

NGC 628'deki Aşırı Parlak X-ışın Kaynağının Doğasının Araştırılması

Hasan Avdan¹  , Şenay Avdan¹ 

¹ Adıyaman Üniversitesi, Fizik Bölümü, 02040, Adıyaman, Türkiye

Accepted: February 12, 2025. Revised: February 12, 2025. Received: November 29, 2024.

Özet

NGC 628 galaksisinde bulunan aşırı parlak X-ışın kaynağının (ultraluminous X-ray source, ULX) X-ışın tayfsal ve zamansal özellikleri farklı tarihli X-ışın arşiv gözlemleri kullanılarak çalışılmıştır. X-ışın tayf analizleri XMM-Newton ve Chandra uydularının arşiv verileri ile yapılmıştır. Kısa dönemli zamansal değişiminin araştırılması için, her bir gözlemden kaynağın Lomb-Scargle periyodogramı oluşturulmuştur. Daha önce literatürde farklı yöntemler kullanılarak keşfedilmiş 0.1-0.4 mHz aralığındaki yarı-periyodik salınım, Lomb-Scargle yöntemi ile yeni gözlemlerde de belirlenmiştir. Ayrıca uzun dönemli zamansal değişiminin incelenmesi için Swift uydusunun arşiv verileri de kullanılmış ve ULX'in 22 yıllık bir dönemi kapsayan uzun dönemli ışık eğrisi elde edilmiştir. Uzun dönemli ışık eğrisinde kaynağın akısının yaklaşık 200 kat değiştiği görülmüştür. Hubble Uzay Teleskopu (HST) ile yapılmış arşiv gözlem verileri ile ULX'in optik karşılık adayları da araştırılmıştır ve HST/WFC3 görüntüsünde kaynak için iki optik karşılık adayı bulunmuştur. X-ışın tayfına en iyi uyum veren disk model parametreleri kullanılarak sistemdeki sıkı cismin 5-28 $M_{\odot}$ kütleli bir karadeliğe olabileceği hesaplanırsa da, kaynağın uzun dönemli değişkenliği ve tayfsal geçişleri nötron yıldızı içeren ULX'lere de benzerlik göstermektedir.

Abstract

The X-ray spectral and temporal properties of a ultraluminous X-ray source (ULX) in NGC 628 have been studied using archival X-ray observations. X-ray spectral analyses were performed using the archival XMM-Newton and Chandra data. To investigate short-term temporal variability, the Lomb-Scargle periodogram of the source was generated for each observation. A quasi-periodic oscillation in the 0.1-0.4 mHz range, previously discovered in the literature using different methods, was also detected in the new observations through the Lomb-Scargle method. Additionally, to examine long-term variability, archival data from the Swift satellite were utilized, and a long-term light curve spanning 22 years was obtained. The long-term light curve revealed that the flux of the source varied by approximately a factor of 200. Archival data from the Hubble Space Telescope (HST) were also used to investigate the optical counterparts of the ULX and we identified two optical counterpart candidates for the source in the HST/WFC3 images. Using the best-fit disk model parameters for the X-ray spectrum, the compact object in the system was estimated to be a black hole with a mass of 5-28 $M_{\odot}$. However, the long-term variability and spectral transitions of the source also show similarities to the ULXs containing neutron stars.

Anahtar Kelimeler: galaxies: individual: NGC 628 – X-rays: binaries – accretion, accretion discs

1 Giriş

Aşırı parlak X-ışın kaynakları (ultraluminous X-ray source, ULX), galaksilerin merkezi dışında bulunan ve X-ışın ışıma güçleri $10 M_{\odot}$ bir karadeliğin Eddington limitini aşan noktasal X-ışın kaynakları olarak tanımlanmaktadır (Kaaret ve diğ. 2017). ULX'lerin yüksek ışıma güçlerini açıklayabilmek için öne sürülen en yaygın modeller sistemdeki sıkı cismin orta kütleli bir karadeliği (Colbert & Mushotzky 1999; Miller ve diğ. 2004) veya süper-Eddington oranda madde aktarımı gerçekleşen yıldız kütleli bir karadeliğin içermesi üzerinedir (King ve diğ. 2001; Walton ve diğ. 2013; Middleton ve diğ. 2015). Fakat son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda bazı ULX'lerin nötron yıldızı içerdiği de tespit edilmiştir (Bachetti ve diğ. 2014; Fürst ve diğ. 2016; Gúrpide ve diğ. 2021).

ULX'lerin X-ışın tayfsal ve zamansal özellikleri bize sistemdeki sıkı cismin doğası ile yığılma diski ve yığılma oranı hakkında önemli bilgiler sunabilmektedir (Feng & Soria 2011). Genellikle ULX'lerin X-ışın tayfsal özellikleri, çoğunlukla

Eddington oranında madde aktarımı gerçekleşen, Galaktik karadeliğin çiftlerininkinden farklılık göstermektedir (Gúrpide ve diğ. 2021). Bunun nedeni, madde aktarım oranının süper-Eddington düzeyde gerçekleşmesi veya sistemdeki sıkı cismin nötron yıldızı içeriyor olması olabilir. Son zamanlarda ULX'lerin tayflarında, XMM-Newton uydusunda bulunan RGS (Reflection Grating Spectrometer) cihazı ile yapılan tayfsal analizler sonucu, süper-Eddington madde aktarımı durumunda görülmesi beklenen ve madde atımlarına işaret eden maviye kayan çizgiler belirlenmiştir (Poutanen ve diğ. 2007; Pinto ve diğ. 2016).

X-ışın gözlemlerinin yanında, ULX'lerin optik karşılıklarının belirlenmesi de yoldaş yıldızın tayfsal sınıfını ve kütleini belirlemede yardımcı olabilmektedir. Hubble Uzay Teleskobu (HST) verileri kullanılarak yapılan çalışmalarda birçok ULX'in optik karşılığı belirlenmiştir. Kaynakların görünür parlaklıkları 21-26 kadir aralığında hesaplanmıştır (Fabrika ve diğ. 2021). Bazı kaynakların yıldız oluşum bölgeleri veya bulutsular ile ilişkili olduğu görülmüştür (Koliopanos ve diğ. 2017; Fabrika ve diğ. 2021).

Bu çalışmada, NGC 628 (M74) galaksisinde belirlenmiş ULX X-1 kaynağının X-ışın özellikleri ve optik karşılığı

* avdan.hsn@gmail.com

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan arşiv gözlem verileri.

İsim	Gözlem No. (Filtre)	Tarih	Poz süresi (ks)
XM1	0154350101	01.02.2002	37
XM2	0154350201	07.01.2003	25
XM3	0864270101	13.01.2021	112
C1	2057	19.06.2021	46
C2	2058	19.10.2001	46
C3	4753	20.11.2003	5
C4	4754	18.12.2003	5
C5	14801	21.08.2013	10
C6	16000	21.09.2013	44
C7	16001	07.10.2013	15
C8	16484	10.10.2013	15
C9	16485	11.10.2013	9
C10	16002	14.11.2013	38
C11	16003	15.12.2013	40
C12	21000	30.09.2018	10
H1	ICDM20030 (F275W)	17.10.2013	2.36
H2	ICDM20040 (F336W)	17.10.2013	1.12
H3	ICDM20050 (F555W)	17.10.2013	0.96
H4	ID9609020 (F555W)	04.10.2016	0.71
H5	ID9609010 (F814W)	04.10.2016	0.78
H6	ID1102020 (F555W)	04.12.2017	0.71
H7	ID1102010 (F814W)	04.12.2017	0.78
H8	IEB314020 (F555W)	19.08.2021	0.71
H9	IEB314010 (F814W)	19.08.2021	0.78
H10	IEB349020 (F438W)	15.02.2021	0.71

çalışılmıştır. NGC 628 yıldız oluşumu devam eden ve 9.7 Mpc uzaklıkta sarmal bir galaksidir (Tully 1988). X-1 ilk olarak ROSAT ve Einstein kataloglarında parlak bir geçici kaynak olarak sınıflandırılmıştır. Daha sonra yapılan çalışmalarda kaynağın ışıma gücünün belirgin (~ 24 kat) değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir (Soria & Kong 2002; Krauss ve diğ. 2005). Liu ve diğ. (2005), kaynağın ışık eğrisinde iki saatlik bir yarı-periyodik salınım keşfetmişlerdir. Sistemdeki sıkı cismin kütlelerini, kırılma frekansı ve kütle ilişkisini kullanarak, yaklaşık $10^4 M_{\odot}$ olarak hesaplamışlardır.

2 Gözlemler ve Veri Analizi

ULX'in X-ışın tayfsal ve kısa/uzun dönemli zamansal analizleri için, yaklaşık 22 yılı kapsayan XMM-Newton, Chandra ve Swift arşiv gözlem verilerinden yararlanılmıştır. Kaynağın optik karşılığının araştırılması için HST/WFC3 arşiv görüntüleri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan gözlem verileri Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'in birinci sütunundaki gözlem isimleri verilirken XMM-Newton, Chandra ve HST gözlemleri için sırasıyla XM, C ve H kısaltması kullanılmıştır.

XMM-Newton ve Chandra gözlemlerinin analizleri sas v21.0 (Gabriel ve diğ. 2004) ve ciao v4.12 (Fruscione ve diğ. 2006) yazılımları kullanılarak yapılmıştır. Kaynağın her iki uydudaki X-ışın tayfsal ve zamansal verileri 0.3-10 keV enerji aralığında elde edilmiştir. X-ışın enerji tayflarına model fit etme işlemleri heasoft paketindeki xspec v12.13.1 yazılımı (Arnaud 1996) ile yapılmıştır.

ULX'in, Swift uydusunun XRT (X-ray Telescope) kamerası ile 2001-2023 yılları arasında 54 gözlemi bulunmaktadır. İstatistik yeterli olmadığı için, bu gözlemler sadece uzun dönemli ışık eğrisinin incelenmesinde kullanılmıştır. Swift/XRT

analizleri için heasoft paketinde bulunan xselect v2.4 yazılımı (Blackburn 1995) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kaynağın optik karşılığının incelenmesi için HST/WFC3/UVIS gözlemleri kullanılmıştır. HST verilerinin indirgenmesi ve fotometri dolphot v2.0 yazılımı (Dolphin 2000, 2016) ile yapılmıştır.

2.1 Astrometri

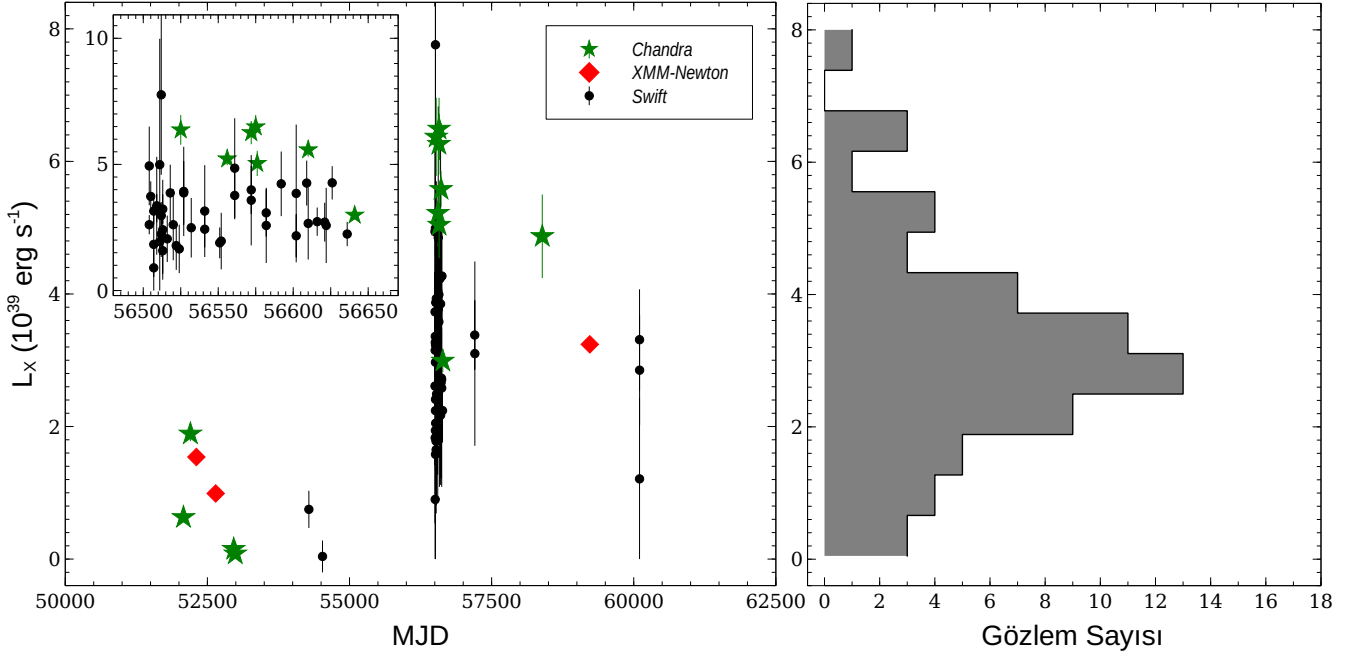
X-1'in optik karşılığını belirleyebilmek için öncelikle HST/WFC3 ve Chandra görüntüleri arasında astrometrik düzeltme yapılmıştır. Bu işlem, HST/WFC3 F336W ile 16003 numaralı Chandra gözlemleri kullanılarak yapılmıştır. Her iki görüntüde belirlenen iki nokta kaynak referans alınarak, görüntüler arasındaki koordinat farkı hesaplanmıştır. Düzeltme sonrasında X-1'in HST/WFC3 F336W görüntüsündeki koordinatı ($0''.3$ belirsizlikle) $RA=01^h36^m51^s.0766$, $Dec=+15^{\circ}45'46''.968$ olarak belirlenmiştir.

3 Sonuçlar ve Tartışma

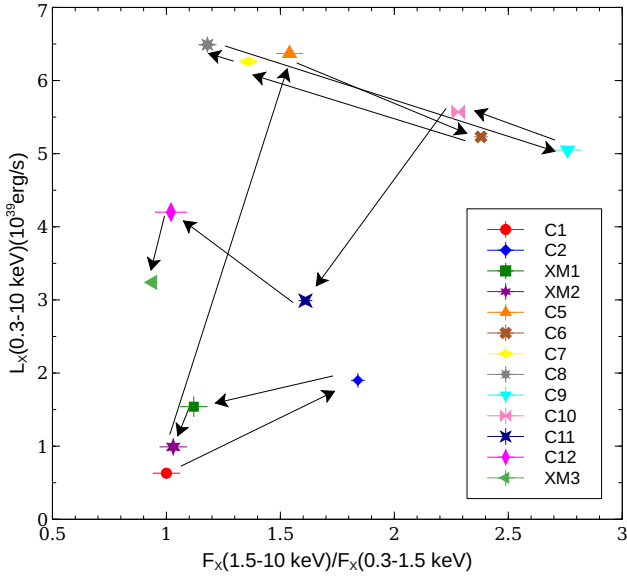
X-1'in X-ışın tayfı çoğunlukla güç-yasası modeli (XSPEC'te PO) ile iyi uyum vermiştir. En yüksek istatistiğe sahip gözlemede kaynağın enerji tayfı, disk karacisim modeli (XSPEC'te DISKPBB) ile iyi uyum vermiştir ($kT_{in} \sim 2.4$ keV, $\chi^2_{\nu}=0.92$). Modelde, p parametresi 0.5 olarak hesaplanmıştır. Bu değer ULX'teki yığılma diskinin slim disk özelliği taşıdığını ve yığılmanın süper-Eddington oranında gerçekleştiğini göstermektedir (Watarai ve diğ. 2000; Poutanen ve diğ. 2007). DISKPBB modelinden elde edilen normalizasyon parametresi ve kütle-iç disk yarıçapı arasındaki ilişki (Makishima ve diğ. 2000) kullanılarak X-1'deki sıkı cismin $5-28 M_{\odot}$ kütleli bir karadelik olabileceği hesaplanmıştır. Kütle değeri elde edilirken tayfsal sertleşme faktörü 3 (Watarai & Mineshige 2003) ve kütle düzeltme faktörü 1.2 (Vierdayanti ve diğ. 2008) olarak alınmıştır.

X-1'in ışık eğrisinde önceki çalışmalarda belirlenmiş yarı-periyodik sinyali incelemek için Lomb-Scargle yöntemi (Lomb 1976; Scargle 1982) kullanılmıştır. Kaynağın her bir gözlemede Lomb-Scargle periyodogramları astropy paketinde (Astropy Collaboration ve diğ. 2022) bulunan LombScargle (VanderPlas ve diğ. 2012; VanderPlas & Ivezić 2015) komutu ile elde edilmiştir. $(1-3) \times 10^{-4}$ Hz aralığında yarı-periyodik sinyaller XM1, C1, C2, C9 ve C10 gözlemlerinde belirgin bir şekilde ($>3\sigma$) görülmüştür. Bulunan frekans aralığı Liu ve diğ. (2005) tarafından elde edilen sonuçlar ile uyum içindedir.

Kaynağın uzun dönemli değişimini incelemek için, 22 yılı kapsayan XMM-Newton, Chandra ve Swift arşiv gözlemleri ile elde edilen uzun dönemli ışık eğrisi, 0.3-10 keV enerji aralığındaki ışıma gücü değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Yeterli istatistiğe sahip olmayan Swift/XRT verilerinde kaynağın enerji tayfına model fit edilememiştir. Bu yüzden, Swift/XRT verilerinden elde edilen sayım oranları pimps paketi kullanılarak akı değerine dönüştürülmüştür. Dönüşüm esnasında güç-yasası modeli göz önüne alınmış ve kaynağın enerji tayfına en iyi uyum veren tayfsal indislerin ortalaması ($\Gamma \sim 1.9$) ile Galaktik soğurma değeri ($0.05 \times 10^{-22} \text{ cm}^{-2}$, Dickey & Lockman 1990) kullanılmıştır. X-1'in uzun dönemli ışık eğrisi ve ışıma gücü değerlerinin histogramı Şekil 1'de verilmiştir. X-1'in ışıma gücünün zaman içerisinde ~ 200 kat değişim gösterdiği görülmektedir. Genelde nötron yıldızı içeren ULX'lerin histogramlarında karşılaşılan bimodal akı dağılımı,



Şekil 1. X-1'in uzun dönemli ışık eğrisi (solda) ve ışıma gücü değerlerinin histogramı (sağda). Işıma gücü değerleri 0.3-10 keV enerji aralığında hesaplanmıştır.

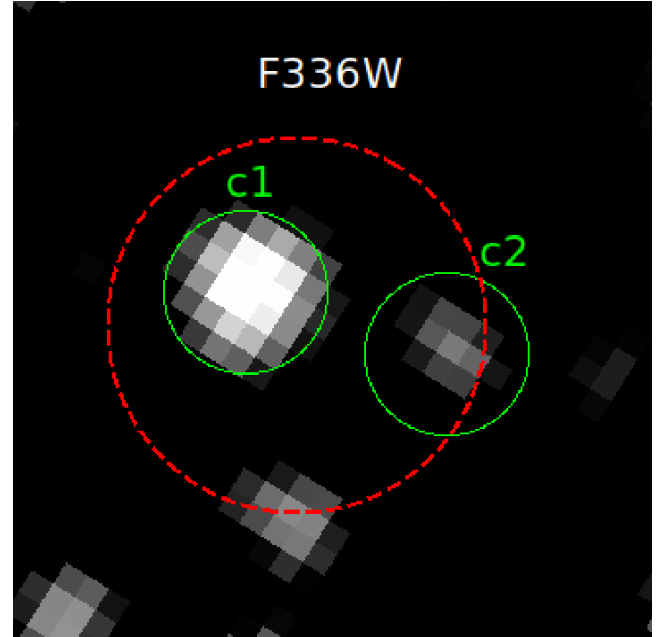


Şekil 2. X-1'in ışıma gücünün farklı enerji aralığındaki akı oranlarından elde edilen sertlik değerlerine karşı grafiği.

X-1'in ışıma gücü histogramında görülmemektedir (*Gürpide ve diğ. 2021*).

Tayfsal durum geçişlerini, diğer çalışılmış ULX'ler ile kıyaslamak için X-1'in sertlik-ışıma gücü grafiği de elde edilmiş ve Şekil 2'de verilmiştir. X-1'in uzun dönemli değişimi ve tayfsal geçişleri, nötron yıldızı içeren NGC 1313 X-2 ile benzerlik göstermekte ve sıkı cismin nötron yıldızı da olabileceğine işaret etmektedir (*Gürpide ve diğ. 2021*).

Chandra ve HST/WFC3 görüntüleri arasında yapılan



Şekil 3. X-1'in HST/WFC3 F336W görüntüsü. Kırmızı daire, ULX'in düzeltilmiş pozisyonunu temsil etmekte ve 0".3 yarıçap değerine sahiptir. Yeşil daireler, hata yarıçapı içerisinde belirlenen optik karşılık adaylarını göstermektedir.

astrometrik düzeltme sonrası, hata yarıçapı 0".3 içerisinde iki tane optik karşılık adayı (c1 ve c2) belirlenmiştir. HST/WFC3 F336W görüntüsü üzerinde ULX'in düzeltilmiş pozisyonu ve karşılık adayları Şekil 3'te gösterilmektedir. Optik karşılık adaylarının fotometrik sonuçları ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Optik karşılık adaylarının kızarma çıkarılmış parlaklık değerleri.

Gözlem	VEGAmag	
	c1	c2
H1	24.568±0.165	25.000±0.255
H2	24.761±0.159	25.470±0.285
H3	25.772±0.089	26.272±0.139
H4	26.090±0.117	26.480±0.150
H5	25.159±0.117	...
H6	26.122±0.121	26.455±0.155
H7	25.690±0.206	...
H8	26.340±0.164	26.880±0.533
H9	25.883±0.216	...

Kaynakların parlaklık değerleri daha önce çalışılmış ULX'lerin değerleri ile benzerlik göstermektedir (Kaaret ve diğ. 2017; Fabrika 2017).

ULX'in gelecekteki X-ışını gözlemleri, sistemdeki sıkı cismin gerçek doğasını ortaya çıkarabilir. Özellikle, yüksek istatistiğe sahip ve daha yüksek enerjili bölgelere uzanan gözlemler, kaynağın X-ışını yayılımını daha ayrıntılı bir şekilde incelememize yardımcı olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) bünyesinde TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) tarafından yürütülen 2218-Yurt İçi Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı kapsamında 122C042 numaralı proje ile desteklenmiştir. Katkılarından dolayı E. Sonbaş ve K. S. Dhuga'ya teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Arnaud K. A., 1996, in Jacoby G. H., Barnes J., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 101, Astronomical Data Analysis Software and Systems V*. p. 17
- Astropy Collaboration ve diğ., 2022, *ApJ*, 935, 167
- Bachetti M., ve diğ., 2014, *Nature*, 514, 202
- Blackburn J. K., 1995, in Shaw R. A., Payne H. E., Hayes J. J. E., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 77, Astronomical Data Analysis Software and Systems IV*. p. 367
- Colbert E. J. M., Mushotzky R. F., 1999, *ApJ*, 519, 89
- Dickey J. M., Lockman F. J., 1990, *ARA&A*, 28, 215
- Dolphin A. E., 2000, *PASP*, 112, 1383
- Dolphin A., 2016, *DOLPHOT: Stellar photometry*, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1608.013 (ascl:1608.013)
- Fabrika S., 2017, in Balega Y. Y., Kudryavtsev D. O., Romanyuk I. I., Yakunin I. A., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 510, Stars: From Collapse to Collapse*. p. 395 ([arXiv:1702.05508](https://arxiv.org/abs/1702.05508)), doi:10.48550/arXiv.1702.05508
- Fabrika S. N., Atapin K. E., Vinokurov A. S., Sholukhova O. N., 2021, *Astrophysical Bulletin*, 76, 6
- Feng H., Soria R., 2011, *New Astron. Rev.*, 55, 166
- Fruscione A., ve diğ., 2006, in Silva D. R., Doxsey R. E., eds, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series Vol. 6270, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. p. 62701V, doi:10.1117/12.671760
- Fürst F., ve diğ., 2016, *ApJ*, 831, L14
- Gabriel C., ve diğ., 2004, in Ochsenbein F., Allen M. G., Egret D., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 314, Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS) XIII*. p. 759

- Gúrpide A., Godet O., Koliopanos F., Webb N., Olive J. F., 2021, *A&A*, 649, A104
- Kaaret P., Feng H., Roberts T. P., 2017, *ARA&A*, 55, 303
- King A. R., Davies M. B., Ward M. J., Fabbiano G., Elvis M., 2001, *ApJ*, 552, L109
- Koliopanos F., Vasilopoulos G., Godet O., Bachetti M., Webb N. A., Barret D., 2017, *A&A*, 608, A47
- Krauss M. I., Kilgard R. E., Garcia M. R., Roberts T. P., Prestwich A. H., 2005, *ApJ*, 630, 228
- Liu J.-F., Bregman J. N., Lloyd-Davies E., Irwin J., Espaillat C., Seitzer P., 2005, *ApJ*, 621, L17
- Lomb N. R., 1976, *Ap&SS*, 39, 447
- Makishima K., ve diğ., 2000, *ApJ*, 535, 632
- Middleton M. J., Heil L., Pintore F., Walton D. J., Roberts T. P., 2015, *MNRAS*, 447, 3243
- Miller J. M., Fabian A. C., Miller M. C., 2004, *ApJ*, 614, L117
- Pinto C., Middleton M. J., Fabian A. C., 2016, *Nature*, 533, 64
- Poutanen J., Lipunova G., Fabrika S., Butkevich A. G., Abolmasov P., 2007, *MNRAS*, 377, 1187
- Scargle J. D., 1982, *ApJ*, 263, 835
- Soria R., Kong A. K. H., 2002, *ApJ*, 572, L33
- Tully R. B., 1988, *Science*, 242, 310, *ADS*
- VanderPlas J. T., Ivezić Ž., 2015, *ApJ*, 812, 18
- VanderPlas J., Connolly A. J., Ivezić Z., Gray A., 2012, in *Proceedings of Conference on Intelligent Data Understanding (CIDU)*. pp 47–54 ([arXiv:1411.5039](https://arxiv.org/abs/1411.5039)), doi:10.1109/CIDU.2012.6382200
- Vierdayanti K., Watarai K.-Y., Mineshige S., 2008, *PASJ*, 60, 653
- Walton D. J., Miller J. M., Harrison F. A., Fabian A. C., Roberts T. P., Middleton M. J., Reis R. C., 2013, *ApJ*, 773, L9
- Watarai K.-y., Mineshige S., 2003, *ApJ*, 596, 421
- Watarai K.-y., Fukue J., Takeuchi M., Mineshige S., 2000, *PASJ*, 52, 133

Access:

M25-0327: *Turkish J.A&A* — Vol.6, Issue 3.