının tespiti modelleri daha iyi sınırlandırabilir. Her üç olasılık için de model, gözlemlenen $\langle \dot{P}_{\text{outburst}} \rangle$ değerlerini ve parlamanın zirvesinde ölçülen P değerini yeniden üretebilmektedir.

Sonuçlar

- Model ve Gözlem Uyumu:** İncelenen beş kaynağın hem parlama hem de durgun evrelerine ait dönme özellikleri ve X-ışına güçleri, model sonuçlarıyla uyumludur.
- Uzun Dönemli Yavaşlama Mekanizması:** Kısa süreli parlama evrelerindeki hızlandırma torklarının, uzun süren durgun evrelerdeki yavaşlatma torklarına kıyasla zayıf kalması nedeniyle, sistemler uzun dönemde yavaşlarlar.
- Tork Bileşenleri:** AMXP'lerin uzun dönemli dönme evrimi; ek bir dış tork mekanizmasına gerek duyulmadan yalnızca aktarım, disk ve manyetik dipol torklarıyla açıklanabilmektedir.

Kaynakça

Bhattacharyya S., Chakrabarty D., 2017, The Astrophysical Journal, 835, 4
Di Salvo T., Sanna A., 2022, içinde: Bhattacharyya S., Papitto A., Bhattacharya D. (ed.), Millisecond Pulsars. Springer International Publishing, Cham, s. 87–124, doi:10.1007/978-3-030-85198-9_4
Ertan Ü., 2021, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 500, 2928
Patruno A., Watts A. L., 2021, içinde: Belloni T. M., Méndez M., Zhang C. (ed.), Timing Neutron Stars: Pulsations, Oscillations and Explosions. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s. 143–208, doi:10.1007/978-3-662-62110-3_4