

M51 ULX-4 ve NGC 1316 ULX X7'nin X-ışın ve Optik Özellikleri

Sinan Allak^{1,3}  , Aysun Akyüz² , Faruk Soyduğan^{3,4} 

¹ Çukurova Üniversitesi, Uzay Bilimleri ve Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (UZAYMER), 01330, Adana, Türkiye

² Çukurova Üniversitesi, Fizik Bölümü, 01330, Adana, Türkiye

³ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fizik Bölümü, 17100, Çanakkale, Türkiye

⁴ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Astrofizik Araştırma Merkezi ve Ulupınar Gözlemevi, 17100, Çanakkale, Türkiye

Accepted: November 14, 2022. Revised: November 14, 2022. Received: November 13, 2022.

Özet

Bu çalışmada, gökada NGC 1316'da ULX X7 ve M51'de geçici ULX-4 kaynaklarının X-ışın tayfsal, zamansal ve optik özellikleri *Chandra*, *XMM-Newton*, *Swift-XRT* ve *HST* arşiv verileri kullanılarak kapsamlı bir şekilde araştırıldı. Bir X-ışın kaynağı olan X7'nin, ilk defa bu çalışmada 2019 *Chandra* gözlemleri kullanılarak bir ULX olduğu belirlendi. İncelenen diğer kaynak M51 ULX-4'ün, 20 yıllık dönemde X-ışın akısı ise ~200 kat değişkenlik göstermektedir. Kaynağın bu uzun dönemde belirlenen çift modlu X-ışın akı dağılımı, pulsar içeren ULX'lerde gözlenen dağılıma benzerlik göstermektedir. ULX-4'ün belirlediğimiz bir optik karşılığında 264 günlük periyodik optik değişkenlik gözlenmiştir. Bu değişkenliğin nedeni olarak tıkkız (compact) nesnenin doğası için iki önemli senaryo sunulmuştur.

Abstract

In this study, the results of temporal and spectral analyzes of transient ultra-luminous sources ULX-4 and X-7 in the galaxies M51 and NGC 1316 using *Chandra*, *XMM-Newton* and *Swift-XRT* observations are presented. In this study, for the first time X-7 was determined as ULX source using 2019 *Chandra* observations. Another important part of this study is M51 ULX-4 which showed long-term X-ray flux variability (factor of ~200) over the 20-year. The bimodal X-ray flux distribution of the source determined in this long period is similar to the distribution observed in pulsar ULXs. One of ULX-4 counterparts exhibited a low-amplitude optical periodicity of 264 days. For this periodicity, two important scenarios are presented for the nature of the compact object.

Anahtar Kelimeler: M51 ULX-4 – NGC 1316 ULX X7 – ULXs – X-rays: Binaries – Optical Counterparts

1 Giriş

Aşırı parlak X-ışın kaynakları (ULX), yıldız kütleli (5-10 M_{\odot}) bir karadelik için Eddington sınırını aşan X-ışın ışımasına ($L_x \geq 10^{39}$ erg s^{-1}) sahip ve barınak galaksinin merkezinde bulunmayan nokta-benzeri kaynaklardır (Kaaret ve diğ. 2017; Fabrika ve diğ. 2021). Şimdiye kadar Gökadamızda görülmüş çok net bir ULX kaynağı bulunmamaktadır. Ancak, Galaktik kaynak olan Swift J0243.6+6124, nötron yıldızı içeren bir ULX olarak önerilmektedir (Beri ve diğ. 2021).

Hızlı X-ışın zamanlama çalışmalarının ilk çarpıcı sonucu NuSTAR ile M82' deki bir ULX'ten uyumlu 1.37 saniyelik X-ışın titreşimlerinin keşfi olmuştur (Bachetti ve diğ. 2014). Sinyal, M82'nin merkezin kalabalık bölgesinde bulunan, $\geq 10^{39}$ erg s^{-1} 'in üzerinde bir pik ışımasına sahip geçici (transient) bir X-ışın kaynağı olan M82 X-2' den gözlemlendi. Tutarlı atımlar, dönen bir nötron yıldızının açık göstergesidir. Bu durum, karadelik üzerine yığılma olasılığını dışladığı gibi ve gözlenen parlaklığın Eddington sınırını çok aştığından nötron yıldızların bilinen kütleleri ile açıklanmasının zorluğunu ortaya çıkardı (Kaaret ve diğ. 2017). Pulsar benzeri sinyal keşfedilen diğer sistemlere örnek olarak ise, NGC 7793 P13, NGC 5907 ULX-1, NGC 300 ULX-1, NGC 1313 X-2 ve M51 ULX-7 verilebilir (Fürst

ve diğ. 2016; Israel ve diğ. 2017a,b; Carpano ve diğ. 2018; Sathyaprakash ve diğ. 2019; Rodríguez Castillo ve diğ. 2020). Ayrıca, Brightman ve diğ. (2018), M51 ULX-8'in bir siklotron rezonans saçılma (cyclotron resonance scattering) özelliğine sahip olduğunu keşfettiler. Bu özellik, yüklü parçacıkların güçlü bir manyetik alanla etkileşimlerinden kaynaklandığından bu sisteminin bir nötron yıldızı barındırdığını göstermektedir.

ULX'ler birçok açıdan diğer X-ışın kaynaklarından farklıdır. Sahip oldukları enerjiler onları tipik XRB'ler ve AGN' ler arasında farklı bir sınıfa dahil etmektedir. Kozmolojik olarak, yıldızların evrim süreçlerinin anlaşılması için önemli ipuçları sunmakta ve ayrıca orta kütleli karadeliklerin (10^2 - $10^4 M_{\odot}$) araştırılması için önemli bir araç olma özelliğine sahiptir. ULX'ler aynı zamanda, yıldız kütleli karadeliklere ve nötron yıldızlarına süper-Eddington yığılma içeren, en uç fiziksel ortamları araştırmamıza olanak sağlayan gök cisimleridir.

ULX'lerin çoğu, birkaç yıl, hatta on yıllar boyunca sabit ışıtmaya sahip olabilirler. Bazıları ise kısa zaman ölçeğinde yüksek akı değişiklikleri gösterebilirler. Hatta bazıları günler ya da aylar mertebesinde tamamen sönebilir ve tekrardan ULX seviyesinde ışıtmaya yapabilirler (Walton ve diğ. 2021). Bu tür kaynaklara geçici ya da transit ULXs denir. Pulsar özelliği keşfedilen ULX'ler (PULX'ler), genellikle geçici ULX'ler olarak tanımlanabilecek kadar yüksek akı değişkenliği gösterirler. Geçici ULX'lerin donör kütleleri ve yaş aralıkları hakkında ortak

* 0417allaksinan@gmail.com

Çizelge 1. NGC 1316 ULX X7'nin *Chandra* ve *HST* gözlemleri. Tarih "yıl-ay-gün" biçiminde verilmiştir.

Dedektör	Filtre	ObsID	Tarih	Süre (ks)	Rate ($\times 10^{-4}$) (count/s)
<i>Chandra</i>					
ACIS-S	C1	2022	2001-04-17	29.85	17.01 \pm 3.48
ACIS-S	C2	20340	2019-04-16	44.97	7.86 \pm 1.74
ACIS-S	C3	22179	2019-04-17	38.95	10.80 \pm 2.04
ACIS-S	C4	22180	2019-04-20	13.57	6.65 \pm 3.29
ACIS-S	C5	20341	2019-04-22	51.39	17.20 \pm 2.24
ACIS-S	C6	22187	2019-04-25	53.18	19.41 \pm 2.30
<i>HST</i>					
ACS/WFC	F555W	j6n202010	2003-03-04	6.98	
ACS/WFC	F814W	j6n201030	2003-03-07	2.20	
ACS/WFC	F475W	j90x01020	2005-02-16	0.76	
WFC3/UVIS	F336W	ib3n03040	2010-07-30	3.23	
WFC3/IR	F110W	ib3n03030	2010-07-30	0.40	

Çizelge 2. M51 ULX-4'ün X-ışın gözlemleri. Tarih "yıl-ay-gün" biçiminde verilmiştir.

Ad	ObsID	Dedektör	Tarih	Süre (ks)
<i>XMM-Newton</i>				
XM1	0212480801	EPIC	2005-07-01	49.21
XM2	0303420101	EPIC	2006-05-20	54.11
XM3	0303420201	EPIC	2006-05-24	36.81
XM4	0677980701	EPIC	2011-06-07	13.32
XM5	0677980801	EPIC	2011-06-11	13.32
XM6	0830191501	EPIC	2018-06-13	63.00
XM7	0830191601	EPIC	2018-06-15	63.00
XM8	0852030101	EPIC	2019-07-11	77.00
<i>Chandra</i>				
C1	354	ACIS-S	2000-06-20	14.86
C2	1622	ACIS-S	2001-06-23	26.81
C3	3932	ACIS-S	2003-08-07	47.97
C4	12562	ACIS-S	2011-06-12	9.63
C5	12668	ACIS-S	2011-07-03	9.99
C6	13813	ACIS-S	2012-09-09	179.20
C7	13812	ACIS-S	2012-09-12	157.46
C8	15496	ACIS-S	2012-09-19	40.97
C9	13814	ACIS-S	2012-09-20	189.85
C10	13815	ACIS-S	2012-09-23	67.18
C11	13816	ACIS-S	2012-09-26	73.10
C12	15553	ACIS-S	2012-10-10	37.57
C13	19522	ACIS-I	2017-03-17	37.76
C14	20998	ACIS-S	2018-08-31	19.82

bir görüş henüz oluşmamıştır. Bu yüzden, optik karşılıklarının belirlenmesi bu konuda önemli gelişmelere olanak sunabilir. Ancak, optik ışıma kaynağının yalnızca disk yada donör yıldızı veya her iki bileşenin katkısının olduğu konusunda belirsizler mevcuttur. Yüksek uzaysal çözünürlüklü, sürekli *HST* gözlemlerinin yanı sıra yeni nesil James Webb Teleskobu verilerinin bu belirsizlikleri büyük oranda çözme potansiyeli bulunmaktadır.

Özellikle, ULX'lerin optik karşılıklarının tanımlanması ve özelliklerinin ortaya çıkartılması, X-ışın çiftlerinin anlaşılması

Çizelge 3. M51 ULX-4'ün *HST*/ACS ve WFC3 gözlemleri. Tarih "yıl-ay-gün" biçiminde verilmiştir.

Dedektör	Filtre	ObsID	Tarih	Süre (s)
WFC	F435W	J97C51R3Q	2005-01-20	340
WFC	F555W	J97C51R4Q	2005-01-20	340
WFC	F814W	J97C51R6Q	2005-01-20	340
WFC3	F275W	ICD401010	2014-09-11	1400
FWC3	F336W	ICD401020	2014-09-11	1450
WFC	F606W	JD8F01010	2016-10-05	2200

ve tıkkız nesnelere kütleleri konusunda önemli ipuçları sunmaktadır. Ayrıca, optik ışımının yığılma diskinden ve/veya donör yıldızdan geldiği konusunda hangi bileşenin olası katkısının daha baskın olduğu hakkında önemli bir ipucu sunabilir. Örneğin, erken tür OB yıldızlarının göstergesi olan mavi renklere sahip ULX'lerin nokta benzeri karşılıkları belirlenerek bu sistemlerinin donör yıldızları hakkında önemli çıktılar elde edilmiştir (Soria ve diğ. 2005).

NGC 1316, Fornax gökada kümesinin eteklerinde bulunan, 19 Mpc uzaklığında dev bir eliptik gökadadır (Jensen ve diğ. 2003). Girdap (whirlpool) gökadası olarak da bilinen M51(NGC 5194) ve eşlikçi gökada NGC 5195, Av Köpekleri Takımıyıldızı içinde yer alan, 9 Mpc uzaklıkta bulunan (Song ve diğ. 2020) etkileşim halindeki bir çift gökadadır. Bu çalışmada, M51'de bulunan ULX-4 ve ilk defa bu çalışmada tanımlanan NGC 1316'da bulunan ULX X7 kaynağının X-ışın ve optik özellikleri ele alınmıştır.

2 Gözlemler, İndirgemeler ve Analizler

2.1 X-ışın

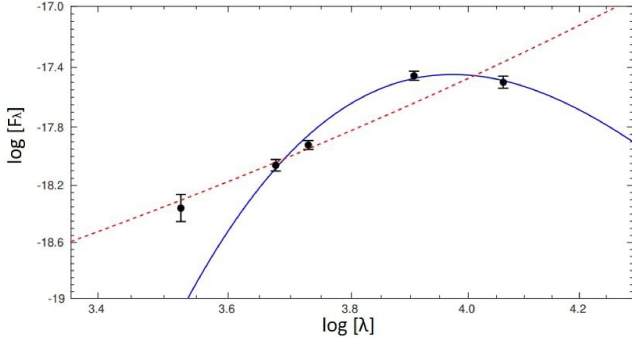
NGC 1316 X7'nin, *Chandra* ACIS-S ve *HST* ve M51 ULX-4'ün *XMM-Newton*, *Chandra*, *Swift-XRT* ve *HST* gözlemleri sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2 ve Çizelge 3'de verilmiştir. M51 ULX-4, *Swift-XRT* tarafından 2005 ve 2021 arasında birçok kez (276 gözlem) gözlemlendi. Bu çalışmada kullanılan gözlemlerin numaraları 10717, 11417, 32017, 37267, 81964, 11106, 30083, 35895, 80113 ve 745090'dır.

Chandra verileri, kalibrasyon dosyaları CALDB v4.9 ile CIAO v4.12 yazılımı kullanılarak analiz edildi. CIAO'da bulunan wvdetect fonksiyonu kullanılarak X-ışın kaynakları tespit edildi. *XMM-Newton* EPIC verileri Science Analysis System (SAS) v17.0 yazılımı ile analiz edildi. Her gözlem için EPIC-pn ve MOS görüntü dosyalarını elde etmek için epchain ve emchain paketleri kullanıldı. sırasıyla, *Chandra* ve *XMM-Newton* için 4" ve 15" dairesel bir yarıçap seçilerek kaynak verilerini indirgemek için standart adımlar izlenmiştir.

PC modunda (Photon Counting mode, Foton Sayma modu) *Swift-XRT* verileri için foton sayım oranları, web sayfasında belirtilen otomatik prosedürler Evans ve diğ. (2009) kullanılarak elde edildi. Bu prosedürleri uyguladığımızda, 0.3–10 keV enerji bandında toplam sayımları sıfırdan büyük 82 gözlem kullanılmıştır.

Ayrıca, uzun dönem değişimleri için mevcut tüm gözlemlerden akıllar hesaplandı. İstatistiği düşük *Chandra* verileri için, foton sayım oranları, CIAO da bulunan SRCFLUX fonksiyonu ile üst limit değerleri kullanılmıştır.

Güç-yasası (power-law: PL), çok renkli-disk karacisim



Şekil 1. X7'nin optik adayı için oluşturulan SED. SED modelleri, karacisim için mavi düz çizgi ve güç yasası için kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Kara cismin sıcaklığı 3100 ± 400 K ve güç yasası modeli X-7 için $\alpha = 1.75 \pm 0.35$ 'tir. Akı değerleri $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$, dalgaboyu Å birimindedir.

(DISKBB) ve karacisim (bbody) gibi tek bileşenli modeller, kaynakların enerji tayfını temsil edebilecek en iyi modelleri bulmak için seçilmiştir. Ayrıca kaynak tayfının DISKBB + PL gibi sık kullanılan iki bileşenli modeller de denenmiştir. Veri istatistiği iyi olan *Chandra* ve *XMM-Newton* gözlemlerindeki akılar, *XSPEC*'te mevcut olan *cflux* fonksiyonu kullanılarak 0.3–10 keV enerji bandında hesaplandı. Bu akılar ve galaksilerin uzaklıkları dikkate alınarak L_x değerleri hesaplandı.

2.2 Optik

ULX'lerin optik karşılıklarının belirlenmesi, astrometrik düzeltmeler tarafından sağlanan hassas kaynak konumlarını gerektirir. *Chandra* ve *HST* görüntüleri arasında görelî astrometrik hesaplamalar birçok çalışmada kullandığımız yöntem takip edilerek yapıldı.

HST görüntülerinde optik kaynakların belirlenmesinde *DAOPHOT*'ta bulunan *daofind* fonksiyonu kullanıldı. Belirlenen optik kaynakların Vega kadir değerleri için sırasıyla NGC 1316 ve M51 için *DOLPHOT* ve *DAOPHOT* PSF fotometrisi yapıldı.

Optik ışımının donör yıldızdan kaynaklandığı varsayarak, optik karşılıkların tayf türleri, *pysynphot* kullanılarak elde edilen spektral enerji dağılımı (SED)'ler tahmin edildi. Bu programda CK04 standart yıldızların sentetik tayfları kullanıldı (Castelli & Kurucz 2004). Ayrıca, optik karşılıkların tayfsal tipini belirlemenin alternatif bir yolu olarak, bu optik karşılıkların SED'leri bir karacisim modeline uyduruldu. Ek olarak, optik karşılıkların yaşını ve kütlelerini belirlemek için renk-kadir diyagramları (CMD'ler) oluşturuldu.

3 Sonuçlar ve Tartışmalar

3.1 NGC 1316 ULX X7

Bu çalışmada, ilk defa Nisan 2019 *Chandra* gözlemleri kullanılarak NGC 1316'da $L_x > 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ olan yeni bir ULX tanımlanmıştır. Bu ışıma, Nisan 2001'de alınan *Chandra* verilerinden elde edilen değerden neredeyse ~ 4 kat daha yüksek bir değere sahiptir. X7'nin X-ışın enerji tayflarını en iyi temsil eden model, foton indisleri C5 verisi ile $\Gamma = 2.24$ ve C6 verisi için $\Gamma = 1.56$ olarak güç-yasası modelidir. Γ değerlerinin her ikisi de Galaktik karadelik çiftleri için tanımlanan sert (hard) durumlara karşılık gelir.

HST arşiv verilerini kullanarak NGC 1316'deki X7'nin optik özellikleri incelenmiştir. Astrometrik düzeltmeden sonra $0''.22$ hata yarıçapı içinde bir optik aday tespit edilmiştir. Optik adayın görünür parlaklığı birçok ULX'in optik karşılığı gibi sönüktür (> 22.5 kadir). Optik ışımının donör yıldızdan geldiğini varsayarak oluşturulan, SED (Şekil 1'de görüldüğü gibi) bir karacisim ve/veya güç-yasası modeline uyum göstermiştir. Her iki model de benzer uyumlandırma istatistikleri vermesine rağmen, güç-yasası eğimi ULX'lerin optik karşılığı için önerilen değerde değildir. Bu yüzden, X-7 için uygun model karacisim modelini öneriyoruz. Bu sonuç, optik ışımının donör yıldızdan geldiği yada katkısının çok fazla olduğu olasılığını güçlendirmektedir. X-7'nin donörün ölçülen sıcaklığı ve mutlak parlaklığı M tipi bir süperdev olabileceğini gösterir. Benzer tipte donörler Gladstone ve diğ. (2013)'ün çalışmasında NGC 3034 ULX-5, NGC 253 ULX-1 ve ULX-2 kaynakları için de tanımlanmıştır.

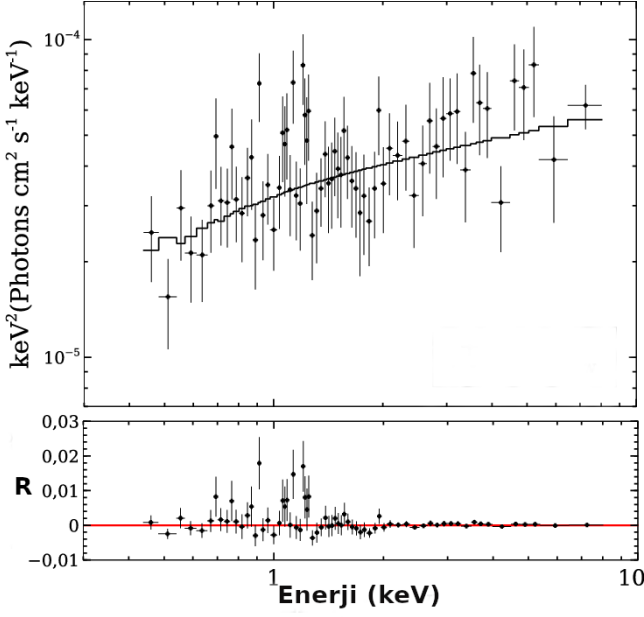
Ayrıca çalışmamızda, X7'nin $\sim 6''$ güneybatısında $\alpha = 03:22:40.55$ ve $\delta = -37:12:26.45$ konuma sahip yeni bir geçici ULX adayı tanımladık (XT-1). Önceki çalışmalarda, bu kaynak düşük akı ile belirlenen bir XRB olarak tanımlanırken, yeni gözlemlerde ULX ışıma değerine ulaştığı belirlenmiştir. Ancak, kaynak XT-1'in *HST* görüntülerinde optik karşılığı belirlenememiştir.

3.2 M51 ULX-4

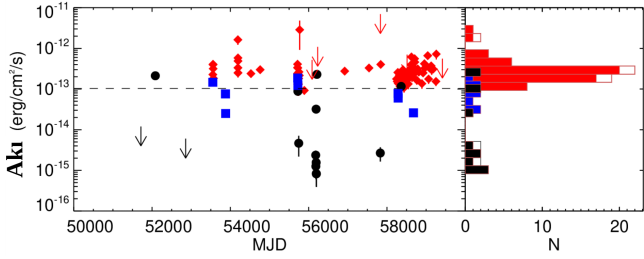
Daha önce çalışılan *XMM-Newton*, *Chandra* ve *Swift-XRT* verilerinin yanısıra yeni yayınlanmış bir çok gözlem verisi analiz edilmiştir. Bu verilerin bir kısmı önceki çalışmalarda X-ışın tayfsal modelleme ve zamansal analizlerde kullanılmamıştır. Uygulanan tayfsal modeller arasında, *XMM-Newton*, *Chandra* verilerine, soğurulma içeren güç-yasası modeli ile 1.44–2.0 foton indisi aralığında istatistiksel olarak kabul edilebilir bir uyum sağlamıştır. Bu aralık, kaynağın termal olmayan emisyonla karakterize edilen sert bir durum ile tutarlıdır (Remillard & McClintock 2006). Eddington ışımasında yığılma olduğu varsayıldığında, tız cismin kütlesi 5–15 M_{\odot} , aralığında yıldız kütleli bir karadelik olabilir. Güç-yasası modeli kullanılarak C12 verisinin enerji tayfı Şekil 2'de gösterilmiştir. Tayfın profili, Sutton ve diğ. (2013) ve Fabrika ve diğ. (2021) tarafından bir ULX'in sert aşırı-parlak (hard ultra-luminous) durumu tanımlanmasına benzetilmektedir.

XMM-Newton, *Chandra* ve *Swift-XRT*'nin arşiv gözlemlerinin çoğunu kullanarak, ULX-4'ün uzun dönem X-ışın ışık eğrisini elde edilmiştir (bkz. Şekil 3). ULX-4'ün en yüksek akısının en düşük akısına oranı olan X-ışın değişkenlik faktörü ~ 230 olarak hesaplanmıştır. ULX'lerde yüksek akı değişkenliğinin olası nedenlerinden biri olarak pervane etkisi tartışılmıştır (Tsygankov ve diğ. 2016; Earnshaw ve diğ. 2018). Earnshaw ve diğ. (2018) ve Song ve diğ. (2020), ULX-4'de dahil olmak üzere bazı ULX'lerde iki modlu (bi-modal) bir akı dağılımının varlığına dikkat çekmişlerdir. Çalışmamızda mevcut verileri kullanarak bu senaryo ULX-4 için test edilmiştir ve *Chandra* verileri böyle bir dağılımı gösterdiği gözlenmiştir (bkz. Şekil 3). İki modlu dağılımın bir disk/rüzgâr devininin göstergesi olduğu önerilmektedir. (Vinokurov ve diğ. 2018).

Görelî sert X-ışın tayfları ve özellikle *Chandra* veri seti tarafından belirtilen uzun dönem akı değişkenliği göz önüne alındığında (bkz. Şekil 3), ULX-4'ün aslında bir nötron yıldızı barındırıyor olması mümkündür (Vinokurov ve diğ. 2018; Rodríguez Castillo ve diğ. 2020). Ancak, pulsar benzeri bir sinyalin kaydedilmediği belirtmek gerekir.



Şekil 2. Güç-yasası modeli ile iyi uyum veren ULX-4'ün Chandra (C12) enerji tayfı. R değerleri model değerlerinin gözlemden farkını (rezidü) temsil etmektedir.

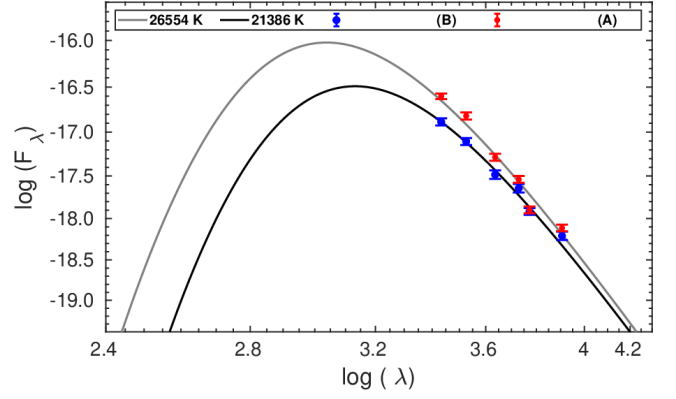


Şekil 3. ULX-4'ün uzun dönem X-ışın ışık eğrisi (sol) ve histogramı (sağ). Chandra, XMM-Newton and Swift-XRT gözlemleri sırasıyla siyah, mavi ve kırmızı renkli sembollerle temsil edilmiştir. Kesikli siyah çizgi, bir ULX durumu için X-ışın ışıma eşik seviyesini göstermektedir.

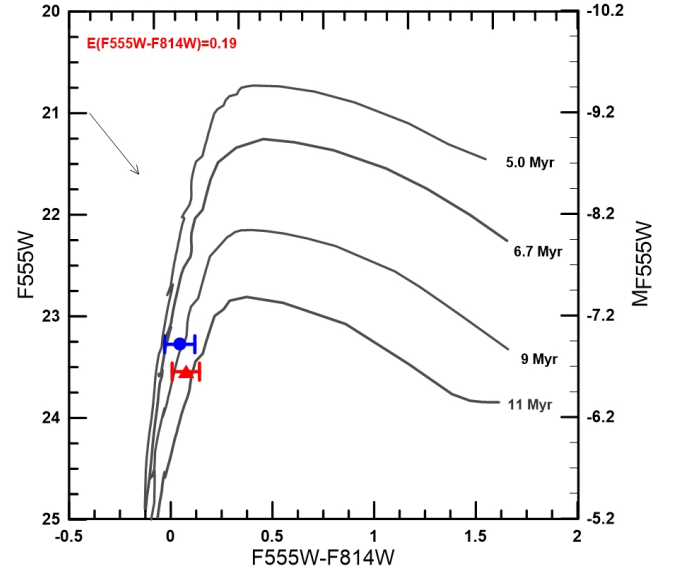
Çalışmamızda, *HST/ACS* ve *HST/WFC3* verileri kullanılarak ULX-4'ün iki optik karşılığı (A ve B) belirlendi. İki optik karşılık 0.18'' astrometrik hata yarıçapı içinde tespit edildi. Görünür parlaklıkları (m_V) 23–23.5 kadir aralığında ve mutlak parlaklıkları (M_V) -6.6 kadirdir. Bu parlaklıklar bilinen diğer ULX'ler için belirlenen parlaklık aralığındadır (Tao ve diğ. 2011; Allak 2022).

A ve B'nin tayfsal türleri iki farklı yöntemle tahmin edildi: (1) CK04 modellerinin kullanımı, her iki karşılığın da erken B-tipi süperdevler olduğunu gösterir. (2) Bir karacisim modeli kullanarak tayfsal uyumlandırma araştırılmıştır. SED'lere iyi uyum veren karacisim modelinden sırasıyla A ve B için 26554 ± 104 K ve 21386 ± 173 Kelvin sıcaklıkları $2-\sigma$ güvenilirlikte elde edilmiştir. Optik karşılıklar için modeller Şekil 4'de gösterilmiştir.

Optik karşılıkların yaşı ve kütlesi sırasıyla ~ 10 Myr ve $\sim 20 M_\odot$ olarak CMD'den elde edildi (bkz. Şekil 5). ULX-4'ün karşılıkları için B-tipi sınıflandırma, diğer çoğu ULX'lerin



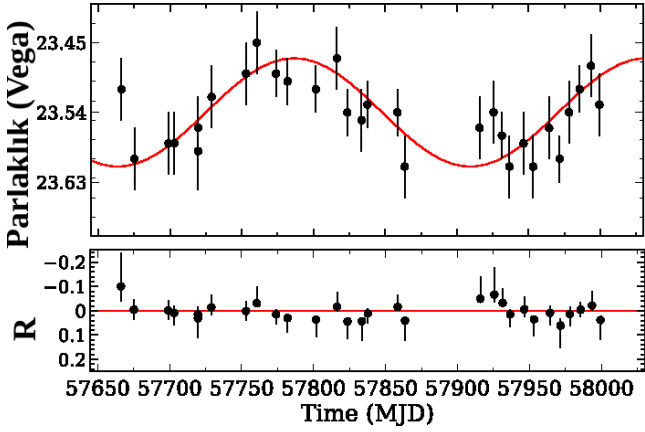
Şekil 4. M51 ULX-4'ün optik karşılıklarının SED'leri. Akı değerleri $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$, dalgaboyu \AA birimindedir.



Şekil 5. The ULX-4 optik karşılıkların (kırmızı ve mavi semboller) *HST/ACS* renk-kadir diyagramı (CMD). Padova eş-yaş çizgileri gri çizgilerle gösterilmiştir. Eş-yaş eğrileri $A_V=0.46$ kadir değeri olan sönümleme ile düzeltilmiştir.

optik karşılıkların tayfsal tipi (OB-süperdev) ile uyumludur. Ancak, optik ışıma yığılma diskinden geliyorsa, bu yaşlar optik karşılıkların yaşlarını temsil etmeyecektir.

Bu çalışmanın ilgi çekici sonuçlarından biri, optik karşılıklardan A'nın F606W filtresinde 264 ± 37 günlük düşük genlikli periyodik bir modülasyon sergilemesidir (bkz. Şekil 6). Bu görünür periyodiklik için iki olasılık göz önünde bulundurulduğunda biri donörün doğasını içerirken diğeri periyodikliğin doğası hakkında ipucu sağlar. İlk durumda, optik modülasyon, donörün kütleçekimi etkisiyle bozulan ve X-ışınları tarafından eşit olarak ısınmayan yörüngesel hareketinden kaynaklanabilir (Zampieri ve diğ. 2012). Bu durumda donör yıldız B-tipi bir süperdev olamaz, çünkü böyle bir yıldızın periyodikliğin birkaç yüz günlük yörünge periyodunun bir sonucu olduğunu varsayarsak, Roche lobunu doldurması pek olası değildir. Ayrıca, bu durum SED'nin, belki de bir yığılma diskinden yayılan sıcak bir rüzgârdan gelen ışıma ile nispeten



Şekil 6. 2016–2017 *HST* F606W gözlemlerinden oluşturulan ULX-4'ün optik karşılıklarından biri olan A'nın ışık eğrisi. Veriye iyi uyum veren sinüsoidal eğri kırmızı ile gösterilmiştir. R değerleri model değerlerinin gözlemden farkını (rezidü) temsil etmektedir.

soğuk bir donörden gelen ışımın bir süperpozisyonu olarak yorumlanması anlamına gelir. Böyle bir donör, bazı ULX sistemlerinde belirtildiği gibi kırmızı bir süperdev (RSG) olabilir (Heida ve diğ. 2015). Heida ve diğ. (2019), NGC 300 ULX-1 sistemindeki kırmızı bir süperdevin 0.8–2.1 yıl aralığındaki bir yörünge periyodu ile tutarlı olduğunu göstermektedir.

İkinci senaryoda, donörün gerçekten bir B–tipi (aslında bir Be/X) yıldız olduğunu varsaymaktır. Burada, Townsend & Charles (2020), bir dizi disk kaynaklı yüksek kütleli X–ışın çiftleri (Be/X) için yörünge periyodu ile süper yörünge periyodu arasında bir pozitif korelasyon gösterdiklerini belirtmişlerdir. Süper-yörünge periyodunun, tıkHz nesnenin (düzenli olarak yörünge hareketinin bir parçası olarak) donörün dairesel bir diski ile etkileşime girmesi ve disk ortamında bozulmalara ve bulanıklaşmasına neden olması ve bunun da yoğunluk dalgaları olarak yayılmasıyla optik ışımada gözlenen periyodik değişimleri ortaya çıkardığı varsayılmaktadır. Bu senaryo, tıkHz cismin olağan yörünge hareketi yerine süper-yörünge hareketi yaptığını varsayar. Bu senaryoyu dikkate alarak ve Townsend & Charles (2020) tarafından verilen bağıntıyı kullanarak, tıkHz nesne için ~10–15 günlük yörünge periyodu tahmin edilebilir. Ancak, yukarıda özetlenen senaryoların her ikisi için de kesin bir sonuca varmak bu veriler ışığında zor olmaktadır.

Teşekkür

Bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 119F315 numaralı proje ile desteklenmiştir. Bu çalışma, S. Allak'ın doktora tez çalışmasının bir parçasıdır. Ayrıca, İ. Akkaya Oralhan, S. Avdan, N. Aksaker, A. Vinokurov, K. S. Dhuga ve E. Sonbas'a değerli katkıları için teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Allak S., 2022, *MNRAS*, 517, 3495
 Bachetti M., ve diğ., 2014, *Nature*, 514, 202
 Beri A., ve diğ., 2021, *MNRAS*, 500, 565
 Brightman M., ve diğ., 2018, *Nature Astronomy*, 2, 312
 Carpano S., Haberl F., Maitra C., Vasilopoulos G., 2018, *MNRAS*, 476, L45
 Castelli F., Kurucz R. L., 2004, *A&A*, 419, 725

- Earnshaw H. P., Roberts T. P., Sathyaprakash R., 2018, *MNRAS*, 476, 4272
 Evans P. A., ve diğ., 2009, *MNRAS*, 397, 1177
 Fabrika S. N., Atapın K. E., Vinokurov A. S., Sholukhova O. N., 2021, *Astrophysical Bulletin*, 76, 6
 Fürst F., ve diğ., 2016, *ApJ*, 831, L14
 Gladstone J. C., Copperwheat C., Heinke C. O., Roberts T. P., Cartwright T. F., Levan A. J., Goad M. R., 2013, *ApJS*, 206, 14
 Heida M., ve diğ., 2015, *MNRAS*, 453, 3510
 Heida M., ve diğ., 2019, *ApJ*, 883, L34
 Israel G. L., ve diğ., 2017a, *Science*, 355, 817
 Israel G. L., ve diğ., 2017b, *MNRAS*, 466, L48
 Jensen J. B., Tonry J. L., Barris B. J., Thompson R. I., Liu M. C., Rieke M. J., Ajhar E. A., Blakeslee J. P., 2003, *ApJ*, 583, 712
 Kaaret P., Feng H., Roberts T. P., 2017, *ARA&A*, 55, 303
 Remillard R. A., McClintock J. E., 2006, in American Astronomical Society Meeting Abstracts. p. 07.05
 Rodríguez Castillo G. A., ve diğ., 2020, *ApJ*, 895, 60
 Sathyaprakash R., ve diğ., 2019, *MNRAS*, 488, L35
 Song X., Walton D. J., Lansbury G. B., Evans P. A., Fabian A. C., Earnshaw H., Roberts T. P., 2020, *MNRAS*, 491, 1260
 Soria R., Cropper M., Pakull M., Mushotzky R., Wu K., 2005, *MNRAS*, 356, 12
 Sutton A. D., Roberts T. P., Middleton M. J., 2013, *MNRAS*, 435, 1758
 Tao L., Feng H., Grisé F., Kaaret P., 2011, *ApJ*, 737, 81
 Townsend L. J., Charles P. A., 2020, *MNRAS*, 495, 139
 Tsygankov S. S., Mushtukov A. A., Suleimanov V. F., Poutanen J., 2016, *MNRAS*, 457, 1101
 Vinokurov A., Fabrika S., Atapın K., 2018, *ApJ*, 854, 176
 Walton D. J., ve diğ., 2021, *MNRAS*, 501, 1002
 Zampieri L., Impiombato D., Falomo R., Grisé F., Soria R., 2012, *MNRAS*, 419, 1331

Access:

M23-0355: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.