

# Marchani Milisaniye Pulsarlarının X-ışın Gözlemleri ile R-mod Osilasyonlarına Kısıtlar

Tuğba Boztepe <sup>1,2\*</sup>, Tolga Güver <sup>1,2</sup>, Kai Schwenzer <sup>3</sup>, Eda Vurgun <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü 2İstanbul Üniversitesi Gözlemevi Uygulama ve Araştırma Merkezi, <sup>3</sup> Theoretical Astrophysics (IAAT), Eberhard Karls University

\*tugbabztp@gmail.com



#### Ozet

R-mod osilasyonları kompakt yıldızların iç yapısını incelemek için önemli bir yol sağlar. Hassas şekilde ölçülmüş yüksek dönme hızları nedeniyle milisaniye pulsarları bu tür osilasyonları gözlemek için en uygun cisimlerdir. Bu yıldızların yüzey sıcaklıklarına ilişkin bilgilerimiz kesin olmamakla birlikte, X-ışınlarında yapılmış gözlemler astrosismoloji için çok yararlı olabilir, zira R-mod osilasyonları yıldızda önemli bir ısınmaya yol açmış olmalıdır. Bu posterde, literatürde verilmiş çok sayıda sıcaklık ve ışıma gücü ölçümlerini kullanarak milisaniye pulsarlarının yüzey sıcaklıkları için bir üst limit hesaplayıp, R-mod osilasyonları ve yıldızların iç yapısı üzerine limitler koymaya çalıştığımız araştırmamızdan ilk sonuçları sunacağız.

## **R-Mod Osilasyonları**

R modları (dönme baskın modlar ya da Rossby dalgaları) dönen yıldızlarda gözlenen osilasyonlardır ve sürükleyici kuvveti Coriolis kuvvetidir. Bu modlarda baskın kuvvet Coriolis kuvveti olduğu için modun frekansı yıldızın iç yapısından bağımsız fakat açısal hızının bir fonksiyonudur. Kütleçekimsel ışınım dönen tüm yıldızlarda bu modları kararsızlık kuşağına doğru iter, öte yandan yıldızın içindeki viskoz kuvvetler ise bu osilasyonu bozucu bir rol üstlenirler. Eğer yıldız yavaş dönüyorsa, kütleçekimsel ışınım için zaman ölçeği hep çok daha büyüktür ve yıldız kararlıdır. Hızlı dönen yıldızlar için ise viskoz kuvvetler sıcaklığa bağlı olduğu için yıldızın bu osilasyonlara karşı kararsızlığı sıcaklığın bir fonksivonudur. Bu durumda r-mod osilasvonlarının astrofiziksel iki önemli yansıması vardır. Biri yeni oluşmuş ve sıcak nötron yıldızlarındaki durum, diğeri ise kütle aktarımı sebebiyle yüksek dönme hızlarına ulaşmış milisaniye pulsarlarındaki durumdur (Lindblom, 2001).



Şekilde kritik açısal hızın sıcaklığa bağımlılığı gösterilmiştir Düz çizgi r-mod osilasyonları için kesikli çizgi ise karşılaştırma için f-mod osilasyonları için olan durumu göstermektedir. Max, yıldızın sahip olabileceği maksimum açısal hızı göstermektedir. Şekil Lindblom'dan (2001)

## Milisaniye Pulsarlarının X-ışın Gözlemleri ve Yüzey Sıcaklıkları

Yanda değindiğimiz ikinci senaryo bu posterde ilgileneceğimiz durumdur. Bu durumda soğuk, yaşlı ve yavaş bir nötron yıldızı zamanla örneğin bir bileşen yıldızdan kütle aktarır ve bu aktarma sırasında kendisi de açısal momentum kazanarak dönme hızını arttırır. Eğer nötron yıldızının açısal hızı yeterince artar ise kararsız r-mod'ların genliği de üstel olarak artar (Lindblom 2001). Bu durumda vildizin kütlecekimsel isinim vavinlavip tekrar denge durumuna dönmesi beklenir ancak Levin (1999) bu durumun yıldızda aşağıdaki çevrime sebep olacağını göstermistir :

- kütle aktarımı sebebi ile yıldız kritik dönme hızına ulaşır ve r-modlar kararsız hale gelir. r-modların genliği kirileçekimsel şınım sebebi ile daha da artar ve yaklaşık bir yıl içinde yıldızın çekirdeğini yaklaşık 10<sup>9</sup> K 'e kadar ısıtır (yüzeyde 10<sup>6</sup> K).
- r-mod sebebiyle yayınlanan kütleçekimsel ışınım yıldızı tekrar yavaşlatır ve kritik hızın altına düşürür (bu durumun fiziği henüz tam anlaşılamamıştır).
- r-mod kararsızlığı durur ve yıldız yavaşça tekrar soğur.

Şekil 1: Kütleçekimsel kırmızıya kayma dikkate alındıktan sonraki yüzey sıcakikları için sınırlar. İçi dolu üçgenler geri dönüşüm geçirmiş milisaniye pulsarı için limitleri ve açık mavi üçgenler ise düşük küteli X-şeı (İrtini çin limitleri gösterir. Milisaniye pulsarlarının limitleri ise Prinz ve Becker'den (2015), ve tarafımızca derlenen şıma gücü limitleri olarak sırasıyla kırmızı ve yeşil ile gösterilmiştir. İste bu

3×10 z., ÷,

۰.  ۰.

Alford ve Schwenzer (2014) göstermiştir ki eğer yukarıdaki senaryo doğru ise r-mod osilasyonları bu yıldızların yüzeylerini 106 K gibi sıcaklıklara ulaştırmış olmalıdır. İşte bu sebeple bugün artık kütle aktarmayan milisaniye pulsarlarının yüzey sıcaklıklarının ölçümleri bu osilasyonların doğalarının anlaşılması için son derece önemlidir. Ayrıca nötron yıldızlarının içindeki ısı iletimi ve soğuma karakteristikleri iç yapılarına bağlı olduğu için bu tip çalışmalar nötron yıldızlarının iç yapıları ve hal denklemlerine dair de önemli ipuçları sunabilmektedir.

Bu amaçla, 100 Hz'den daha hızlı dönen tüm milisaniye pulsarlarının literatürde verilen bilgileri derlenmiş ve Tablo 1'de sunulmuştur. Her bir pulsar için sıcaklık, ve ısısal bileşenin akı, ışıma gücü değerleri ile uzaklık ve spin frekansı gibi değerler yazarlar tarafından bildirilen belirsizlikeri ile birlikte tabloda yer almaktadır. Çoğu zaman sadece yüzey üzerinde küçük bir noktadan gelen ısısal emisyon tespit edilebilir. Bazı durumlarda karacısım sıcaklığı yerine, yazarlar raporlarında sıcaklık değerini bir atmosfer modeli kullanarak belirlemişlerdir. Bunun için çoğunlukla NSA modeli kullanılmıştır (Zavlin et al.1996). Bu modelde nötron yıldızının hidrostatik dengede ince bir atmosferi olduğu varsayılmıştır.

Source	Type <sup>1</sup>	f (Hz)	$(10^{-16} s^{-2})$	$\mathcal{F}_{(10^{-4})}$	$(M_{\odot})$	T (keV)	R (km)	$Flux^{2}$ (10 <sup>-14</sup> $\frac{erg}{s cm}$ )	Distance (kpc)	$Luminosity^3$ $(10^{31} \frac{erg}{s})$	Ref.
11638 2305	P	911 59							1.9	~2.2	1
J1810+1744	BW	602.41	_	_	_	_	_	$2.75\pm0.71$	2.0	1 32+0 34	2
J2129-0429	R	131.23				$0.16 \pm 0.070$	0.09	0.42	0.9	0.041	3
B1937+21	BW	641.93	429.1	43		$0.9 \pm 0.1$		$23.0\pm3.0$	5.0	68.8	4
J0218+4232	BW	430.46	143.4	92					2.7	33.0	4
B1957+20	BW	622.12	65.22	6.4	-	$0.18 \pm 0.03$	0.1	2.0	$2.5 \pm 1.0$	$1.5 \pm 0.96$	5
J1731-1847	BW	426.52	46.22	5.4	-	-	_	$0.83 \pm 0.41$	2.5	$0.622 \pm 0.31$	2
J1311-3430	BW	390.57	31.98	2.8	-			$8.60 \pm 1.4$	1.4	$2.02 \pm 0.33$	2
B1257+12	-	160.81	29.57	0.5	-	0.22	0.8	-	0.5	$0.015 {\pm} 0.005$	6
J2214 + 3000	BW	320.59	14.4	159	-	-	-	$15.85 {\pm} 7.59$	1.5	$4.27 \pm 2.04$	2
J1024 - 0719	-	193.716	6.95	2.4	-	$0.155 \pm 0.034^4$	0.1	-	0.39	0.019	7
J2051 - 0827	BW	221.80	6.266	7.8	-	$0.25 \pm 0.050$	$\sim 0.1$	0.49	1.04	0.0634	8
J1012 + 5307	-	190.27	6.201	57	$1.8 \pm 0.1$	-	-	$12.00 {\pm} 0.0$	-	0.39	9
J1744-1134	BW	245.43	5.382	5.4	-	$0.272 \pm 0.098$	0.03	$2.72 \pm 0.2$	0.357	$0.041 \pm 0.003$	10
$J_{2302+4442}$	-	192.59	4.933	93	-	$0.069 \pm 0.014^5$	2.7	$3.10 {\pm} 0.40$	$1.18 \pm 0.2$	$0.516 {\pm} 0.206$	11
J1614 - 2230		317.38	9.692	26	$1.93\pm0.02$	$0.15 \pm 0.04$	0.55	2.29	$1.3 \pm 0.25$	$0.463 {\pm} 0.161$	12
$J_{2124-3358}$		203	8.46	10	-	$0.112 {\pm} 0.009^4$	0.32	-	0.27	0.1	7
J2241+5236		457.31	13.88	4.2	-	-	-	$5.22 \pm 0.72$	0.5	$0.156 {\pm} 0.022$	13
J1023 + 0038	TB	592.42	42	52	$1.7 \pm 0.2$	$0.038 {\pm} 0.006^{4,6}$	$16.3^{+7.8}_{-10.6}$	$37.1 \pm 3.0$	1.3	$7.50 {\pm} 0.606$	14
J0437-4715	WDB	173.69	17.28	0.8	$1.76 \pm 0.20$	$0.032^{+0.007}_{-0.005}$	$11^{+23}_{-5}$	-	$0.1563 \pm 0.001$	-	15,16

Source	f	$-\dot{f}$	M	$T_{\infty}^{(bound)}$
	(Hz)	$(10^{-16}  s^{-2})$	$M_{\odot}$	$(10^{5}  {\rm K})$
0337 + 1715	365.953	23.66	$1.438 \pm 0.001$	5.6
1103 - 5403	294.75	3.2	-	8.1
1719 - 1438	172.707	2.399	-	5.2
1751 - 2857	255.436	7.347	-	6.2
1843 - 1113	541.81	28.15	-	7.1
1853 + 1303	244.391	5.206	-	6.5
1933 - 6211	282.212	2.947	_	4.4
1946 + 3417	315.444	3.682	$1.83 \pm 0.01$	8.3
2043+1711	420.189	9.252	_	8.1
12129 - 5721	268.359	15.02	-	4.4

blo 2: 100 Hz üzerinde hıza sahip nötron yıldızları için inz ve Becker (2015)'den alınan sıcaklık limitleri ATNF ritabatanından alınan zamansal parametreler ile birlikte

## PSR J1231-1411'ın X-Işın Gözlemleri

PSR J1231-1411 Fermi LAT tarafından keşfedilmiştir (Ransom et al. 2011). Spin peryodu 3ms (271.4 Hz) olan PSR J1231-1411 ikili bir sistemdir ve 1.9 günlük yörünge dönemi vardır. Bu yörünge periyodu, bileşen yıldızın kütlesi ~0.2-0.3Msm olan bir beyaz cüce olduğu senaryolar ile tutarlıdır (Rapaport et al. 1995). Yüksek dönme hızı ve halen aktif olarak kütle aktarmiyor olması sebebiyle r-mod osilasyonlarının yüzey sıcaklığı üzerine etkilerini anlamak için ideal bir sistemdir. Bu sebeple, kaynağın arşiv gözlemlerini yüzey emisyonuna limit koyabilmek için yeniden analiz ettik.

Bu amac icin arsivlenmis Chandra, Suzaku ve XMM-Newton verilerini kullandık. Arsivelerde iki Suzaku gözlemi vardı, calısmamızda iki gözlemde elde edilmiş XIS0 ve XIS3 verileri kullanılmıştır

Tüm spektrumlar eş zamanlı olarak XSPEC programının 12.9.0 versiyonu kullanılarak bir karacisim ve güç kanunu bileşeni ile modellenmiştir (Arnaud 1996). Bu şekilde modellendiğinde  $\chi^2$ /dof = 0.94556 elde edilmektedir. Yıldızlararası ortamın soğurmasının etkisini hesaba katmak için için tbabs modelini (Wilms ve diğ. 2000) ve nH = 3.45x10<sup>20</sup>cm<sup>-2</sup> değerini (Kalberla ve diğ. 2015) kullandık. Analiz sonucunda önceki sonuçlara benzer olarak, kT = 0.158 ± 0.008 keV ve R = 0.144 ± 0.024 km (uzaklığı 0.4 kpc varsayarak) elde edilmiştir. Veri ile en iyi uyum gösteren model her bir X-ışın spektrumu Şekil 2'de gösterilmiştir.

Nötron yıldızının soğuması üzerine daha güçlü sınırlar koymak amacıyla ışınım yapan yarıçapı R=10 km olan başka bir karacisim modeli daha ekledik. Doğal olarak bu tür eklemeler  $\chi^2$ /dof 'değerinde artışa sebep olmaktadır. Bu da, böyle bir bileşen varsa bile bunun eldeki veriye etkisi olmayacak kadar soğuk olması gerektiğini gösterir. İşte bu limiti bulmak için modelimlize sabit yarıçapa sahip fakat farklı sıcaklıklarda karacisimler ekledik ve en yüksek hangi sıcaklıktaki karacismin veride istatistiki olarak bir etkisi olmadığını araştırdık. Yapılan analiz sonucunda kT= 0.015 keV gibi üst limit belirlenmiş oldu. Karacismin sıcaklığının bir fonksiyonu olarak  $\chi^2$ /dof'da elde edilen değişiklikler Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu da bu nötron yıldızının yüzey sıcaklığı üzerine bir limit getirmemizi mümkün kılar.



Sekil 2: PSR J1231-1411'den farkli dedektör ve uydulardan elde edilen X-ışın spektrumları. Alglayolanın farkli duyaflikları farkli spektrumlara neden olmaktadır. Alttaki paneller modelden rezidüelleri farkli dedektörei için göstermektedir. Suzaku ile kaynak kli kere gözlendiği için her bir dedektöre alt iki veri vardır.



Şekil 3: Nötron yıldızının tüm yüzeyinden geldiği varsayım karacisim ışınımının sıcaklığı  $\chi^2$ 'nin bir fonksiyonu olarak göste Dik kırmızı çizgi böyle bir bileşen hiç olmadığı durumdaki  $\chi^{2}$ 'ye karşılı gelen sıcaklık değerini göstermektedir. Kısaca eğer yüzey i temsil ettiğini varsaydığımız karacısım bileşeni, kırmızı dikey gösterilenden daha yüksek bir sıcaklığa sahip olsaydı etkisi g X-ışın spektrumunda görülürdü.

## Sonuclar/Hedefler

Bu posterde yaşlı nötron yıldızlarının X-ışın gözlemlerinden itibaren yüzey sıcaklıklarına koyulabilecek limitler üzerine ilk sonuçlarımızı paylaştık.

- Bu sıcaklık limitleri yıldızların dönme hzları ile birleştirildiğinde
- R-mod osilasyonlarının doğası,
- yıldızlardan gözlenbilecek kütleçekimsel ışınım miktarı ıldızların iç yapısı (R-mod osilasyonların sönümlenmesi buna bağlı olduğu için)
- gibi konularda limitler koyabilmek mümkündür.

erleyen çalışmalarımızda amacımız burada sunulan yöntemleri X-ışınlarında tesbit edilmiş tüm MSP'lere uygulamak ve yüzey sıcaklıklarına önceki bulgulara kıyasla daha kuvvetli limitler koymaktı

Ayrıca, 2017 yılı Şubat ayında NASA tarafından Uluslararası Uzay İstasyonuna gönderilecek NICER görevinin ekibinde yer almaktayız. Düşük X-ışın enerjilerine duyarlı bu algılayıcı ile yapacağımız gözlemler de r-mod osilasyonlarının ve nötron yıldızlarının doğası hakkında önemli bilgiler sağlayacaktır.

Referanslar: 1-Zavlin et al. (1996), ApJ, 315,141-152 2-Ransom et al. (2011), ApJ, 727 3-Rapaport et al. (1995), 4-Haskell et al. 2012, MNRAS, 424,93-103 5-Prinz T. et al. (2015), ApJ, 1511.