

Seçilen Nötron Yıldızı Bileşenli X-ışın Çiftlerinin Korunumsuz Evrim Modelleri

Tuğçe İçli¹ *, Dolunay Koçak¹ , Kadri Yakut¹ 

¹ Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 35100, Bornova, İzmir, Türkiye

Accepted: December 19, 2022. Revised: December 17, 2022. Received: November 13, 2022.

Özet

Bu çalışmada, geri-tür bir optik bileşen ve bir nötron yıldız barındıran küçük-kütleli bazı X-ışın çiftlerinin (NS-LMXB) korunumsuz evrim modelleri MESA evrim kodu kullanılarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında Her X-1 ve Sco X-1 gibi LMXB sistemleri seçilmiştir. Özellikle optik bileşenin neden olduğu aktivite kaynaklı kütle kaybı başta olmak üzere çift sistemlerin evriminde etkili olan kütle aktarım süreçleri, yıldız rüzgarları, dinamo, çekimsel ışıma, açısal momentum kayıp mekanizmaları gibi korunumsuz süreçlerin evrime etkisi araştırılmıştır. Her X-1 ve Sco X-1 çift sistemlerin elde edilen ilk modelleri H-R, M-R ve M-P diyagramları elde edilerek tartışılmıştır.

Abstract

This study uses the MESA evolution code to obtain non-conservative evolution models of some low-mass X-ray binaries (NS-LMXB) containing a late-type component and a neutron star. Within the context of the study, LMXB systems such as Her X-1 and Sco X-1 were selected. The effects of non-conservative processes such as mass transfer, stellar winds, dynamo, gravitational radiation, and angular momentum loss mechanisms, which are influential in the evolution of binary systems, especially the activity-induced mass loss caused by the optic component, on evolution, have been investigated. The first models of Her X-1 and Sco X-1 binary systems are discussed by obtaining H-R, M-R and M-P diagrams.

Anahtar Kelimeler: Binary stars – stellar evolution – X-ray binaries – neutron star – mass-loss

1 Giriş

Tek yıldızların evriminde önemli olan kütle, kimyasal yapı gibi parametrelere ek olarak çift sistemlerde yakınlık etkisi ve bu etkinin sonucu olarak birçok astrofiziksel süreç (dinamo, kütle atım ve kayıp oranları) çiftin evrimini önemli miktarda etkiler (Yakut & Eggleton 2005). Yakın çift sistem durumunda, evrim aşamasına göre bileşenler arasında kütle aktarımı meydana gelebilir. Bu süreçte, sistemden açısal momentum ve kütle kaybı da evrime etki eden faktörler olarak karşımıza çıkar. Yıldız yüzeyinin şekli, eşpotansiyel yüzeyinin şekli tarafından belirlenir (Postnov & Yungelson 2014).

H-R diyagramının farklı evrim aşamasındaki yıldızları farklı kayıp oranları ile kütle kaybeder. Ayrıca kütle kaybının ardındaki mekanizmada farklılık gösterir. Ön-tür radyatif dış katmana sahip yıldızlarda kuvvetli yıldız rüzgarları ile kütle kaybı etkilidir. Geri-tür yıldızlarda konvektif dış katmanın da rol oynadığı dinamo etkisi ile kütle kaybı gerçekleşir. Bu etki özellikle geri-tür yıldızların ışık değişiminde aktif lekeler (İçli ve diğ. 2013; Çokluk ve diğ. 2019; Ulaş ve diğ. 2012) ve leke modülasyonları (Koçak ve diğ. 2021) şeklinde belirgin olarak gözlenmiştir. Yıldızlarda meydana gelen büyük miktardaki kütle atımları ya çift sistemlerde evrimleşmiş büyük kütleli yıldızlardaki gibi ya da bir dış enerji kaynağından gerçekleşen ışıma sebebiyle oluşur (Brookshaw & Tavani 1993). Çift sistemin sahip olduğu bileşenlerin ikisi ya da biri tarafından gerçekleşen kütle kaybının etkisi kadar kütle kayıp oranının değişimi de çift yörüngesinin evriminde etkilidir. Buna ek olarak, kütle kayıp oranı zamanla

değişiklik gösterebilir (Yaşarsoy & Yakut 2013). Bazı X-ışın çiftlerinde meydana gelen olası ışıma etkileri-çekimsel dalga (GW) yayımı ya evrimleşmiş yıldızların atmosferik aktivitesiyle ya da süpernova patlamaları durumunda olduğu gibi kütlelin ani atımıyla devam edebilir (Brookshaw & Tavani 1993). Sıkışık cisim içeren bu tür çift sistemlerde bileşenler arasındaki dinamik evrimde sistemin yörünge açısal momentumu ve kütle kaybı önemli rol oynamaktadır (Paczynski & Ziółkowski 1967; Tutukov & Yungelson 1971; Refsdal ve diğ. 1974; Masevitch & Yungelson 1975; Popova ve diğ. 1978; De Greve & Vanbeveren 1980; Postnov & Yungelson 2014).

Bir çift sistemde bileşen yıldız Roche lobunu doldurmuşsa yörünge ayrıklığının ve kütlelin zamanla değişimi birbirine bağlı değişkenler haline gelir. Sistemden atılan kütle kesri 0 ise kütle aktarımı korunumlu olarak tanımlanırken bu koşulların en az birinin ihlali durumunda kütle aktarımı korunumsuz olarak adlandırılır (Postnov & Yungelson 2014). Korunumsuz kütle aktarımı, kütle kaybı, manyetize olmuş yıldız rüzgarlarıyla kütle kaybı, yıldız aktivitesi, dönme, dinamo, çekimsel ışımayla açısal momentum kaybı gibi astrofiziksel süreçler korunumsuz yıldız evriminde etkilidir (Yakut & Eggleton 2005; İçli & Yakut 2016). X-ışın çift sistemleri bu temel astrofiziksel süreçlerin yanı sıra sıkışık cismin fiziği, kütle etkileşiminin evrim üzerindeki etkisi, yakınlık etkisi, açısal momentum kaybı hakkında bilgi sağlar.

X-ışın çiftleri için onaylanmış birçok modelde kütle aktarımı, Roche lobunu dolduran geri-tür ve küçük-kütleli bir bileşen yıldızdan dejenere olmuş bileşenine, etrafında bulunan bir yığılma diski aracılığı ile gerçekleşmektedir. Sistemden açısal momentum ya da kütle kaybı gerçekleşmediyse çiftin yörünge ayrıklığı artabilecektir. Yıldızın kritik Roche lobu yüzeyi

* icli.tugce@gmail.com

Çizelge 1. Seçilen nötron yıldızı bileşenli X-ışın çiftlerinin bazı temel parametreleri

Sistem	Tür	α	δ	$V(m)$	$P(gün)$
PSR J1023+0038	LMXB	10 23 48	+00 38 41	17.5	0.198
Sco X-1	LMXB	16 19 55	-15 38 25	11.1	0.787
Her X-1	LMXB	16 57 50	+35 20 32	13.6	1.7
SAX J2103.5+4545	HMXB	21 03 36	+45 45 05	14.2	12.6
V0332+52	HMXB	03 34 60	+53 10 23	15.4	34.67
XTE J1946+274	HMXB	19 45 39	+27 21 56	16.9	169.2
3A 0352+309	HMXB	03 55 23	+31 02 45	6.7	250.3
4U 1700+24	LMXB	17 06 35	+23 58 19	7.6	4391

ile ikinci yıldızın bağlantısı yörünge açısal momentum kaybı tarafından korunmaktadır (Taam & Wade 1985; İçli 2016). Açısal momentum kaybının özel durumları olarak GW yayımı ve kısa yörünge dönemli çiftler için geçerli olan manyetize olmuş bileşen yıldızın yıldız rüzgarı dikkate alınmaktadır (İçli 2016).

Çalışma kapsamında öncelikle çift yıldızların farklı kütle aralıklarında korunumlu ve korunumsuz evrim modellerinin oluşturulması ele alınmış ve nötron yıldızı bileşenli küçük-kütleli X-ışın çiftlerinin korunumsuz evrim modelleri MESA evrim kodu kullanılarak irdelenmiştir. Bölüm 2'de seçilen nötron yıldızı bileşenli küçük-kütleli X-ışın çiftlerine ilişkin bilgi verildikten sonra Bölüm 3'de elde edilen evrim modelleri sunulmuştur. Küçük-kütleli nötron yıldızı bileşenli X-ışın çiftleri; Her X-1 ve Sco X-1 sistemine ilişkin elde edilen ilk korunumsuz evrim modellerinin sonuçları Bölüm 4'de sunulmuş ve tartışılmıştır.

2 Nötron Yıldızı Bileşenli Küçük-Kütleli X-ışın Çiftleri

X-ışın çiftleri (XRB), sıkışık cismi kütle toplayan bir nötron yıldızı (NY) ya da kara delik (KD) olan ve bu sıkışık cisim ile birlikte ortak yörüngede hareket eden bir optik bileşen yıldız içerir. Optik bileşenin sahip olduğu kütleyle göre sistemin sınıflandırılması yapılır. Optik bileşen B-tayf türünden daha geri bir tayf türüne sahip ise sisteme küçük-kütleli X-ışın çift sistemi (LMXB) denir. Bileşen yıldız O/B tayf türüne sahip bir yıldız ise çift sisteme büyük kütleli X-ışın çift sistemi (HMXB) denir.

LMXB'lerde bileşen Roche lobunu doldurduğunda sıkışık cisim üzerine kütle aktarımı bir yığılma diski yoluyla gerçekleştirilir. Sahip oldukları bu yığılma diskleri ve/veya bileşen yıldızları yeterince parlak ısısal salma yayarlar (Wang & Wang 2014). Bir LMXB'nin evriminde kütle kaybının büyük bir miktarı bileşen tarafından gerçekleşmiştir (Kalomeni ve diğ. 2016; Podsiadlowski ve diğ. 2002). Bu tür sistemlerde yörünge açısal momentumun evriminden sorumlu iki baskın fiziksel mekanizma mevcuttur. Bunlardan birincisi, manyetize olmuş yıldız rüzgarları (MSW) ikincisi ise manyetik frenlemedir. Bu mekanizmaların nötron yıldızı bileşenli X-ışın çiftleri üzerindeki etkisi İçli (2016)'da detayları ile tartışılmıştır. Bu çalışmada, LMXB'lerin korunumsuz evriminde etkili olan bazı astrofiziksel süreçler (kütle kaybı, manyetik frenleme vb.) ele alınmıştır ve seçilen bazı nötron yıldızı bileşenli küçük-kütleli X-ışın çiftleri için (NS-LMXBs) korunumsuz evrim yaklaşımları/modelleri elde edilmiştir.

Yapılan korunumsuz evrim modellerinin amaçlarından biri ise bu astrofiziksel süreçlerin dikkate alındığı özellikle çift sistemlerde fiziksel ve yörünge parametrelerinin zamanla değişimine odaklı gözlemler ile uyumlu sonuçları aramasıdır. Bu kapsamda seçilen bazı nötron bileşenli X-ışın çift sistemlerin 2015-2020 yılları arasında TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG)

yerleşkesinde bulunan 60 cm çapındaki (T60) robotik teleskop ve 1m çaplı T100 teleskobu kullanılarak elde edilen çok-renk (V, R, I) uzun ve kısa dönemli gözlemleri ve sistemlerin literatür ve *Survey* veri setleri (ASAS-SN, TESS, AAVSO, vb.) kullanılmıştır (İçli 2016). Gözlemsel olarak seçilen hedef sistemlere ilişkin bazı parametreler Çizelge 1'de özetlenmiştir. Bu çalışma ile farklı evrim kodlarının değiştirilerek testinin sağlanması, en uygun kod sonuçları ve elde edilen gözlem sonuçları arasındaki uyumluluğu aramak amaçlanmıştır. Bu çalışma kapsamında seçilen hedef NS-LMXB'lerden Her X-1 ve Sco X-1 sistemi ele alınmıştır.

2.1 Her X-1

1972 yılında keşfedilen Her X-1 (HZ Her, 2U 1705+34) sistemi A7 SG tayf türüne sahip bir optik bileşen ile örten bir küçük-kütleli X-ışın çift sistemidir (Middleditch & Nelson 1976; Scott ve diğ. 2000; İçli ve diğ. 2019). 1.7 gün yörünge dönemine sahip olan sistem 1.5 M_{\odot} kütleli bir nötron yıldızı ve 2.2 M_{\odot} kütleli optik bileşenden oluşmaktadır (Reynolds ve diğ. 1997; Leahy & Abdallah 2014; İçli ve diğ. 2019). Uzaklığı 6.6 kpc (Reynolds ve diğ. 1997) olan sistem farklı dalgaboylarında (optik, moröte, radyo ve X-ışını bölgesinde) gözlemlenmiştir (Shakura ve diğ. 1997; Cherepashchuk ve diğ. 1974; Şimon ve diğ. 2002; İcli & Yakut 2015; İçli ve diğ. 2019, 2020). X-ışını akısı, yığılma diskiyle ilgili olarak 35 günlük bir dönem değişimi sergiler (Scott ve diğ. 2000; Leahy & Abdallah 2014; Postnov ve diğ. 2013).

2.2 Sco X-1

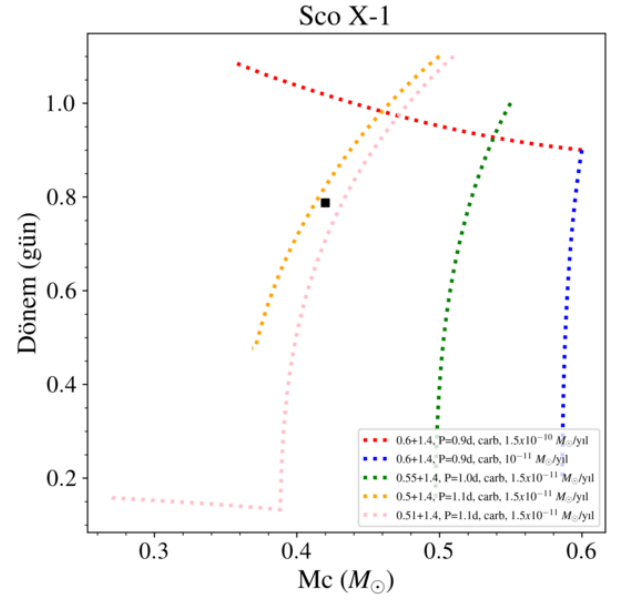
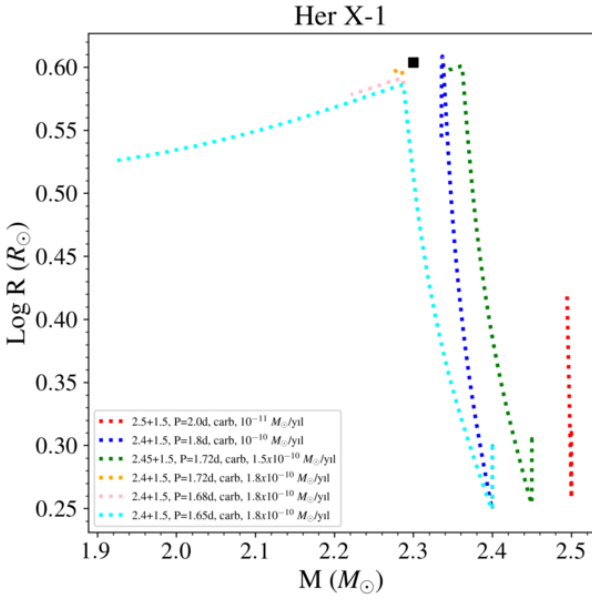
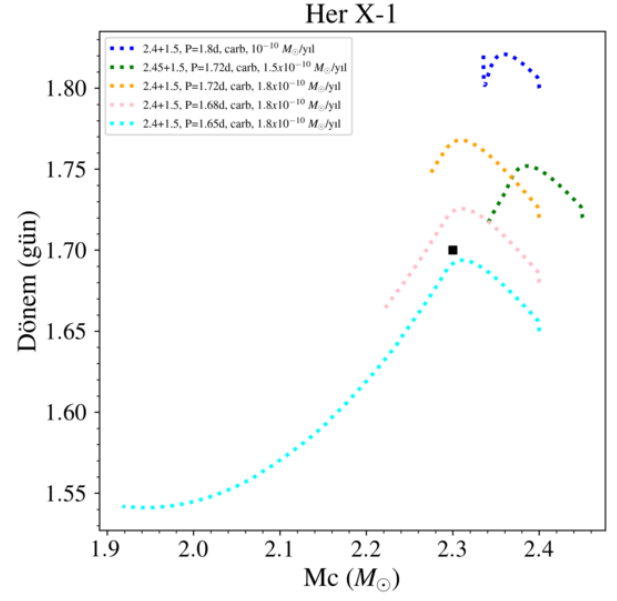
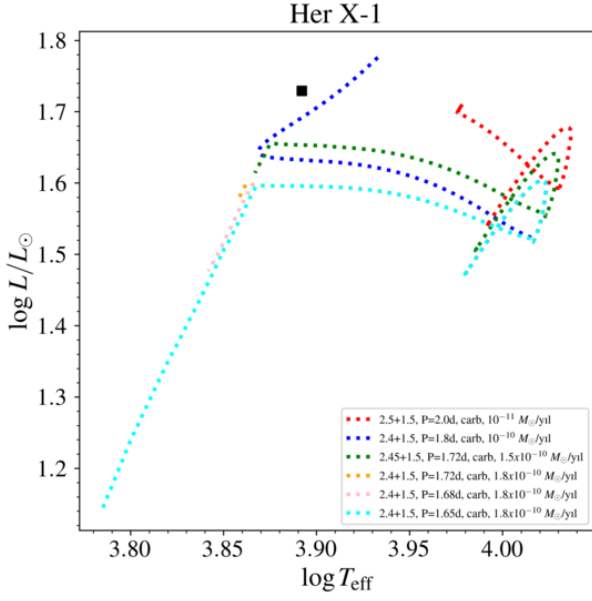
En parlak LMXB olarak bilinen Sco X-1, Giacconi ve diğ. (1962) tarafından keşfedilmiştir. Optik bileşeni V818 Sco'dur (Sandage ve diğ. 1966). Sistem 0.78 günlük bir yörünge dönemine sahiptir ve kütleli 1.4 M_{\odot} olan bir nötron yıldızından ve kütleli yaklaşık 0.42 M_{\odot} olan bir optik bileşenden oluşmaktadır (Steeeghs & Casares 2002). Optik gözlemlere dayanarak, tayf türünün G5'ten daha ön-tür olduğu düşünülmektedir. Sistemin uzaklığı 2.8 ± 0.3 kpc'dir (Bradshaw ve diğ. 1999) ve sistem parlaklık değişiminin arttığı yüksek durum ile azaldığı düşük durum özelliğini ışık değişiminde sergilemektedir (Bandyopadhyay ve diğ. 1999). Sistemin fotometrik değişimi İçli ve diğ. (2020) tarafından ele alınmıştır.

3 Korunumsuz Evrim Modelleri

Korunumsuz evrim modellerinin oluşturulması kapsamında hem geri-tür bir bileşenden gerçekleşen kütle kaybı mekanizmaları hem de böylesi sistemlerde kütle aktarımı etkisi modellerde dikkate alındı. Seçilen nötron bileşenli çift yıldızların evriminin nasıl gerçekleştiğini araştırarak bu tür sistemlerin ileride hangi sonuç parametreleri altında nasıl sistemler oluşturacakları konusunda tahminler oluşturulmaya çalışılmıştır.

Çift sistemin evrim modelleri yapılırken açık kaynak kod olan MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) (Paxton ve diğ. 2011, 2018, 2019) evrim kodu kullanılmıştır. Bir nötron yıldızı bileşene sahip X-ışın çiftlerinin nasıl oluştuğu ve hangi aşamalardan geçerek mevcut gözlenen duruma geldiklerinin irdelenmesi aşamasında modellerde küçük-kütleli optik bileşene sahip örnekler olan Her X-1 ve Sco X-1 sistemleri incelenmiştir.

MESA kodu ile korunumsuz koşullar altında yapılan evrim modellerinde çekimsel rüzgar ile kütle kaybı için Tout & Eggleton (1988) mekanizması, yıldız rüzgarı ile kaybedilen kütlelerin toplanması ve toplanma oranları



Şekil 1. Her X-1 sisteminin MESA evrim kodu ile elde edilmiş H-R (üst panel) ve M-R (alt panel) diyagramlarında farklı başlangıç koşullarına sahip korunumsuz evrim yaklaşımları. Siyah kare bileşen yıldızın gözlemsel konumunu temsil etmektedir.

Şekil 2. Her X-1 (üst panel) ve Sco X-1 (alt panel) sistemlerinin MESA evrim kodu ile elde edilmiş M-P diyagramında farklı başlangıç koşullarına sahip korunumsuz evrim yaklaşımları. Siyah kare bileşen yıldızın gözlemsel konumunu temsil etmektedir.

"Bondi-Hoyle-Lyttleton" mekanizması ile ele alınmıştır. Tüm test modellerinde sistemler için kütle aktarımı etkinlik parametrelerinin farklı değerlerdeki varsayımları uygulanmıştır. Kütle aktarımı hesabı için "Kolb" şablonu değerlendirilmiştir. Yörünge açısal momentum kaybı ise manyetik frenleme (Rappaport ve diğ. 1983; Van & Ivanova 2019; Soethe & Kepler 2021), çekimsel ışımaya ve kütle kaybı mekanizmaları ile ele alınmıştır. Bu çalışma kapsamında ise modellerde dönme ve konveksiyonu artırılmış bir manyetik frenleme mekanizması olan "CARB-MB" (Soethe & Kepler 2021) yaklaşımı uygulanmıştır.

Küçük-kütleli bileşene sahip hedef sistemler Her X-1 ve Sco X-1 sistemleri için farklı başlangıç parametrelerine sahip, kütle ve açısal momentum kaybı süreçlerinin test edildiği birçok evrim modeli oluşturulmuştur. Evrim modellerinde Güneş metal bolluğu ve $1.4 M_{\odot}$ 'lik nötron yıldızı varsayımı uygulanmıştır. Kütle kaybı sürecinin manyetik frenleme ve kütle kaybı parametresi ile sağlandığı korunumsuz evrim yaklaşımlarından elde edilen ilk sonuçlar Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir. H-R diyagramı, Kütle-Yarıçap (M-R) ve Kütle-Dönem (M-P) diyagramlarında temsil edilen farklı renkler ele alınan

korunumsuz model yaklaşımlarının farklı başlangıç koşullarına karşılık gelmektedir.

4 Sonuçlar ve Tartışmalar

Bu çalışmada, korunumsuz evrim yaklaşımlarında Her X-1 ve Sco X-1 sisteminde farklı manyetik frenleme mekanizmalarının ve sabit kütle kaybı parametresinin evrime etkisi araştırılmıştır. Elde edilen ilk sonuçlar Şekil 1 ve Şekil 2 ile verilen H-R, M-R ve M-P evrim diyagramlarında gösterilmiştir. Grafiklerde siyah kareler hedef sistemin optik bileşeninin gözlemsel konumunu temsil ederken, kesikli çizgi CARB-MB ve kütle kayıp parametresinin etkisiyle kütle kaybını göstermektedir. Her X-1 çift sisteminin evrim modelinde optik bileşenin başlangıç kütle aralığı 2.4-2.5 M_{\odot} arasında olup nötron yıldızının kütlesi 1.5 M_{\odot} 'dir. Başlangıç yörünge dönemi 1.65-2 gün aralığında seçilmiştir.

Model sonuçlarından açıkça görebiliriz ki, her iki sistemin de sahip olduğu bileşenin $10^8 - 10^9$ yıl zaman ölçeğinde beklenen kütle kaybı oranını yaşaması için daha büyük kütle kayıp oranı yaklaşımlarını dikkate almalıyız. Bu bağlamda modellerde düzenli kütle kaybı 1.8×10^{-10} ve $1.0 \times 10^{-11} M_{\odot}/\text{yıl}$ aralığında değişmektedir. Burada Şekil 1'deki model sonuçlarına bakıldığında açık mavi renk ile temsil edilen evrim modeli Her X-1 sisteminin mevcut gözlem koşullarına en yakın olanıdır. Bu modelde optik bileşen, gözlemsel koşullarına ulaşana kadar kütlesinin yaklaşık %1'ini kaybeder. Benzer şekilde Şekil 2'de M-P diyagramında Sco X-1 sisteminin model sonuçlarında, sistemin gözlemsel koşullarını belirli bir aralığa düşen model yaklaşımları ile sağladığı görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK (117F188-119F077) tarafından desteklenmektedir. T.İ. BİDEB 2211-C ve 2214-A burslarından dolayı ve 15AT60-776 ve 18AT60-1298 proje numaralı T60 teleskobunun kullanımındaki kısmi desteği için TÜBİTAK'a, bilimsel ziyareti süresince desteklerinden dolayı Max-Planck Astrofizik Enstitüsü'ne ve S. de Mink'e teşekkür eder.

Kaynaklar

- Bandyopadhyay R. M., Shahbaz T., Charles P. A., Naylor T., 1999, *MNRAS*, 306, 417
- Bradshaw C. F., Fomalont E. B., Geldzahler B. J., 1999, *ApJ*, 512, L121
- Brookshaw L., Tavani M., 1993, *ApJ*, 410, 719
- Cherepashchuk A. M., Kovalenko V. M., Kovalenko O. N., Mironov A. V., 1974, *Peremennye Zvezdy*, 19, 305, *ADS*
- De Greve J. P., Vanbeveren D., 1980, *Ap&SS*, 68, 433
- Giacconi R., Gursky H., Paolini F. R., Rossi B. B., 1962, *Phys. Rev. Lett.*, 9, 439
- İçli T., Yakut K., 2016, preprint, ([arXiv:1603.03905](https://arxiv.org/abs/1603.03905)), *ADS*
- İçli T., Koçak D., Boz G. Ç., Yakut K., 2013, *AJ*, 145, 127
- İçli T., Koçak D., Yakut K., 2019, *IAU Symposium*, 346, 239
- İçli T., Koçak D., Yakut K., 2020, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 50, 499
- İçli T., 2016, Master's thesis, University of Ege
- İçli T., Yakut K., 2015, in Ness J.-U., ed., *The Extremes of Black Hole Accretion*. p. 89
- Kalomeni B., Nelson L., Rappaport S., Molnar M., Quintin J., Yakut K., 2016, *ApJ*, 833, 83
- Koçak D., Yakut K., Southworth J., Eggleton P. P., İçli T., Tout C. A., Bloemen S., 2021, *ApJ*, 910, 111
- Leahy D. A., Abdallah M. H., 2014, *ApJ*, 793, 79

- Massevitch A., Yungelson L., 1975, *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 46, 217, *ADS*
- Middleditch J., Nelson J., 1976, *ApJ*, 208, 567
- Paczyński B., Ziółkowski J., 1967, *Acta Astron.*, 17, 7, *ADS*
- Paxton B., Bildsten L., Dotter A., Herwig F., Lesaffre P., Timmes F., 2011, *ApJS*, 192, 3
- Paxton B., ve diğ., 2018, *ApJS*, 234, 34
- Paxton B., ve diğ., 2019, *ApJS*, 243, 10
- Podsiadlowski P., Rappaport S., Pfahl E. D., 2002, *ApJ*, 565, 1107
- Popova E. I., Tutukov A. V., Yungelson L. R., 1978, *Nauchnye Informatsii*, 42, 45, *ADS*
- Postnov K. A., Yungelson L. R., 2014, *Living Reviews in Relativity*, 17, 3
- Postnov K., Shakura N., Staubert R., Kochetkova A., Klochkov D., Wilms J., 2013, *MNRAS*, 435, 1147
- Rappaport S., Verbunt F., Joss P. C., 1983, *ApJ*, 275, 713
- Refsdal S., Roth M. L., Weigert A., 1974, *A&A*, 36, 113, *ADS*
- Reynolds A. P., Quaintrell H., Still M. D., Roche P., Chakrabarty D., Levine S. E., 1997, *MNRAS*, 288, 43
- Sandage A., ve diğ., 1966, *ApJ*, 146, 316
- Scott D. M., Leahy D. A., Wilson R. B., 2000, *ApJ*, 539, 392
- Shakura N. I., Smirnov A. V., Ketsaris N. A., 1997, in Wickramasinghe D. T., Bicknell G. V., Ferrario L., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 121, IAU Colloq. 163: Accretion Phenomena and Related Outflows*. p. 379
- Soethe L. T. T., Kepler S. O., 2021, *MNRAS*, 506, 3266
- Steehgs D., Casares J., 2002, *ApJ*, 568, 273
- Taam R. E., Wade R. A., 1985, *ApJ*, 293, 504
- Tout C. A., Eggleton P. P., 1988, *MNRAS*, 231, 823
- Tutukov A. V., Yungelson L. R., 1971, *Nauchnye Informatsii*, 20, 86, *ADS*
- Ulaş B., Kalomeni B., Keskin V., Köse O., Yakut K., 2012, *New Astron.*, 17, 46
- Van K. X., Ivanova N., 2019, *ApJ*, 886, L31
- Wang X., Wang Z., 2014, *ApJ*, 788, 184
- Yaşarsoy B., Yakut K., 2013, *AJ*, 145, 9
- Yakut K., Eggleton P. P., 2005, *ApJ*, 629, 1055
- Çokluk K. A., Koçak D., İçli T., Karaköse S., Üstündağ S., Yakut K., 2019, *MNRAS*, 488, 4520
- Šimon V., Kroll P., Neugebauer P., Hudec R., 2002, *New Astron.*, 7, 349

Access:

M23-0361: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.