



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

**SEÇİLMİŞ BAZI AŞIRI PARLAK X-IŞIN KAYNAKLARININ ÇOKLU
DALGABOYU ANALİZLERİ**

DOKTORA TEZİ

Sinan ALLAK

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN

İkinci Danışman
Prof. Dr. Aysun AKYÜZ

ÇANAKKALE – 2022





T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

SEÇİLMİŞ BAZI AŞIRI PARLAK X-IŞIN KAYNAKLARININ ÇOKLU
DALGABOYU ANALİZLERİ

DOKTORA TEZİ

Sinan ALLAK

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN

İkinci Danışman

Prof. Dr. Aysun AKYÜZ

Bu çalışma, TÜBİTAK kurumu tarafından desteklenmiştir.

Proje No: 117F115

ÇANAKKALE – 2022

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.



Sinan ALLAK

29/08/2022

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce danışmanlarım Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN ve Prof. Dr. Aysun AKYÜZ paha biçilmez tavsiyeleri, sürekli destekleri ve doktora çalışmam sırasında gösterdikleri sabır için son derece müteşekkirim. Onların engin bilgileri ve bol deneyimleri, akademik araştırmalarım ve günlük yaşamımda beni her zaman cesaretlendirdi. Ayrıca, mükemmel çalışma koşulları sağladığı için Çukurova Üniversitesi Uzay Bilimleri ve Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (UZAYMER) ve üyelerine teşekkürü borç bilirim. Tez çalışmam süresince deneyimlerini esirgemeyen Prof. Dr. Nazım AKSAKER, Prof. Dr. Eda SONBAŞ, Prof. Dr. Kalvir DHUGA ve Doç. Dr. İnci AKKAYA ORALHAN hocalarıma ayrıca teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteğini esirgemeyen değerli aileme tüm kalbimle sonsuz teşekkür ederim. Kendi işleri yetmezmiş gibi tüm benliği ile yanımda olmaya çalışan ve hoş sohbetleri ile ders aralarını renklendiren Selami ÖZBAY hocama canı gönülden teşekkürlerimi sunarım. Tez teslim sürecinde belgelerin takibi için yardımlarını esirgemeyen Halil ÇETİNKAYA'ya teşekkür ederim. Her zorlukta yanımda olan, tezle birlikte bana da sabırla katlanan, bu çalışmayı en az benim kadar irdeleyen sevgili eşim Arş. Gör. Semiha ALLAK'a ve hayatımıza anlam ve renk katan, güç ve motivasyon kaynağımız oğlum Atlas ALLAK'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

Sinan ALLAK
Çanakkale, Ağustos 2022

ÖZET

SEÇİLMİŞ BAZI AŞIRI PARLAK X-IŞIN KAYNAKLARININ ÇOKLU DALGABOYU ANALİZLERİ

Sinan ALLAK

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN

İkinci Danışman: Prof. Dr. Aysun AKYÜZ

29/08/2022, 155

Aşırı parlak X-ışın kaynakları (ULX), yıldız kütleli ($10 M_{\odot}$) bir karadelik için *Eddington* sınırını aşan X-ışın ışımasına ($L_X \geq 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$) sahip ve barınak gökadanın merkezinde bulunmayan nokta benzeri kaynaklardır. Bu çalışmada, gökada NGC 1316'da ULX X-7 ve M51'de geçici ULX-4 kaynaklarının X-ışın tayfsal, zamansal ve optik özellikleri *Chandra*, *XMM-Newton*, *Swift* ve *HST* arşiv verileri kullanılarak kapsamlı bir şekilde araştırıldı. Bir X-ışın kaynağı olan X-7'nin, ilk defa bu çalışmada 2019 *Chandra* gözlemleri kullanılarak bir ULX olduğu belirlendi. İncelenen diğer kaynak ULX-4'ün, 20 yıllık dönemde X-ışın akısı ise ~ 200 kat değişkenlik göstermiştir. Kaynağın bu uzun dönemde belirlenen çift modlu X-ışın akı dağılımı, pulsar içeren ULX'lerde gözlenen benzerlik göstermiştir.

İncelediğimiz ULX'ler için potansiyel optik karşılıkları aramak ve tanımlamak için *Chandra* ve *HST* gözlemlerine dayalı astrometri hesaplamaları sonucu %95 güvenirlikle astrometrik hata yarıçapı X-7 ve ULX-4 için sırasıyla 0,22" ve 0,20" olarak hesaplanmıştır. Bunlara göre belirlenen alanlarda ise, X-7 için tek ve ULX-4 için ise iki optik karşılık tespit edilmiştir. *HST*'nin farklı dalgaboylarında yapılan gözlemleriyle oluşturulan tayfsal enerji dağılımları (SED) kaynakların optik ışımaya mekanizmaları hakkında önemli bulgular sunmuştur. X-7'nin optik karşılığına ait SED'i *güç-yasasına* (*power-law*) uyarken ULX-4'ün iki olası optik karşılığı da karacisim (blackbody) modeline iyi uyum göstermiştir. Ayrıca, ULX-4'ün bir optik karşılığında 264 günlük periyodik optik değişkenlik

belirlenmiştir. Bu değişkenliğin nedeni olarak tıkız (compact) nesnenin doğası için iki önemli senaryo sunulmuştur. Bu senaryolar, donörün yörünge hareketi ve tıkız nesnenin bir yığılma diski ile olası etkileşimleri üzerinden yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aşırı Parlak X-ışın Kaynağı (ULX), NGC 1316, M51, Astrometri, X-ışın Çiftleri, optik karşılıklar



ABSTRACT

MULTI WAVELENGTH ANALYSIS OF SELECTED ULTRALUMINOUS X-RAY SOURCES

Sinan ALLAK

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Doctoral Dissertation in Physics Science

Advisor: Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN

Co-Advisor: Prof. Dr. Aysun AKYÜZ

08/29/2022, 155

Ultraluminous X-ray Sources (ULX) are point-like sources in external galaxies with an X-ray luminosity ($L_X \geq 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$) exceeding the Eddington limit for a stellar-mass black hole. In this study, X-ray spectral, temporal and optical properties of transient M51 ULX-4 and NGC 1672 ULX X-7 extensively investigated using archival *Chandra*, *XMM-Newton*, *Swift* and *HST*. 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 ULX-4 which showed highly long-term X-ray flux variability (factor of ~ 200) over the 20-year. In this long-term, ULX-4 showed bi-modal X-ray flux distributions the same most pulsar ULXs.

In this study focused on using the precise source positions obtained via improved astrometry based on *Chandra* and *HST* observations to search for and identify potential optical counterparts for ULXs. The astrometric error radius was calculated as 0,22" and 0,20" for X-7 and ULX-4, with 95% confidence, respectively. Within this error, one and two optical counterparts were determined for X-7 and ULX-4, respectively. The spectral energy distributions (SED) generated by the different wavelengths of the *HST* data provided important clues about the nature of optical emission. The SED of the optical counterpart of the X-7 well-fitted with *power-law*, while the two counterparts of the ULX-4 conformed to the blackbody model. One of ULX-4 counterparts exhibited a low-amplitude optical periodicity of 264 days. For this periodicity, two important scenarios are presented the nature of the compact object. These scenarios have been interpreted in terms of the orbital motion of the donor and possible interactions of the compact object with an accretion disk.

Keywords: Ultraluminous X-ray Sources (ULX), NGC 1316, M51, Astrometry, X-ray Binaries, Optical counterparts



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
BİRİNCİ BÖLÜM	
GİRİŞ	
1.1 X-ışın Astronomisi ve Işıma Süreçleri	18
1.2. Işıma Süreçleri	19
1.2.1. <i>Karacisim</i> Işıması	20
1.2.2. <i>Bremsstrahlung</i> (Frenleme) Işıması	21
1.2.3. <i>Synchrotron</i> (Senkrotron) Işıması	22
1.2.4. <i>Compton</i> Saçılması (Komptonizasyon)	23
1.2.5. <i>Fotoelektrik</i> Etki	24
1.3. X-ışın Çiftleri	25
1.3.1. Küçük kütleli X-ışın Çiftleri (LMXB)	26
1.3.2. Büyük kütleli X-ışın Çiftleri (HMXB)	26
1.3.3. Tıkız Nesnelere: Karadelik, Nötron yıldızı ve Beyaz Cüceler	28
1.3.4. Karadelik ve Nötron Yıldızların Etrafındaki Yığılma Diskleri	30
1.3.5. Karadelik Çiftlerinin X-ışın Enerji Tayfları	33
1.4. Aşırı Parlak X-ışın Kaynakları (Ultraluminous X-ray Sources, ULX)	36
1.5. Bu Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	39

İKİNCİ BÖLÜM	
KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	41
2.1. Aşırı Parlak X-ışın Kaynakları (ULX)	41
2.2. ULX'lerin X-ışın Enerji Tayfları	46
2.3. Süper-Eddington Yığılma	49
2.4. ULX'lerin X-ışın Zamansal Çalışmaları	55
2.5. ULX'lerin Optik Özellikleri	59
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	
ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL YÖNTEM	
3.1. X-ışın Uydu Gözlemleri	61
3.1.1. <i>Chandra</i> X-ışın Gözlemevi	62
3.1.2. <i>XMM-Newton</i> X-ışın Gözlemevi (X-ray Multi-Mirror Mission Newton)	63
3.1.3. <i>Swift</i> Gözlemevi (The Neil Gehrels Swift Observatory)	65
3.1.4. <i>Hubble Uzay Teleskobu</i> (Hubble Space Telescope, <i>HST</i>)	66
3.2. Analizler	68
3.2.1. X-ışın Kaynak Belirleme ve Tayfsal Analizler	71
3.2.2. Tayfsal Modeller için İstatistik Testler: χ^2 ve C-stat	72
3.2.3. X-ışın Zamansal Analizler	73
3.2.4. Optik Analizler	77
3.2.5. <i>DOLPHOT</i> ve PSF (Point Spread Function) Fotometri	78
3.2.6. <i>DAOPHOT</i> ve <i>PSF Fotometri</i>	79
3.2.7. Astrometri	79
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	
ARAŞTIRMA BULGULARI	
4.1 NGC 1316'da Yeni bir ULX kaynağının Tanımlanması	82
4.1.1. NGC 1316	82
4.1.2. Gözlemler, Veri İndirgemeleri ve Analizler	84
4.1.3. Tartışmalar	91

4.2. M51'de Geçici Aşırı parlak X-ışın Kaynağı, ULX-4	94
4.2.1. M51	94
4.2.2. Gözlemler, Veri İndirgemeleri ve Analizler	97
4.2.3. Kısa ve Uzun Dönem X-ışın Değişkenliği	101
4.2.4. Yeni Geçici X-ışın Kaynağı: CXOU J132951.7+471010	105
4.2.5. Optik Analizler.....	106
4.2.6. Tayfsal Gözlemler	107
4.2.7. Spektral Enerji Dağılımları (SEDs)	109
4.2.8. Uzun Dönem Optik Değişimler	111
4.2.9. ULX-4'e Yakın Olan Bir Kümenin Yaş ve Kütle Tahmini	112
4.2.10. Tartışmalar	113
BEŞİNCİ BÖLÜM	
SONUÇ ve ÖNERİLER	
5.1. NGC 1316 X-7 ve XT-1	124
5.2. M51 ULX-4	126
KAYNAKÇA	132
ÖZGEÇMİŞ	I

SİMGELER VE KISALTMALAR

keV	Kilo Elektrovolt
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
ks	Kilo saniye
Mpc	Mega parsek
s	Saniye
G	Gauss
LMXB	Düşük Kütleli X-ışın Çifti
HMXB	Yüksek Kütleli X-ışın Çifti
ULX	Aşırı Parlak X-ışın Kaynağı
Myıl	Milyon yıl
DISKBB	Çok Renkli Karacisim Işıması
pc	Parsec

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa No
Tablo 1	ULX adaylarını içeren bazı kataloglar..... 43
Tablo 2	Bu çalışmada kullanılan X-ışın gözlemevi dedektörlerin özelliklerinin karşılaştırılması..... 67
Tablo 3	X-7'nin X-ışın ve optik gözlemlerine ait bilgiler..... 85
Tablo 4	X-7'nin tayfsal model parametreleri..... 86
Tablo 5	<i>Chandra</i> görüntülerinde görelî astrometri için seçilen referans kaynakların konumları ve özellikleri..... 89
Tablo 6	X-7'nin optik karşılığının sönmleme değeri ($A_V = 0,058$ kadir) ile düzeltilmiş kadir ve akı değeri..... 90
Tablo 7	ULX-4 kaynağının <i>XMM-Newton</i> ve <i>Chandra</i> X-ışın gözlem bilgileri..... 98
Tablo 8	ULX-4 kaynağının en iyi <i>Chandra</i> X-ışın tayfsal model parametreleri..... 102
Tablo 9	ULX-4 kaynağı için en iyi <i>XMM-Newton</i> X-ışın tayfsal model parametreleri..... 103
Tablo 10	ULX-4 kaynağının <i>XMM-Newton</i> güç-yasası+mekal model parametreleri..... 103
Tablo 11	ULX-4 kaynağın için kullanılan <i>HST</i> gözlemleri..... 107
Tablo 12	Astrometri hesaplamaları için kullanılan referans kaynaklar ve ULX-4'ün <i>Chandra</i> ve optik düzeltilmiş koordinatları..... 108
Tablo 13	ULX-4'ün 2 optik karşılığının fotometrik sonuçları ve akı değeri..... 109
Tablo 14	M51 ULX-4'ün optik karşılılarından A'nın ACS/WFC F606W gözlemlerinden hesaplanan kadir değeri..... 114

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Farklı sıcaklıklardaki karacisim ışımasının tayfları.....	21
Şekil 2	Bir elektronun, protonun elektrik alanı tarafından saptırıldığı için yavaşlamasıyla üretilen Bremsstrahlung ışıması.....	22
Şekil 3	Senkrotron ışımasının temsil edilmesi.....	23
Şekil 4	Compton saçılması (sol) ve ters Compton (sağ) olaylarının şematik gösterimi.....	24
Şekil 5	Sol: $\log N_H = 19, 20, 21, 22, 23$ (soldan sağa) sadece Hidrojenin Fotoelektrik soğurulması. Burada N_H soğurma sütununu temsil eder. Sağ: Giderek daha ağır atom numaraları eklendikçe $\log N_H = 22$ soğurma sütununun fotonların enerjisini nasıl etkilediğini gösterir.....	25
Şekil 6	LMXB ve HMXB' lerde donör yıldız tarafından tıkız nesneye kütle aktarım mekanizmasının şematik gösterimi.....	27
Şekil 7	Kütle oranı 0,2 olan bir çift sistem için eşpotansiyel yüzeyleri	31
Şekil 8	Bir karadelik X-ışın çift sisteminin gösterimi.....	32
Şekil 9	Tipik bir pulsarın şematik gösterimi.....	33
Şekil 10	Sol: Etrafına kütle biriktiren (disk oluşturan) bir karadelikten X-ışın ışımasının üç ana bileşeni. Sağ: Birikim akışını temsil eden gösterim (Şekiller Gilfanov (2010) çalışmasında alınmıştır).....	34
Şekil 11	Standart ince bir yığılma diskinden gelen tipik termal ışımanın gösterimi.....	34
Şekil 12	12 Farklı büyüme oranlarında karadelik çift sistemlerinde tipik X-ışın tayfları (sol) ve sol paneldeki tayflara karşılık gelen olası yığılma geometrileri (sağ) (Şekiller Done (2010) çalışmasında alınmıştır).....	35
Şekil 13	Kara delik X-ışını çift sistemi için bir sertlik yoğunluk diyagramında "q" şeklindeki eğrinin şematik gösterimi Şekil Kylafis vd. (2012) çalışmasında alınmıştır.....	36
Şekil 14	0,5-8 keV bandında M51 ULX-8 <i>Chandra</i> enerji tayfı (Şekil Brightman vd. (2018) çalışmasında alınmıştır).....	44

Şekil 15	,3-10 keV' da genel bir ULX'in enerji tayfı (gri). 2 keV' nin altında yumuşak bir fazlalık ve 2 keV' nin üzerinde sert bir eğrilik olduğu görülmektedir (Şekiller Feng ve Soria (2011) çalışmasında alınmıştır)	46
Şekil 16	<i>XMM-Newton</i> (siyah) ve <i>NuSTAR</i> (mavi) tarafından eşzamanlı olarak gözlemlenen NGC 1313 X-1'in enerji tayfı (Şekil Bachetti vd. (2013) çalışmasında alınmıştır)	47
Şekil 17	Üç tayfsal tipin her birini sergileyen farklı ULX'lerin gözlemlerinden örnek tayflar (güç-yasası+DISKBB). Soldan sağa: genişletilmiş disk- NGC 1313 X-2; sert aşırı parlak- Ho IX X-1; yumuşak aşırı parlak- NGC 5408 X-1 (Sutton vd., 2013). Mavi noktalı çizgiler DISKBB ve kırmızı kesikli çizgi güç-yasası modelindeki bileşenlerin katkıları gösterilmiştir.....	48
Şekil 18	En iyi model ile veri arasındaki alt panellerde gösterilmektedir ve 1 keV' de fazlalığı (yumuşak aşırı parlaklık) açıkça göstermektedir (Şekiller Middleton vd. (2014) çalışmasında alınmıştır).....	49
Şekil 19	Süper kritik bir yığılma akışının diyagramı (Şekil Kaaret vd. (2017) çalışmasında alınmıştır).....	53
Şekil 20	Karadeliğin dönme eksenini etrafında huni benzeri bir yapının gösterilmesi (Pinto, 2016).....	54
Şekil 21	Manyetik alan yarıçapının (R_m) korotasyon yarıçapından (R_{ko}) küçük olma durumu. Burada, Ω_K Keplerian dönüşü, Ω^* ise yıldız dönüşünü temsil eder (Romanova vd., 2008; 2016).....	57
Şekil 22	Manyetik alan yarıçapının (R_m) korotasyon yarıçapından (R_{ko}) büyük olma durumu. Diğer açıklamalar Şekil 21'de olduğu gibidir.....	58
Şekil 23	<i>Chandra</i> X-ışın teleskobunun temel aygıtları.....	62
Şekil 24	<i>Chandra/ACIS</i> odak düzlem şeması.....	62
Şekil 25	<i>XMM-Newton</i> teleskobunun şeması ve bilimsel cihazlar.....	64
Şekil 26	<i>XMM-Newton</i> MOS (sol) ve PN (sağ) dedektörleri.....	64
Şekil 27	<i>Swift-XRT</i> dedektörün ayrıntılı şeması.....	66
Şekil 28	<i>HST</i> teleskobunun bilimsel aletlerinin gösterimi.....	68
Şekil 29	Tayf ve ışık eğrilerini oluşturmak için kaynak ve ardalan bölgelerinin ds9 da gösterimi.....	70

Şekil 30	Örnek olarak iki farklı X-ışın kaynağının aynı gözlemdeki kısa dönem <i>Chandra</i> X-ışın ışık eğrileri.....	74
Şekil 31	0,2–12 keV (<i>XMM-Newton</i>) ve 3–30 keV'nin (<i>NuSTAR</i>) enerji aralıklarındaki M51 ULX-7'nin tayfsal güç yoğunlukları (Rodriguez Castillo vd., 2020).....	75
Şekil 32	K-S kümülatif dağılım fonksiyon dağılımı.....	76
Şekil 33	VanderPlas (2018) çalışmasından alınan bir ışık eğrisi (sol) ve L-S güç tayfı (sağ).....	77
Şekil 34	Sol: NGC 1316 gökadasının <i>Chandra</i> ACIS-S görüntüsü. 2,5" yarıçaplı daireler X-7 (macenta), X-5 (siyah), geçici kaynak XT-1 (mavi) ve ardalanın (kırmızı) konumunu gösterir. Sağ: NGC 1316 gökadasının <i>HST</i> RGB görüntüsü (Kırmızı (R): F814W, Yeşil (G): F555W ve Mavi (B): F336W). X-7'nin konumu beyaz çizgilerle işaretlenmiştir. Sağ alt, X-7'nin F555W görüntüsünü temsil eder. Kırmızı ve yeşil daireler, sırasıyla 0,6" yarıçaplı X-7'nin <i>Chandra</i> konumunu ve 0,22" yarıçaplı hata alanında X-7'nin astrometrik düzeltilmiş konumunu gösterir. Her iki panel de tam aynı bölgeyi gösterir. X eksenini R.A. ve y eksenini Decl.'yi göstermektedir. Her iki panelde de kuzey yukarı, doğu sol yönü gösterir.....	83
Şekil 35	<i>Chandra</i> gözlemlerinde X-7 ve XT-1'in karşılaştırılması (C1: a, C2: b ve C4: c). X-7 ve XT-1 konumları kesikli beyaz dairelerle gösterilmektedir. C2 gözleminde XT-1'in tespit edilmediği açıkça görülmektedir. Tüm paneller aynı büyüklükte ve ölçektedir (19"×16").....	88
Şekil 36	X-7 optik adayının SED grafiği. Tüm veriler içi dolu siyah dairelerle ve veriler hata değerleri ile gösterilmiştir. <i>Karacisim</i> modeli mavi düz çizgi ile güç-yasası modeli kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmektedir. <i>Karacisim</i> 3100 ± 400 K sıcaklığa sahiptir ve güç-yasası modeli $\alpha = 1,75 \pm 0,35$ 'tir. y ve x eksenlerine ait değerlerin birimleri sırasıyla $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ve Å'dir.....	91
Şekil 37	C6 verisinden elde edilmiş X-7'nin enerji tayfını temsil eden güç-yasası modeli (üst) ve model artıkları (alt).....	92
Şekil 38	NGC 5194 ve NGC 5195 gökadalalarının üç renk mozaik SDSS görüntüsü.....	95
Şekil 39	ULX-4'ün üç renk X-ışın (Kırmızı: 0,3-1 keV, Yeşil: 1-2 keV ve Mavi: 2-7 keV) görüntüleri. Sol panel: <i>XMM-Newton</i> (XM5), orta panel: <i>Chandra</i> (C12) ve sağ panel: <i>Swift-XRT</i> (30083 gözlem numaralı birleştirilmiş gözlemleri). Görüntüler 3" Gauss ile düzleştirildi (smoothed). ULX-4 kaynağı kesikli beyaz dairelerle	97

- gösterilmiştir. Üç görüntünün tümü aynı bölgeyi gösterir (4,9' ×7,4'). Tüm panellerde kuzey solda ve doğu yukarı yönlüdür.
- ULX-4'ün uzun dönem X-ışın ışık eğrisi (solda) ve histogramı (sağda). *Chandra*, *XMM-Newton* ve *Swift-XRT* gözlemleri sırasıyla içi dolu siyah daireler, mavi kareler ve kırmızı elmaslarla temsil edilmiştir. *Chandra* ve *Swift-XRT* verileri için 3σ üst limitleri sırasıyla siyah ve kırmızı aşağı oklarla gösterilmiştir ve ayrıca histogramda açık karelerle temsil edilmiştir. Histogram için *Swift-XRT* gözlemleri 10 günlük aralıklar ile gruplanmıştır. N, gözlem sayısıdır. Kesikli siyah çizgi, ULX durumu için akı eşliğini gösterir.....
- Şekil 40** 104
- Sırasıyla C12 (2012), C13 (2017), C14 (2018) ve XM6 (2018) gözlemlerinde ULX-4 (beyaz çizgiler) ve yeni geçici kaynak CXOU J132951.7+471010 (kesikli beyaz daire) karşılaştırmaları. 3" yarıçaplı beyaz daireler, Kuntz vd. (2016) tarafından kataloglanan bazı X-ışın kaynaklarını temsil eder. Tüm paneller aynı ölçekte elde edilmiş ve görüntüler 3" yarıçaplı Gauss düzleştirme işlemine tabi tutulmuştur.....
- Şekil 41** 105
- HST* RGB görüntüsü (R: F814W, G: F555W ve B: F435W) üzerindeki ULX-4 ve çevresinin gösterimi. Mor renkli 0,6" yarıçaplı daire, ULX-4'ün *Chandra* konumunu temsil eder. Kesikli sarı daire, ULX-4'ün astrometrik olarak düzeltilmiş koordinatlarını temsil eder. A ve B optik karşılıkları beyaz çizgilerle gösterilmiştir. Kesikli mavi daire yıldız kümesini gösterir. Kesikli beyaz 1" yarıçaplı daire, referans kaynaklar için kullanılan bölgeyi temsil eder. Ayrıca, SED'ler için kullanılan iki alan yıldızı (R1 ve R2) yeşil dairelerle gösterilmiştir.....
- Şekil 42** 108
- Alan yıldızları R1 ve R2 ile optik karşılıklar A ve B'nin SED'leri. Kırmızı ve mavi dolu daireler, sırasıyla A ve B'nin akı değerlerini, içi dolu siyah ve gri kareler ise, sırasıyla R1 ve R2 kaynakların akı değerlerini temsil eder. Çizgiler, daha iyi görünüm için 10 kata kadar yukarı kaydırılmıştır. y ve x eksenlerinin birimleri sırasıyla $\text{erg s}^{-1}\text{cm}^{-2}$ ve Å'dir.....
- Şekil 43** 110
- Optik karşılıklardan A (kırmızı daireler) ve B'nin (mavi daireler) kızarma ile düzeltilmiş SED'leri. y ve x eksenlerinin birimleri sırasıyla $\text{erg s}^{-1}\text{cm}^{-2}$ Å⁻¹ ve Å'dir.....
- Şekil 44** 111
- F606W gözlemlerinde A'nın optik ışık eğrisi için sinüs eğrisi uyumu (üst) ve artıklar (alt). *HST* gözlemleri ve sinüzoidal model sırasıyla içi dolu siyah daireler ve kırmızı çizgi ile temsil edilmiştir
- Şekil 45** 112
- ULX-4'ün optik karşılıkları için *HST/ACS* Renk-Kadir Diyagramı (CMD). Farklı yaşlardaki Padova izokronları siyah çizgilerle
- Şekil 46** 115

	gösterilmiştir. Kırmızı üçgen ve mavi daire sırasıyla A ve B optik karşılıklarını temsil eder.....	
Şekil 47	Üst panel, C12 verisinden elde edilmiş ULX-4'ün <i>güç-yasası</i> modeline uyum gösteren X-ışın enerji tayfi. Artıklar (veri-model) alt panelde gösterilmiştir.....	115
Şekil 48	L_X 'in Γ 'ya karşı diyagramı. Siyah ve mavi daireler sırasıyla <i>Chandra</i> ve <i>XMM-Newton</i> verilerini temsil eder.....	116
Şekil 49	Üst panel, XM1 verisinden elde edilmiş ULX-4'ün <i>güç-yasası+mekal</i> modeline uyan enerji tayfi. Artıklar (veri modeli) alt panelde gösterilir. Kesikli siyah, kırmızı ve yeşil çizgiler sırasıyla pn, MOS-1 ve MOS-2 verileri için mekal modelini temsil eder....	117
Şekil 50	Gürpide vd. (2021) çalışmasından alınmış sertlik- L_X diyagramı kullanarak ULX-4 için tekrardan çizilen HLD.....	120
Şekil 51	ULX-4'ün <i>Chandra</i> verileri için renk-renk diyagramı.....	121
Şekil 52	ULX-4 dahil, pulsar ULX'ler ve Galaktik nötron yıldızlarının spin-süper-orbital diyagramı.....	130

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. X-ışın Astronomisi ve Işıma Süreçleri

X-ışın astronomisi, elektromanyetik tayfin 0,1-200 keV enerji aralığına odaklanır. Bu nedenle, evrenin enerjik olaylarına ve Galaksimizin ötesine oldukça uzak bölgelere açılan bir penceredir. X-ışınları dünya atmosferi tarafından soğurulduğundan bu yüksek enerjili ışımaların yeryüzüne ulaşması neredeyse imkansızdır. Ancak, yüksek irtifalara gönderilen X-ışın roket ve balonları daha sonraları ise gözlemlerinin uzaya fırlatılmasıyla X-ışın astronomisi alanında yapılan çalışmalarda çok önemli gelişmeler kaydedilmiştir.

Bize en yakın yıldız olan Güneş' ten dolayı, X-ışın astronomisinin tarihi ve gelişimi, uzaya gönderilen uydulardan önce başladı. 1949'da Güneş'i incelemek için ABD tarafından bir askeri roket fırlatıldı. Bununla beraber, Güneşten gelen ışımaların Dünya atmosferi ile olan etkileşimi hakkında önemli bilgiler elde edildi. Yine araştırmacılar tarafından tasarlanan iki Geiger-Müller sayacına sahip bir roket, Ay'dan gelen X-ışınlarını ölçmek için fırlatıldı ancak, araştırmalar sonucu herhangi bir X-ışınması belirlenmedi. Ancak, tesadüfen Akrep takımyıldızında çok parlak bir X-ışın kaynağı (Scorpius X-1) tespit edildi. (Giacconi vd., 1962). Bu önemli buluş ile Güneş sisteminin dışında ilk X-ışın kaynağı belirlendi ve uzak evrene olan ilgi daha da güçlendi.

1963 yılında daha gelişmiş dedektörler kullanarak yeni bir roket fırlatıldı, yapılan çalışmalarla Akrep takımyıldızındaki kaynak doğrulandı ve ayrıca Yengeç Bulutsusunda yeni bir X-ışın kaynağı kaydedildi (Bowyer vd., 1964). Nötron yıldızlarının bu kadar parlak X-ışın yayan nesnelere sorumlu olabileceği belirtildi (Morton, 1964). Süpernova kalıntılarından ve radyo galaksilerinden X-ışın ışımalarının gözlenmesi (Byram vd., 1966) ve Galaktik düzlemdeki X-ışın kaynaklarının onda birinin keşfedilmesi (Friedman vd., 1967) gibi X-ışın astronomisinde önemli gelişmeleri başlatan çalışmalar yapıldı.

1970 yılında Dünya'nın yörüngesindeki ilk kalıcı X-ışın gözlemevi olan *UHURU* uydusunun NASA tarafından fırlatılması ile önemli bir gelişme daha yaşanmış oldu. Bu uydu, 2-20 keV enerji aralığına duyarlı ve 30 açı dakikası uzaysal çözünürlüğe sahipti (Giacconi vd., 1971). Bu uydu, 3 yıllık süre boyunca aktif olarak çalıştı ve gözlenen ~339 X-ışın kaynağı kataloglandı (Forman vd., 1978). 1978' de daha iyi uzaysal çözünürlüğe

sahip *Einstein Gözlemevinin* (HEAO-2) fırlatılmasıyla kayda değer bir gelişme yaşandı. Uzaya yerleştirilen ilk tam görüntülü X-ışını teleskopu olan Einstein uydusu için kullanılan ayna ve dedektörler bir sonraki uydulara öncülük etmiştir.

Einstein Gözlemevinin, önemli çıktıkları, galaksilerin ve hatta gökada kümelerindeki sıcak gazın da X-ışınları yaydığını ortaya çıkarması olmuştur (Giacconi, 1980). 1994 ve 2004 yılları arasında gönderilen yeni nesil *Chandra*, *XMM-Newton* ve *Swift* uyduları X-ışın astronomisine önemli katkılar sağlamış ve sağlamaya devam etmektedir. Bu üç önemli X-ışın gözlemleri hakkında detaylı bilgi Bölüm 3’de ele alınacaktır.

1.2. Işıma Süreçleri

X-ışın ışıması birçok gök cisminde gözlenebilmektedir. Bu bölümde, X-ışın mekanizmaları ve X-ışın çift sistemlerinden gözlenen X-ışın yayılımı doğası üzerinde durulacaktır. Bu bölümde, X-ışınımı oluşturmak için en önemli astrofiziksel mekanizmalardan bazıları özetlenmiştir.

Elektromanyetik ışıma, dalgaboyu, λ , frekans ν veya foton enerjisi, E ile tanımlanabilir. Foton enerjisi aşağıda verilen Denklem 1.1 ile ifade edilir.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

Burada, h Planck sabiti ve c ışığın boşluktaki hızıdır. Bir kaynağın tayfı, kaynaktan gelen fotonların enerjisinin bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Detaylı olarak tanımlanmış bir nicelik yoğunluktur $I(\theta, \Phi, E)$. Burada θ , Φ kaynağın gökyüzündeki açısal konumu ile ilgilidir. Yoğunluğun kaynağın yüzey parlaklığına sayısal olarak eşit olduğu gösterilebilir. Yüzey parlaklığı, $B(\theta, \Phi, E)$, kaynağın görünür alanı (θ), yayılan katı açı (Φ), birim enerji (E) aralığı başına yayılan güç olarak tanımlanır. Yoğunluk yalnızca çözülebilen (ayrık) kaynaklar için ölçülebilir. Açısal doğrultusu teleskopun nokta yayılma fonksiyonundan (PSF) daha büyük olan kaynakların akı yoğunluğu Denklem 1.2 ile ifade edilebilir:

$$S(E) = \int_{kaynak} I(\theta, \Phi, E) \cos\theta d\Omega \quad (1.2)$$

Burada θ , X-ışın detektörünün bakış doğrultusuna göre eğim açısını gösterirken Ω katı açığı temsil etmektedir. Akı yoğunluğu, birim zaman başına, birim alan başına, birim enerji aralığı başına bir açıklığa (aperture) düşen enerjiyi verir. Bu yoğunluğun ilgilendirilen enerji aralığı üzerine integralini almak, o enerji aralığındaki akıyı verir (Denklem 1.3):

$$F = \int_{E_1}^{E_2} S(E)dE \quad (1.3)$$

Kaynak eş-yönlü (izotropik) olarak ışına yayılıyorsa, aynı enerji aralığındaki parlaklığı ya da ışıması (birim zamanda yayılan enerji) Denklem 1.4 ile verilir:

$$L = 4\pi FD^2 \quad (1.4)$$

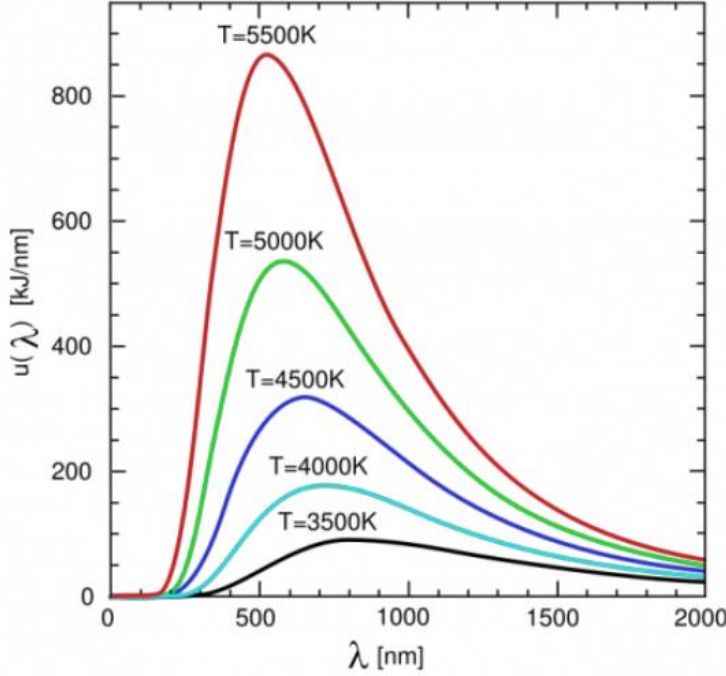
Burada D kaynağın gözlemciye olan uzaklığıdır.

1.2.1. Karacisim Işıması

Karacisim, üzerine düşen tüm elektromanyetik (EM) ışınmayı soğuran teorik bir nesnedir. Herhangi bir ışınmayı yansıtmadığı için bu cisim mükemmel siyah/kara olarak tanımlanır. Bununla birlikte, eğer cisim termal dengede ise soğurduğu oranda EM ışına yayar. Bu olaya *karacisim ışıması* denir.

Aslında, bir *karacisim*in ışıması veya tayfı, *Planck* yasası ile cismin şekli veya kompozisyonu gibi diğer faktörlere bağlı olmadan, ışımanın yalnızca sıcaklıkla belirlenebileceği şeklinde de tanımlanabilir. Şekil 1'de çeşitli sıcaklıklarda karacisim ışımasının tayfları gösterilmektedir. Tayftan da anlaşılacağı üzere, artan karacisim sıcaklıklarına doğru enerji dağılımının maksimum değeri, kısa dalga boyuna (λ) kayar (*Wien* yasası, $\lambda_{mak} = \frac{b}{T}$). Burada $b=2,897 \times 10^3$ m.K değeri ile *Wien* yer değiştirme sabiti ve T cismin sıcaklığını (K) temsil eder. *Wien* yasasındaki, T sıcaklığı Stefan-Boltzmann yasası ile tanımlanır. Bu yasa, karacisimden yayılan toplam akı F ve σ Stefan-Boltzmann sabiti ($5.67 \times 10^8 W/m^2 K^4$) olmak üzere $F = \sigma T^4$ şeklinde verilir. Herhangi bir nesneden gelen

termal ışımaya, yıldızlar gibi bazı gök cisimlerinden gelen ışımaya veya sıkışmış nesnelere yığılma disklerinden gelen ışımaya *karacisim ışımaya* olarak dikkate alınabilir.

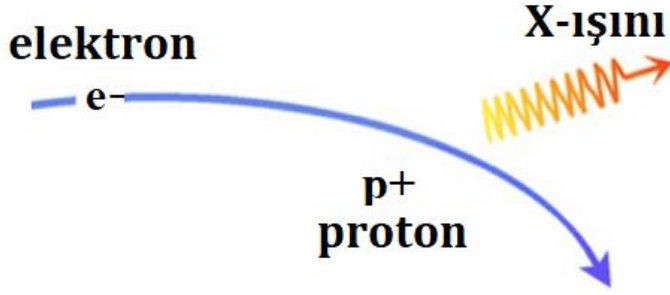


Şekil 1. Farklı sıcaklıklardaki *karacisim ışımaya*nın tayfları

Çift sistemlerin yığılma disklerinden gelen termal ışımaya durumunda ortam ya da madde optik olarak oldukça kalın olduğundan, fotonlar disk içinde termal hale gelir ve bu nedenle neredeyse termal dengede olurlar. Diskten kaçan fotonlar yaklaşık olarak *karacisim ışımaya* modeline uyumlu dağılım gösterir.

1.2.2. *Bremsstrahlung* (Frenleme) Işımaya

Bremsstrahlung, frenlenen ışımaya veya ışımaya yavaşlaması anlamına gelen Almanca bir terimdir. Yüklü parçacıkların (örneğin proton) başka bir yüklü parçacığın (örneğin elektron) yakınından geçerken yavaşlamasıyla üretilen bir EM ışımaya sürecidir (Şekil 2). Bir elektron yavaşladığında, enerji korunumu yasası nedeniyle kaybedilen kinetik enerji bir fotona dönüşür. *Bremsstrahlung* ışımaya aynı zamanda serbest-serbest ışımaya olarak da bilinir çünkü; serbest olan elektron etkileşimden sonra da serbest kalır.

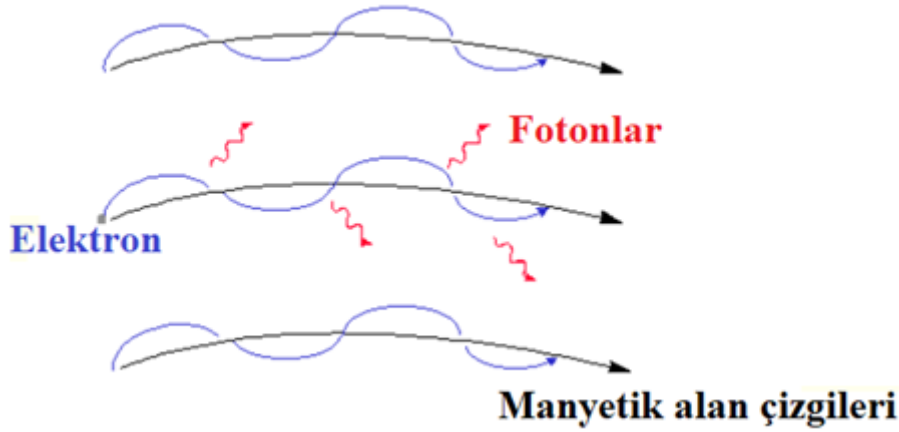


Şekil 2. Bir elektronun, protonun elektrik alanı tarafından saptırıldığı için yavaşlamasıyla üretilen *Bremsstrahlung* ışınması.

Plazma yapılarıdaki elektronlar ve protonların etkileşimleri sonrası oluşan termal denge, termal *Bremsstrahlung* ışınmasını oluşturabilir. Bu ışınma genellikle, HII bölgelerinden gelen ışınalarda, gökada kümelerindeki gökadalar arası gazda ve ayrıca yığılma diskleri gibi astronomik plazmada görülür.

1.2.3. *Synchrotron* (Sinkrotron) Işınması

Sinkrotron ışınması, görelî (rölativistik) veya ultra rölativistik yüklü parçacıklar yani ışık hızına yakın hızlarda hareket eden parçacıklar, manyetik bir alanda radyal olarak hızlandırıldığında (yani eğri bir yolda veya yörüngede hareket ettiğinde) üretilir. Bu ışınma, Şekil 3’de şematize edilmiştir. Elektronlar bir manyetik alandan geçtiklerinde manyetik alan tarafından hızlandırılırlar ve manyetik alan çizgileri etrafında spiral bir yörüngede yüksek hızda hareket ederler. Elektronlar manyetik alan kaynaklı ivmelendirildiğinde, *sinkrotron* ışınması gözlenir. Teorik olarak, eğri bir yolda hareket eden veya düz bir hat üzerinde hızlanan herhangi bir yüklü parçacık, EM ışınma yayacaktır. *Sinkrotron* terimi, yüklü parçacıklar ışık hızına yakın bir hıza hızlandırıldığında yayılan ışınmayı ifade eder.

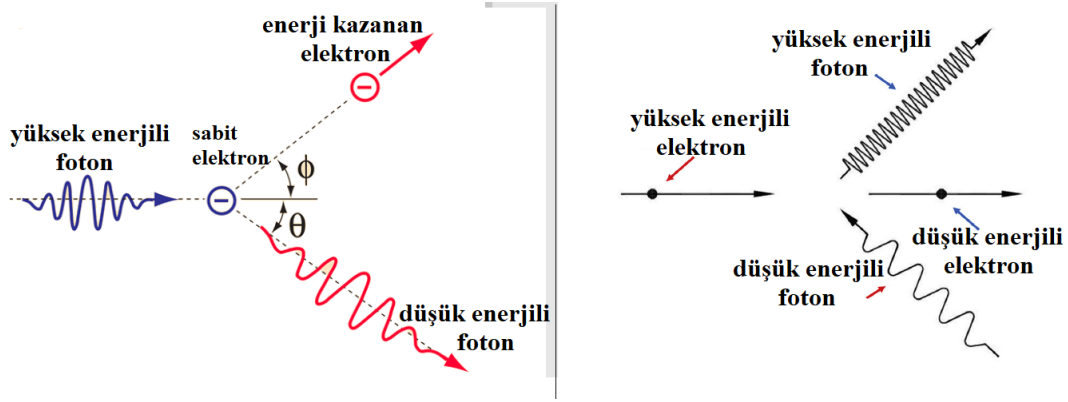


Şekil 3. Sinkrotron ışımalarının temsili gösterimi.

Bu süreç, süpernova kalıntılarından ve Gökada-dışında radyo kaynaklarından gelen radyo emisyonu gibi birçok türde gökcisminden gelen termal olmayan ışımadan sorumludur. Ayrıca, bu ışımaya Aktif Gökada Çekirdeklerindeki (AGN) X-ışın jet ışımalarında da gözlemlenir (Bai ve Lee, 2001).

1.2.4. Compton Saçılması

Compton saçılması, bir fotonun, genellikle elektron olan yüklü bir parçacık ile esnek olmayan çarpışmasıdır. Compton saçılması olayı, enerjili bir fotonun bir elektronla etkileşmesiyle (çarpışması gibi), fotonun enerjisinin bir kısmını elektrona aktararak elektronun enerji kazanmasıdır. Foton enerjisini kaybettiği için *Planck-Einstein* ilişkisine göre saçılan foton daha düşük frekansa (daha uzun dalgaboyuna) sahip olur. Bununla birlikte, elektronun rölativistik olması durumunda, tersi bir durum gerçekleşir. Fotonlardan daha fazla enerjiye sahip elektronların fotonlarla çarpışınca, enerjilerinin bir kısmını fotona aktarır. Bu olaya *ters-Compton* saçılması denir ve termal olmayan ışımalar gözlenir. *Karacisim* gibi termal ışınım ile açıklanamayan çift sistemlerin X-ışın tayflarında sıklıkla görülen yüksek enerjili ışınımlardır. *Compton* ve *ters Compton* olaylarının Şekil 4'de şematik gösterimi verilmektedir.

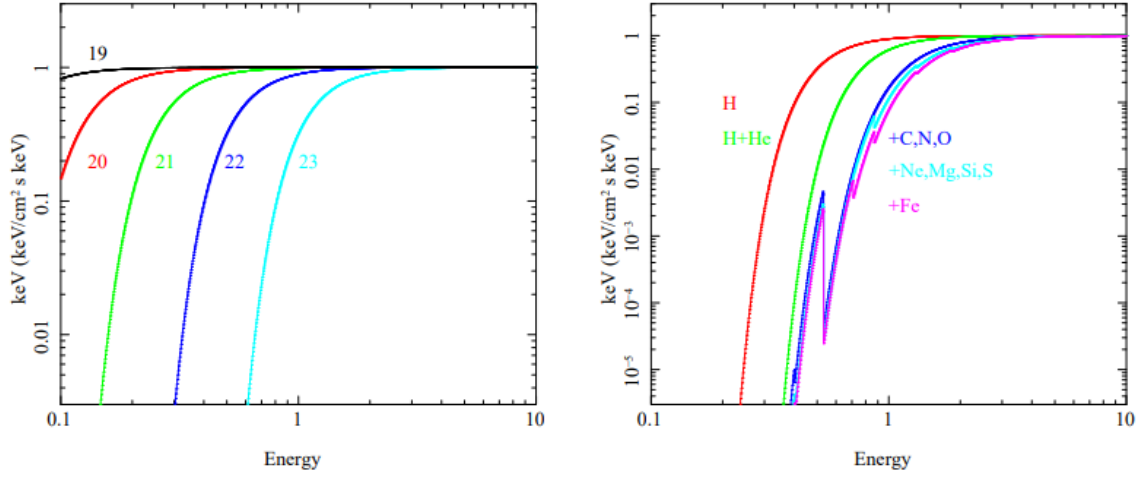


Şekil 4. Compton saçılması (sol) ve ters Compton (sağ) olaylarının şematik gösterimi.

1.2.5. Fotoelektrik Etki

Fotoelektrik etki, bağlı bir elektronun gelen bir fotonu soğurduğunda bir atomdan salındığı (yani serbest elektron haline geldiği) bir olaydır. Bu etki, enerjisi $E = h\nu$ olan (burada h Planck sabiti ve ν foton frekansıdır) elektronun bağlanma enerjisine eşit veya daha büyük olduğu durumda gerçekleşir. Enerjinin bir kısmı elektronu yörüngesinden koparmak için kullanılır, kalan enerji elektronu ivmelendirmek için kinetik enerjiye dönüştürülür.

Gök cisimlerinden gelen X-ışın fotonları, görüş hattı boyunca uzanan yıldızlararası madde (Gökada + Gökada ötesi) tarafından fotoelektrik etki nedeniyle kısmen soğurulur. Doğal X-ışın tayflarının *fotoelektrik* etkisinin (fotoların soğurulması) bir örneği Şekil 5'de gösterilmektedir. Burada foton indisi, $\Gamma=2$ olan ve bir *güç-yasası* (*power-law* ya da *PL*) ile modellenebilen kaynakların enerji tayflarını temsil etmek için kullanılmıştır.



Şekil 5. Sol: $\log N_H = 19, 20, 21, 22, 23$ (soldan sağa) sadece Hidrojenin Fotoelektrik soğurulması. Burada N_H soğurma sütununu temsil eder. Sağ: Giderek daha ağır atom numaraları eklendikçe $\log N_H = 22$ soğurma sütununun fotonların enerjisini nasıl etkilediğini gösterir (Bu eğriler Done (2010) çalışmasından alınmıştır).

Bu süreç, metal levhalarda bir fotoelektrik akımın üretmesine neden olur. İlginç kaynaklardan gelen doğal X-ışın fotonları, Gökadamızdaki yıldızlararası ortamda ve X-ışın kaynaklarının barınak galaksiler dahil görüş hattı boyunca materyal tarafından fotoelektrik etki nedeniyle soğurulur. Doğal X-ışın tayflarının *fotoelektrik* etkisinin (fotonların soğurulması) bir örneği Şekil 5'de gösterilmektedir. Bu şekilde foton indisi, $\Gamma=2$ olan ve bir güç-yasası (*power-law* ya da *PL*) ile modellenebilen kaynakların enerji tayflarını temsil etmek için kullanılmıştır.

1.3. X-ışın Çiftleri

X-ışın çiftleri (X-ray Binaries, XRB), ortak kütle merkezleri etrafında belirli bir yörüngede bir tıkız nesne ve bir donör (eş) yıldız içerir. X-ışın çiftleri üç alt sınıfa ayrılabilir. Bunlardan ilki tıkız cisim olarak bir beyaz cüce içeren ve CV (Cataclysmic Variable) olarak adlandırılan sistemlerdir. X-ışın çift sistemlerinin diğer iki sınıfını ise tıkız cisim olarak ya bir nötron yıldızı ya da bir karadelik içerir. Bu sistemler, düşük kütleli X-ışın çiftleri (Low Mass X-ray Binary, LMXB) ve yüksek kütleli X-ışın çiftleri (High Mass X-ray Binary, HMXB) olarak tanımlanır ve sistemin adı tıkız nesnenin doğasına değil, donör yıldızın

kütlesine bağlıdır. Bu tez çalışması boyunca sadece bir nötron yıldızı ya da karadelik içeren XRB'lerle ilgileneceğiz.

1.3.1. Küçük kütleli X-ışın Çiftleri (LMXB)

Bu sistemlerde donör yıldızın kütlesi $\leq 1 M_{\odot}$ kütleli olduğunda, sistem LMXB olarak tanımlanır. Bu sistemlerin çoğunun donör kütlelerini belirleyen çalışmalar optik gözlemlere dayanmaktadır (van Paradijs ve McClintock, 1995, Liu vd., 2007). Yıldız evrim sürecinde, düşük kütleli yıldızların enerji üretimi daha yavaş olduğundan ömürleri daha uzun dolayısıyla bu sistemlerin yaşlı olması öngörülür.

Galaktik merkezde ve Galaktik düzlemde gözlenen bu tür sistemlerde tıkız nesne etrafındaki yığılma Roche lobu taşması yoluyla gerçekleşebilir. Bu tür yığılmalar, tıkız nesnenin yörüngesine bağlı olarak veya donör yıldızın yaşam döngüsünün sonraki aşamalarında Roche lobunu doldurmak için yüzey alanı genişledikçe meydana gelebilir. Bunun bir sonucu olarak, yörünge periyotları 0,19 – 398 saat gibi geniş bir aralık bulunur (van Paradijs ve McClintock, 1995). Bu sistemlerin yaşam süreleri ($10^7 - 10^9$) yıl civarındadır (Tauris ve van den Heuvel, 2006). LMXB'lerin donör yıldızı genelde A veya daha geç tayf türüne sahiptir (White vd., 1995). Ancak, optik ışımda yığılma diskinin de katkısı olacağından, bu sistemlerdeki yıldızların tayfsal sınıflarını doğru bir şekilde tanımlamak zor olabilir. Yığılma disklerin optik ışıma katkısı yüksek olan bu tür sistemler parlak (mavi) olarak gözlenebilir.

1.3.2. Büyük kütleli X-ışın Çiftleri (HMXB)

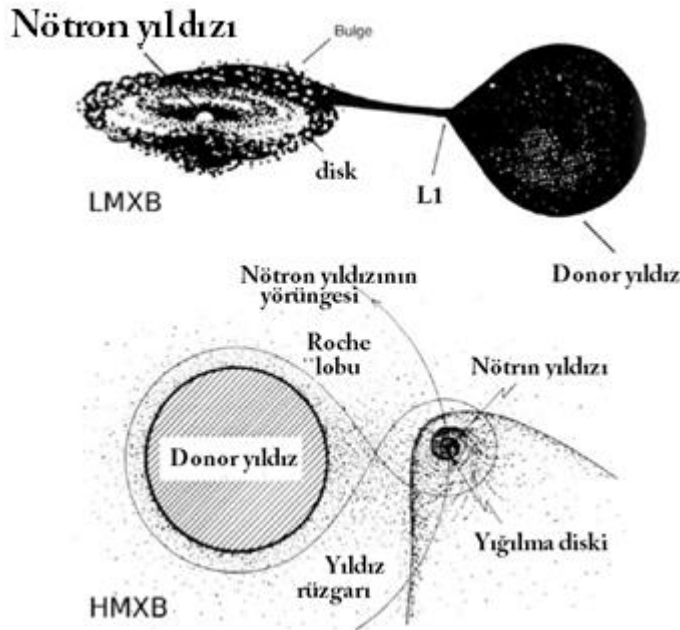
Bu sistemler, yığılma diskine sahip bir nötron yıldızı veya bir karadelikle kütlesi $>10 M_{\odot}$ olan donörlere sahip erken tip bir yıldızdan oluşan ikili sistemlerdir (van Paradijs ve McClintock, 1995).

Donörün görece büyük bir kütlesi varsa, örneğin bir Be veya O tipi yıldızsa, sistem HMXB olarak bilinir. Bu türdeki kütleli yıldızlar, genellikle, tıkız nesne tarafından yakalanabilen kuvvetli rüzgarları oluşturur. Sonuçta ortaya çıkan kütle akışları genellikle rüzgarla beslenen sistemlerdir. Bu sistemler, donör yıldızların kütlelerinden dolayı görece

kısa ömürleri nedeniyle genellikle gençtirler ($\sim 10^5 - 10^7$ yıl) ve genel olarak daha uzun yörünge periyotlarına (<187 gün) sahiptirler (van Paradijs ve McClintock, 1995). Büyük kütleli donör yıldızlar çok parlaktır ve bu durum bu tür kaynakların optik karşılıklarının tanımlanmasında kolaylık sağlar. Bu tür sistemler genellikle genç yıldız popülasyonlarının olduğu bölgelerde bulunur. LMXB ve HMXB kütle aktarım mekanizmaları Şekil 6'da gösterilmiştir.

Büyük kütleli yıldızlarda tıkHz nesne etrafındaki yığılmalar yıldız rüzgarlarıyla oluştuğundan bu rüzgarlarla kütle kaybı $\sim 10^6 M_{\odot} \text{ yıl}^{-1}$ 'e ulaşabilir (Tauris ve van den Heuvel, 2006). Büyük kütlelerinden dolayı yaşam süreleri kısa olan HMXB'ler, genellikle genç yıldızların bulunduğu sarmal gökadalarda bulunurlar. HMXB'ler genel olarak Galaktik düzlemde konumlandıklarından yıldız oluşumlarının değerlendirilmesi için iyi örneklerdir. Bir galakside 0,5–8 keV aralığındaki HMXB'lerin X-ışın ışıması ve sayısı, yıldız oluşum oranı (Star Formation Rate, SFR) ile doğrudan ilişkilidir (bkz. Denklem 1.5, Mineo vd., 2012):

$$L_X(\text{erg s}^{-1}) = 2,61 \times 10^{39} \text{SFR } M_{\odot} \text{ yıl}^{-1} \quad (1.5)$$



Şekil 6. LMXB ve HMXB'lerde donör yıldız tarafından tıkHz nesneye kütle aktarım mekanizmasının şematik gösterimi.

1.3.3. Tıkız Nesnelere: Karadelik, Nötron yıldızı ve Beyaz Cüceler

Bir karadelik, matematiksel olarak tanımlanmış bir uzay-zaman bölgesidir. Kütle ve yoğunluğundan dolayı oldukça yüksek kütle çekim kuvvetine sahip olduğundan EM ışın bile ondan kaçamaz (Wald, 1984).

1915' de Albert Einstein, kütle uzay-zamanı ve ışığın hareketini nasıl etkilediğini gösteren genel görelilik teorisini yayınladı. 1916' da ise Schwarzschild, Einstein'ın genel görelilik teorisini uygulayarak Einstein alan denklemlerine matematiksel çözümler buldu. Bu çözümde, Schwarzschild yarıçapı olarak bilinen, $R_s = \frac{2GM}{c}$ bağıntısını yayınladı. Burada G kütleçekim sabiti, cismin kütlesi ve c ışık hızı olarak tanımlanır. Bu yarıçap tarafından tanımlanan küresel yüzey, karadeliğin 'olay ufku' olarak adlandırılır ve olay ufkunun içindeki olaylar, onun dışındaki olaylar üzerinde hiçbir etkiye sahip olamaz. Böylelikle, karadelik için ilk defa modern bir tanım yapılmış oldu.

Karadeliklerin merkez bölgesinin doğrudan gözlemlenmesi imkansızdır, çünkü tanım gereği, olay ufkunun dışında karadelik içinden hiçbir olgu gözlenemez. Karadelikleri sadece dolaylı yoldan gözlemleyebiliriz. Karadelikler, yakın çevrelerinde maddenin bulunduğu bir bölgede, örneğin yıldızlararası ortamda veya çift sistemlerde yığılma diski varsa, bazen güçlü kütle çekim kuvveti maddeyi çekebilir. Karadeliklere doğru yığılma olarak bilinen bir süreçte, madde bir birikme diski vasıtasıyla karadeliğe doğru sarmallaşır ve kütle çekim potansiyel enerjisi elektromanyetik ışıma dönüşür.

Yıldızların yakıtları bittiğinde, termonükleer ışımanın ışıma basıncı (dışarı doğru) yetersiz kalır. Bu nedenle içe doğru olan kütle çekim kuvveti baskın hale gelir. Bunun son aşaması yıldız kütlesine bağlıdır. Küçük kütleli yıldızlar için, kütleçekimsel çöküş durdurulur ve yıldızın Pauli dışlama ilkesinin bir sonucu olarak elektronlarının yozlaşma (dejenere) basıncı ile dengelenir ve böylece bu yıldızlar beyaz cüceler olur.

Başlangıçtaki yıldız kütlesi $\geq 8 M_{\odot}$ olduğunda, dejenere olan elektron basıncı, kütle çekim kuvveti karşısında oldukça zayıftır. Bu süreçte, yıldız içe doğru çökmeye devam eder ve sonunda bir süpernova patlaması meydana gelir ve dış zarfını uzaya fırlatır. Artık geriye kalan bir yıldız çekirdeğidir. Dejenere olmuş elektron basıncının, kütle çekim kuvvetini dengelemesi için yıldız çekirdeğinin sınır kütlesi yaklaşık $1,4M_{\odot}$ olarak bilinir. Çökme sonlandığında, denge artık dejenere olmuş nötron basıncıyla dengelenir. Bu yüzden, bu tür tıkız nesneye nötron yıldızı denir.

Nötron yıldızlarında, merkezindeki yakıt tamamen yanarak ağır metallere (örn. demir) dönüştüğünde, enerji üretimi durur ve merkez hızla çökmeye başlar. Elektronların ve protonların etkileşimi ile nötrinolar ve nötronlar meydana gelir. Nötrinolar, çöken çekirdekten kolayca kaçabilirler, ancak nötronlar, yoğunlaşmaya başlar ve çekirdekte birikmeye başlar. Bu noktada, nötronlar mümkün olan en küçük alanı kaplar. Eğer çekirdek kütlesi $< 3 M_{\odot}$ ise, bir yıldız destekleyebilecek bir basınç uygularlar. Nötron dejenerasyon basıncı tarafından desteklenen bir yıldız, manyetik alanı dönüş eksenine uygun şekilde hizalanmışsa milisaniye ve saniye arasındaki periyotlarla dönen pulsar olarak adlandırılan atımlar gözlemlenir. Yaklaşık $1.4 M_{\odot}$ kütleye sahip, ancak yarıçapı sadece 10-15 km olan bu nesnelere, şiddet aralığı $10^8 - 10^{15}$ Gauss (G) olan çok güçlü manyetik alanlara sahiptir (Reisenegger, 2001).

Bununla birlikte, başlangıç yıldız kütlesi $\geq 15-20 M_{\odot}$ olan çekirdek, nötron dejenerasyonu baskısıyla desteklenemeyecek kadar büyüktür. Büyük kütle çekim kuvvetinden dolayı çöküş kaçınılmaz olur ve bu yıldızlar birer karadeliğe dönüşürler. Remillard ve McClintock (2006) çalışmasına göre, Gökadamızda tespit edilen karadelik kütlesi $3-20 M_{\odot}$ arasında değişmektedir, bu nedenle yıldız kütleli karadelikler olarak adlandırılır. Bu yıldız kalıntısı karadelik kütlesi yalnızca başlangıçtaki yıldız kütlesine değil, aynı zamanda hem yıldızların evrimi sırasında hem de karadelik oluşumu sırasındaki süpernova patlamasında ışınlama dönen rüzgarlar yoluyla kaybedilen kütle miktarına da bağlıdır.

Gökadamız da bu süreçler yıldız kütlesinin dışarı atılmasında etkilidir ve bu nedenle karadeliklerin kütlesini $< 20 M_{\odot}$ olacak şekilde sınırlar. Bununla birlikte, düşük metalik ortamlarda, süreçler daha az etkilidir ve kütlesi $(10^5 - 10^{10}) M_{\odot}$ olan karadelikler mevcuttur (Belczynski vd., 2010). Böyle karadeliklere süper kütleli (messive) karadelik denilmektedir. Gökadamız da dahil olmak üzere, gökadalara çoğunun merkezinde süper kütleli karadelik bulunmaktadır. Çevrelerindeki kütleli topladıkları durumlarda (yığılma diski), AGN, gökada merkezlerinde radyo, mikrodalga, kızılöte, optik, X-ışın, ultraviyole ve gama ışını gibi çokludalga bantlarında EM ışın yaymasına neden olurlar.

Samanyolu gibi galaksiler söz konusu olduğunda, merkezinde bir AGN yoktur, ancak Galaktik merkezimizde kütlesi $\sim 5 \times 10^6 M_{\odot}$ olan karadeliğin varlığı hakkında uzun zamandır sürdürülen çalışmalar, (etrafında hareket eden yıldızlar yörünge hareketlerinin belirlenmesi gibi) ile kanıtlanmıştır. Çok yakın zamanda (Mayıs, 2022), Event Horizon

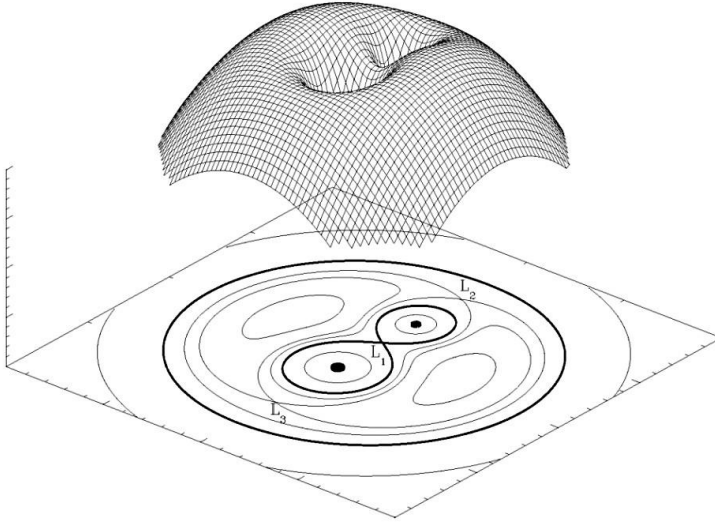
Teleskopu ile ilk defa Galaksimiz merkezindeki bulunan bir karadeliğin çevresinin radyo görüntülerinin yayınlanmasıyla başarıya ulaştı.

1.3.4. Karadelik ve Nötron Yıldızların Etrafındaki Yığılma Diskleri

Genellikle karadelikler ve nötron yıldızları (veya tıkız nesnelere) yakınında madde olduğunda, kuvvetli kütle çekimi nedeniyle etrafına kütle (madde) çekerek bir yığılma diski oluştururlar. Kütlelerin karadeliklere fiziksel olarak nasıl aktarıldığını açıklamak için, Roche lobu kavramından yararlanılır. H-R (Hertzsprung-Russell) diyagramında sıfır yaş anakolu üzerinde bulunan, fiziksel olarak birbirlerine temas eden ve bunun sonucu olarak değen çiftler olarak adlandırılan sistemler mevcuttur. Küresellikten sapmış çift sistemler için kütle çekim etkilerini modelleyebilen Roche Model'ine ihtiyaç duyulmaktadır.

Yıldızın kütle çekim kuvvetinin yanı sıra merkezkaç kuvvetini de hesaba katan Roche lobu, her iki nesnenin kütle çekiminin etkin bir şekilde ortadan kalktığı Lagrange L1 noktasında birleşen, yaklaşık gözyaşı damlası şeklinde, kritik kütle çekimi eş potansiyel yüzeyidir. M_1 ve M_2 sırasıyla tıkız nesne ve donör yıldızının kütleleri olmak üzere, kütle oranı $\frac{M_1}{M_2} = 0,2$ olduğunda Roche potansiyelinin üç boyutlu bir temsili Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7'nin alt paneli damla şeklindeki eş potansiyeller, yıldızların Roche lobları olarak tanımlanır. L1, L2 ve L3 Lagrange noktalarıdır. Donör yıldız, Roche lobunu doldurursa, kütle L1 noktasından tıkız yıldızla kütle aktarır.

Bazı büyük kütleli OB türü yıldızların yıldız rüzgârı çok güçlüdür. Bu güçlü rüzgarlar ile yüksek enerjilere ulaşan kütleler Roche lobundan kaçabilirler. Bu durumda, dışarı akan maddenin bir kısmı tıkız nesne tarafından yakalanır. Tıkız nesneye aktarılan madde yığılır ve bunu yaparken, ağırlıklı olarak X-ışın enerji bandında EM ışın yayar. Genelde bu tür sistemler HMXB'lerdir. Öte yandan, LMXB'ler, yıldız rüzgârı o kadar zayıftır ki maddeyi tıkız nesneye aktaramaz. Bu tür sistemlerde, donör yıldız şişer yani süperdev aşamasına gelir ve Roche lobunu doldurarak tıkız nesneye doğru kütle aktarır. White vd. (1995) çalışmalarına göre, bu tür sistemlerde tayf türü A veya daha geç tip bir donör yıldız içerir (Done vd., 2007).

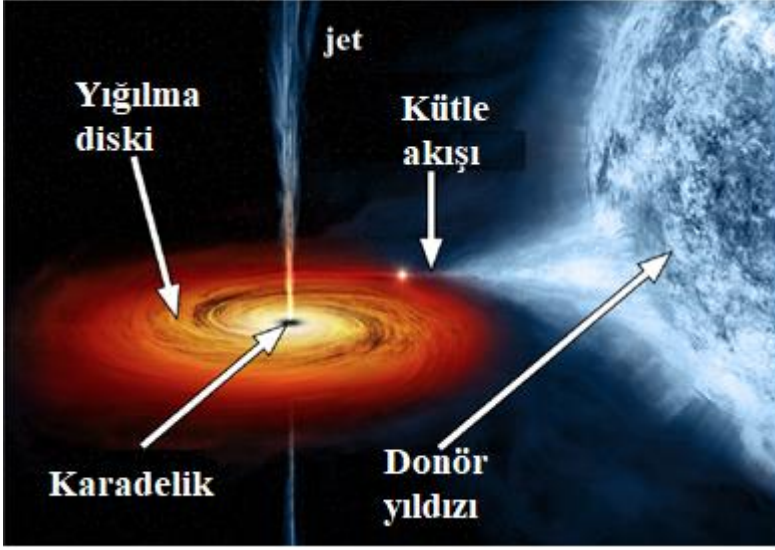


Şekil 7. Kütle oranı 0,2 olan bir çift sistem için eşpotansiyel yüzeyleri.

Etrafında birikme diski oluşturan bir karadelik içeren çift sistemin yapısı Şekil 8’de gösterilmiştir. Standart yığılma diskinin geometrisi Shakura ve Sunyaev (1973) tarafından sunulmuştur. Bu standart disk modelinde, karadeliklerin etrafındaki dönen yığılma diskleri yoğun, optik olarak kalın ve geometrik olarak ince olduğu varsayılır.

Kütle, karadeliklerin etrafında dairesel olarak onlardan biraz uzakta hareket ederken, dışa doğru merkezkaç kuvveti, içe doğru kütle çekimi kuvveti ile dengelenir. Bu nedenle madde açısız momentumunu kaybederse karadeliklerin içine doğru kıvrılır. Madde içe doğru kıvrılırken, kütle çekim enerjisi açığa çıkar. Açığa çıkan enerjinin bir bölümü dönme hareketinden dolayı kinetik enerjiye çevirirken geri kalanı bölümü EM ışımaya dönüşür.

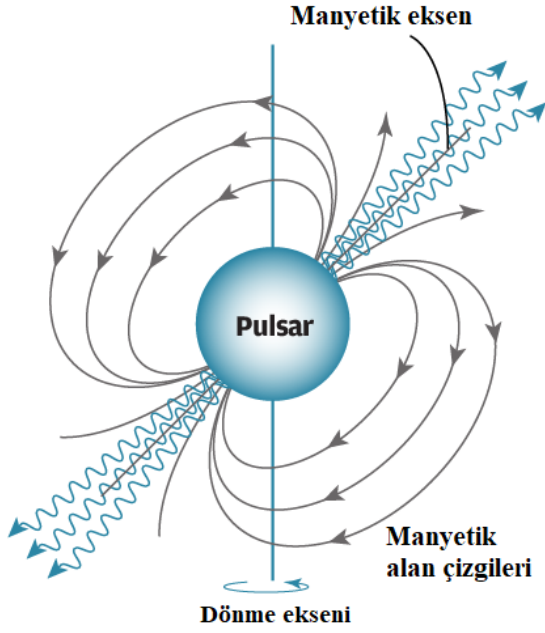
Diskten gelen ışıma, $L = \frac{GM\dot{m}}{2R}$ olarak tanımlanabilir (Longair, 2011).



Şekil 8. Bir karadelik X-ışın çift sisteminin gösterimi.

Disk ısıtması kütle birikme oranı \dot{m} ile doğru orantılıdır. Ayrıca, diskin ışınma akışındaki artış aynı zamanda dışarıya doğru ışınma basıncını da arttırmaktadır. Bilindiği üzere, *Eddington* sınırı olarak bilinen ışınma basıncı ile kütle çekim kuvvetinin dengelendiği bir üst limit vardır (bkz. *Eddington* sınırı; Bölüm 1.4).

Nötron yıldızları genellikle süpernova kalıntılarının merkezlerinin yakınında gözlenir ve radyo, optik, X-ışın ve gama ışını bantlarında EM ışınma yayarlar. Ayrıca, güçlü manyetik alanlara sahip hızla dönen nötron yıldızları ya da X-ışın pulsarları, bir nötron yıldızının donör yıldızdan kütle topladığı ve ışınma yaydığı çift sistemlerde tespit edilebilir. Yığılan madde, alan çizgileri tarafından manyetik kutuplara doğru yönlendirilir, çünkü kütle kütleçekimsel enerjisini kaybeder, manyetik kutuplar boyunca EM ışınma üretilir. Manyetik alan için olası değerlerin tüm aralığı, milisaniye pulsarlar için $\sim 10^8$ G'tan magnetarlar için $> 10^{15}$ G'a kadar geniş bir aralığı kapsar (Konar, 2017). Bir pulsar için yaygın kabul gören bir senaryo, dönüş eksenini ve manyetik eksenin hizalanmamış olmasıdır. Tipik bir pulsarın şematik gösterimi Şekil 9'da verilmektedir. Manyetik kutuplardan gelen ışınlar nötron yıldızı ile birlikte dönmektedir. Bu ışık demeti dönme periyodu süresinde gözlemcinin bakış doğrultusunda gözlemlenirse, dönme periyodunu veren bir puls tespit edebilir.

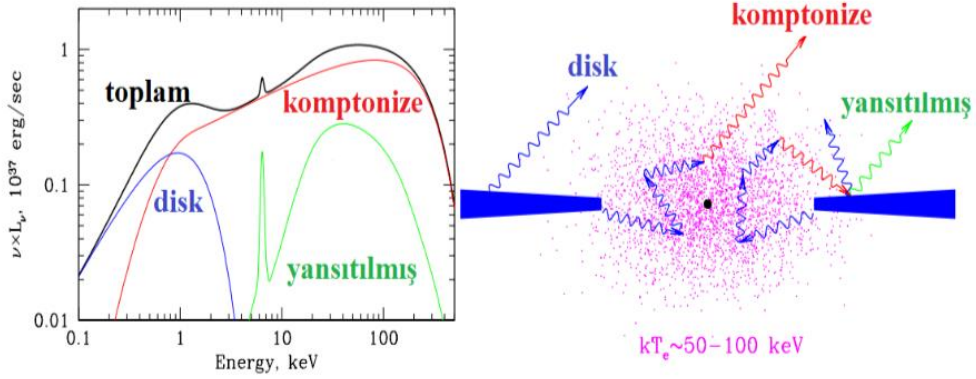


Şekil 9. Tipik bir pulsarın şematik gösterimi.

1.3.5. Karadelik Çiftlerinin X-ışın Enerji Tayfları

Karadelik çift sistemlerin, X-ışın tayflarını temsil eden tipik bileşenler Şekil 10 sol panelinde, böyle bir ışıma karşılık gelen yığılma geometrisi aynı şeklin sağ panelinde gösterilmiştir. Yayınlanan düşük enerjili ışıma, yumuşak (soft) tayfsal bileşen, optik olarak kalın ve geometrik olarak ince yığılma diskinden yani Shakura-Sunyaev disk ışıması olarak tanımlanır. Bu ışıma, çok renkli karacisim disk modeli (*MCD* ya da *DISKBB*) modeli ile açıklanabilir. Bu model, optik olarak kalın yığılma diskinden gelen termal ışıma, yığılma diskin her bir yarıçapından gelen *karacisim* ışımalarının toplamını ifade eder.

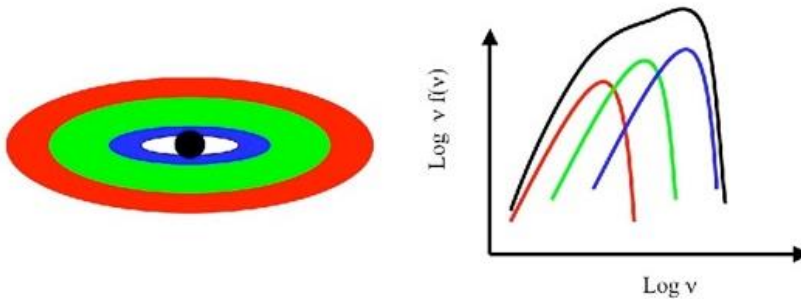
Standart bir ince yığılma diskinden gelen termal ışıma Şekil 11’de şematize edilmiştir. Şeklin sol panelinde yığılma diskin katmanları farklı renklerle gösterilmiştir. Aynı Şeklin sağ panelinde ise bu katmanlardan gelen X-ışın ışımasının enerji tayflarını göstermektedir. Her bir yarıçaptaki (R) karacisim sıcaklığı T farklıdır. İç yarıçaplar dış yarıçaplardan daha sıcaktır, çünkü ikisi arasındaki ilişki bu tür disk için $T_{(R)} = R^{-3/4}$ şeklinde ifade edilir (Longair, 2011). Komptonize olmuş bileşen, yığılma diskinin iç yarıçapında bulunan geometrik olarak kalın, optik olarak ince yığılma akışında yumuşak (soft) disk fotonlarından kaynaklanır.



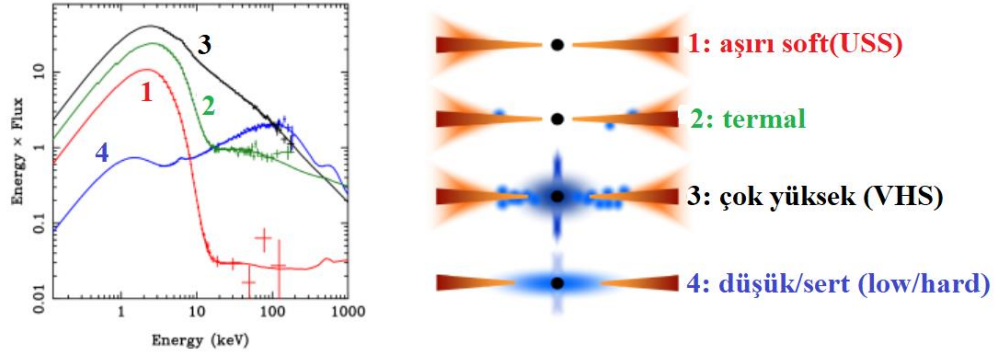
Şekil 10. Sol: Etrafına kütle biriktiren (disk oluşturan) bir karadeliğten X-ışın ışınmasının üç ana bileşeni. Sağ: Birikim akışını temsil eden gösterim. (Şekiller Gilfanov (2010) çalışmasında alınmıştır).

Bu fotonlar, ortamdaki elektronlarla etkileşip daha yüksek enerjiye sahip olacaklar. Artan fotonlardan dolayı sıcaklığı artan yığılma diski, bu yoğun fotonların yığılma diskinde daha düşük enerjili fotonlar salmasına (reprocessing) neden olur. Bu durumlarda, X-ışın enerji tayfında yansıma bileşeni gözlenir. Genel olarak, belirli bir karadeliğin X-ışın çiftinin tayfı bu üç bileşen arasındaki dengeye bağlıdır (bkz. Şekil 10).

Aslında, bir X-ışın tayfı X-ışın ışıltmasının bir fonksiyonudur. Işıltmanın arttığı durumlarda tayflar şekilsel olarak da değişir (bkz. Şekil 12).

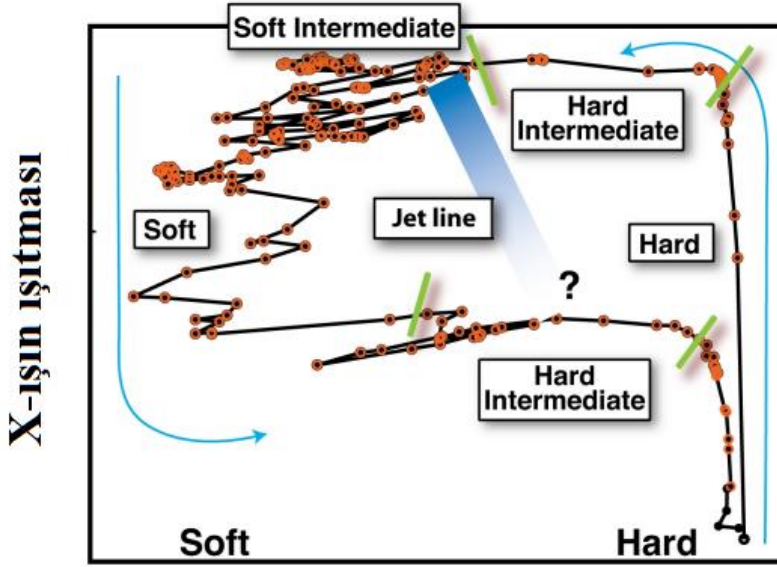


Şekil 11. Standart ince bir yığılma diskinden gelen tipik termal ışınmanın gösterimi.



Şekil 12. Farklı büyüme oranlarında karadelik çift sistemlerinde tipik X-ışın tayfları (sol) ve sol paneldeki tayflara karşılık gelen olası yığılma geometrileri (sağ) (Şekiller Done (2010) çalışmasında alınmıştır).

Bilinen kara delik X-ışını çift sistemlerinin çoğu geçici kaynaklardır. Genellikle zamanlarının çoğunu sessiz durumda düşük akı seviyesinde geçirirler. XRB'ler ara sıra, uzun bir durgunluk durumundan sonra, genellikle hidrojen iyonizasyon kararsızlığı tarafından tetiklenmiş gibi görünen bir patlamaya maruz kalır. XRB'lerin spektral ve zamanlama özelliklerine dayanarak, bir patlama sırasında birkaç spektral durum tanımlanabilir. Tipik bir patlama genellikle, X-ışını spektrumunun $1,5 \leq \Gamma \leq 2,0$ foton indeksine sahip bir güç yasası bileşeni tarafından baskın olan düşük/sert (LH) durumda başlar. Pik ışınım ve ilk bozunma aşamasında ise X-ışını yayılımını bir termal bileşenin ve foton indeksi $\Gamma \geq 2,0$ olan zayıf bir güç-yası kanunu uzantısının (tail) hâkim olduğu yüksek/yumuşak (HS) duruma gireceklerdir. X-ışını parlaklığının azalmasıyla kaynak LH'lere geri dönecektir. Ara durum (Intermediate state), genellikle LH'ler ve HS'ler arasındaki geçişe karşılık gelir. Bu durumda güç yasası ve termal bileşen karşılaştırılabilir öneme sahip olup, X-ışını yayılımının fiziksel kökeni karmaşık ve belirsizdir (Belloni 2010). Tüm durumları gösteren sertlik/yoğunluk diyagramı (Hardness-intensity diagram, HID) Şekil 13' de verilmektedir. Burada tayfsal durumun X-ışın ışıltmasına göre değişimi 'q' şekline benzetilir ya da "kaplumbağa başı" ("turtle head") olarak da anılır, "q"nun dört kenarına karşılık gelen dört farklı durum tanımlanabilir.



tayfsal sertlik

Şekil 13. Kara delik X-ışını çift sistemi için bir sertlik yoğunluk diyagramında "q" şeklindeki eğrinin şematik gösterimi (Şekil Kylafis vd. (2012) çalışmasında alınmıştır).

1.4. Aşırı Parlak X-ışın Kaynakları (Ultraluminous X-ray Sources, ULX)

Bazı X-ışın çiftleri normal (Galaktik) kaynaklara göre oldukça yüksek ($10^{39} - 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ kadar) X-ışın ışımasına (L_X) sahiptirler. Bu tür kaynaklar aşırı parlak X-ışın kaynakları (Ultraluminous X-ray sources, ULX) olarak sınıflandırılır (Kaaret 2017; Fabrika 2021). ULX'ler $> 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ enerjilerde X-ışın ışıması ile, barınak gökadamının merkezinde bulunmayan nokta benzeri kaynaklardır. Şimdiye kadar Gökadamızda tanımlanmış çok açık bir somut örneği bulunmamaktadır. Ancak, Galaktik kaynak olan Swift J0243.6+6124, nötron yıldızı içeren bir ULX olarak önerilmektedir (Beri vd., 2021). ULX'ler ilk olarak 1980'lerde *Einstein Gözlemevi* tarafından keşfedildi. *ROSAT* gibi görece daha iyi uzaysal çözünürlüğe sahip ve X-ışın tayfsal verilere sahip bir gözlemevinin verileri ile daha iyi anlaşılmaya başlandı. Son zamanlarda, yeni nesil *Chandra* ve *XMM-Newton* gibi gözlemevleri, bu kaynakların tayfsal ve zamansal özellikleri ve özellikle doğaları hakkında daha da fazla bilgi sahibi olmamızı sağlamıştır. 2014'e kadar olan süreçte, bu sistemlerin daha çok orta kütleli karadelik olduğu üzerinde durulmuştu. 2014'ten bu yana bu sistemlerin bazılarında tıkız cisminin bir nötron yıldızı olduğu keşfedilmiş ve halen yapıları ve doğaları hakkında ayrıntılı araştırmalar sürdürülmektedir.

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 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 neden olan gökcisimleridir.

ULX'lerin doğasının daha iyi anlaşılması için, X-ışın astronomisinde çok çalışılan XRB'lerin fiziksel mekanizmalarının da iyi anlaşılması gerekir. X-ışın çiftleri, evrimleşmiş bir çift sistemin son aşamalarında oluşur. Kısaca, yıldızlar anakoldan ayrılarak kırmızı ve süper devlere dönüşür. Bu aşamada, yarıçapları ilk hallerinden yüzlerce kat daha büyük hale gelir. Başlangıç kütleleri $>8 M_{\odot}$ olan yıldızların, bu aşamanın sonunda çok büyük bir süpernova ile yaşamları sona erer ve geride bir nötron yıldızı ($1,4 M_{\odot}$) veya yıldız kütleli bir karadelik ($\sim 15 M_{\odot}$) oluşur. Çok büyük kütleli yıldızların çok yüksek sıcaklıkları ve çekirdeklerindeki basınç nedeniyle ömürleri oldukça kısadır. Örneğin, $20 M_{\odot}$ kütleli bir yıldız 10 Milyon yıldan (My) daha kısa bir süre içinde yukarıda bahsedilen süreçten geçer. Bir XRB, sistemini oluşturan yıldızlardan birinin kütleli en az $8 M_{\odot}$ olması durumunda, kütleli daha büyük olan yıldız önce evrimini tamamlar ve bir nötron yıldızı veya yıldız kütleli karadeliğe dönüşecektir. Çift sistem, süpernova olayından sonra çok tıkHz hale gelirse, donör yıldız anakolu terk ettiğinde, genişlemiş dış katmanları Roche lobunu doldurur ve ana yıldıza kütle transferi gerçekleşir. Bu durumda, akan maddenin kütleçekim enerjisi, tıkHz yıldızın etrafında yığılma diski oluşturduğunda termal enerjiye dönüşür. Bu nedenle kütle transferi sonrası $kT \sim 10$ keV'lik sıcaklığa ulaşabilen oldukça sıcak bir ışımaya dönüşür (Tauris ve van den Heuvel, 2006). Kütle alan tıkHz nesnenin kütleli M , yarıçapı R ve kütle transfer oranı \dot{M} olmak üzere bu ışımayı (L) Denklem 1.6'deki gibi tanımlayabiliriz.

$$L = \frac{GM}{R} \dot{M} \sim 0,1 \dot{M} c^2 \quad (1.6)$$

Burada, G ve c sırasıyla kütleçekimsel sabit ve ışık hızıdır. Bununla birlikte, bu ışımanın bir sınırı vardır, çünkü ışınma basıncı çok yükseldiğinde, nesnelere parlaklığını söndürerek yığılma diskini patlatacaktır. Bu, *Eddington Sınırı* (L_{Edd}) olarak bilinir ve Denklem 1.7 ve Denklem 1.8'deki gibi ifade edilir:

$$\sigma_p \frac{L}{4\pi R^2} \leq \frac{GMm_p}{R^2} \quad (1.7)$$

$$L_{Edd} \approx \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_p} M = 1,26 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1} \quad (1.8)$$

Burada, σ_p , proton kesiti ($\approx 6,65 \times 10^{-29} \text{ m}^2$) ve m_p proton kütesidir. Çoğu X-ışın çift sistemlerin ışıması $L_X = (10^{34} - 10^{38}) \text{ erg s}^{-1}$ aralığında olduğu için *Eddington* sınırı kriterine uymaktadır (Tauris ve van den Heuvel, 2006). Galaksi-ötesi (Samanyolu dışında) yüksek kütleli X-ışın popülasyonları, yıldız oluşum gökadalalarında ışıması $10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ enerjisine kadar ulaşırken ve düşük kütleli X-ışın çiftlerinde bu ısıtma genelde $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ civarındadır (Wegner vd., 2000; Kim ve Fabbiano, 2004; Swartz vd., 2011). Bu ısıtma aralıklarından dolayı, ULX sistemlerinde *Eddington* sınırı genellikle $L_{Edd} \cong 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ olarak belirlenmiştir (Kaaret vd., 2017).

Galaksi-ötesi X-ışın çiftlerin doğasını anlamak için Galaktik X-ışın çiftlerin özelliklerinin iyi bilinmesi gerekiyor. Bizden çok uzaktan bulunan bu kaynakları ancak Gökadamızda bulunan X-ışın çiftleri ile karşılaştırarak daha iyi anlayabiliriz. Galaktik karadelik çiftleri iyi bilinen bir *sub-Eddington* ışıması yapan yani X-ışın ışıması $L_x \leq 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ olan X-ışın çiftleridir. Bu tür kaynaklar daha çok Galaktik disk etrafında bulunur (Remillard ve McClintock, 2006). Galaktik karadelik çiftlerin X-ışın enerji tayfları genelde iki tür modelle temsil edilebilir. Bu model literatürde *DISKBB* ya da *MCD* olarak bilinir. İkinci model ise; Foton indeksi (Γ) $1,4 < \Gamma < 2,1$ aralığında olan ve 30 keV ile 100 keV enerji aralığında bir düşme gösteren diskin etrafındaki optik olarak kalın korona bölgesindeki elektronların Komptonize olmasıyla oluşan bir ışıma olup *güç-yasası* modeli ile temsil edilir.

Genellikle, Galaktik karadelik X-ışın çiftlerinde, termal durumda *DISKBB*, *güç-yasası* modeline göre baskın olduğunda ise sert (hard) durumdadır. Bu baskınlık kavramı, ilgili bileşenin daha yüksek ışıtmaya sahip olduğu anlamını taşır. Bazı geçici (transient, transit) Galaktik karadelik çiftleri, zamanlarının çoğunu düşük parlaklıkta ve sert durumda geçirir. Ancak birkaç ay sürebilen patlamalarda termal duruma geçiş yaparken; genel olarak termal durum, sert durumdan daha parlak olsa da çok sert olmadan birinden diğerine geçiş (bkz. Şekil 13) yapabilirler (Remillard ve McClintock, 2006).

Sert durumda, yığılma diskinin iç kenarında devam eden kararsızlıklar olarak yorumlanan, yüksek frekanslı yarı periyodik salınımları (QPO'lar) gösteren tıkız radyo karşılıklar vardır (Remillard ve McClintock, 2006; Kaaret vd., 2017). Radyo ışımalarının, mikro kuazar adı verilen ve AGN'lerin çekirdeğinde oluşan kuazara benzeyen, çok daha kısa evrimsel zaman ölçekleriyle olsa da göreceli parçacıkların veya jetlerin akışlarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Romero vd., 2017). Galaktik karadelik çiftleri ile ULX'ler arasında doğrudan bir ilişki olduğu, birçok özelliği paylaştığı, ancak aynı zamanda birbirinden farklı özelliklere (örn. disk sıcaklıkları, enerji tayfları vb.) sahip olduğu bilinmektedir.

1.5. Bu Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

ULX'ler 1980'lerde keşfedilmesine rağmen günümüzde doğası tam olarak anlaşılmış kaynaklar değildir. Keşiflerinden itibaren çok sayıda X-ışın gözlemevleri inşa edilmiş ve ULX katalogları oluşturulmuştur (bkz. Tablo 1). ULX'lerin X-ışın dışında optik dalgaboyu aralığında çalışılması da başta X-ışın çiftlerinin doğası olmak üzere tıkız nesnelere kütlelerinin tahmin edilmesinde oldukça etkilidir. Bunun için *HST* (*Hubble Space Telescope*) görüntüleri ile iyi çözünürlüklü X-ışın görüntülerin karşılaştırılmasına dayanan hassas astrometrik hesaplamalar ile ULX'lerin optik karşılıkları çalışılmaya başlanmıştır. Bu gözlem ve kaynak istatistikleriyle az da olsa, aşırı parlak X-ışın çiftlerinin bazı özellikleri anlaşılmaya başlanmıştır.

Ancak, yeni nesil X-ışın gözlem uydularının artmasıyla ULX ve ULX aday kaynaklarının sayısının artmasına rağmen temel özellikleri bilinen az sayıda ULX vardır. Ayrıca, optik karşılığı belirlenmiş ULX sayısı da oldukça azdır. Bu çalışmada, seçilen ULX'lerin doğasını ve X-ışın-optik yayılım mekanizmalarını incelemek için bu kaynakların X-ışın, optik ve kızılöte bantlarında farklı X-ışın teleskoplarının verileri kullanılarak analizleri hedeflenmiştir. Seçilen kaynaklar için amaçlanan analizler:

- a. X-ışın tayfsal verilerine en iyi uyum veren modeller kullanılarak sistemlerin tıkız nesnelere kütleleri, disk yarıçapları, disk sıcaklığı gibi parametrelerin hesaplanması ve değerlendirilmesi

- b. ULX'lerin optik bandındaki özelliklerini araştırmak için hassas astrometri hesaplamaları ile optik karşılıklarını belirlemek
- c. Optik karşılıkların, fotometrik analiz sonuçlarından, enerji dağılımları elde edilerek optik ışımalarının doğası hakkında bilgi edinmek
- d. ULX'lerin X-ışın-optik verilerinin tayfsal ve zamansal özelliklerini inceleyerek yüksek enerjilerde kaynağın karakteristik özelliklerini ortaya çıkarmak

Bu tez çalışması kapsamında, daha önce Swartz vd., (2011) tarafından kataloglanan, M51 gökadasında bulunan geçici ULX olan ULX-4 kaynağı ve NGC 1316'da bulunan ULX X-7 bu çalışma için hedef kaynaklar olarak seçilmiştir. Bu iki kaynağın seçilme nedenleri aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

ULX-4'ün seçilme nedenleri:

1. Daha önce kullanılmayan arşivlenmiş X-ışın gözlemlerini olması
2. Uzun dönem yüksek akı değişkenliği gösteren geçici ULX olması
3. Önceki çalışmalarda, uzaysal özünürlüğü, *Chandra*'dan görece daha düşük olan *XMM-Newton* ve *Swift-XRT* dedektörlerinde ULX-4'ün yakınında bulunan X-ışın kaynaklarının katkısının göz ardı edilmesi
4. *HST* gözlemleri kullanılarak, henüz herhangi bir optik karşılığının tanımlanmamış olması ve dolayısıyla ULX-4'ün optik ışıma özelliklerinin araştırılmamış olması
5. Uzun dönem X-ışın bandında yüksek akı değişkenliği gösteren ULX-4'ün, bir yıla yakın *HST*-optik verilerinin kullanılmasıyla uzun dönem değişiminin araştırılmamış olması

ULX X-7'nin seçilme nedenleri:

2020 yılı öncesine kadar sadece X-ışın çifti olarak tanımlanan ULX X-7'nin yayımlanan en son *Chandra* verileriyle araştırılacak olması, bölgedeki bazı kaynakların X-ışın zamansal analizleri yapılarak yeni ULX araştırılması ve *HST* optik ve yakın kızılöte verilerinin analizleri ile optik karşılığının ilk kez araştırılacak olmasıdır.

İKİNCİ BÖLÜM

KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Aşırı Parlak X-ışın Kaynakları (ULX)

Aşırı parlak X-ışın kaynakları (ULX), barınak (host) gökadanın merkezinde olmayan ayrı kaynaklardır. ULX'lerin X-ışını ışıtmaları (L_X), kütlesi $\sim 10 M_\odot$ olan bir kara delik için 0,3-10 keV aralığında $L_X > 10^{39}$ erg s⁻¹ olup Eddington sınırını aşan parlaklığa sahip kaynaklardır (Kaaret vd., 2017; Fabrika vd., 2021).

Gökadaların X-ışını gözlemleri, yüksek X-ışını parlaklıklarına sahip olan ancak gökadanın merkeziyle çakışmayan yeni bir kaynak popülasyonu olan ULX'leri ortaya çıkarmıştır. ULX'lerin aşırı parlaklıklarının kaynağının, iki olası karadeliik sınıfından biri tarafından güçlendirildiğini öneren durumlar bulunmaktadır. Bu olası durumlardan biri, eğer bir ULX, orta kütleli bir karadeliik (IMBH) ($10^2 M_\odot < M_{\text{tıkız}} < 10^4 M_\odot$) barındırıyorsa, yüksek ışıtması bu tip karadeliiklere *Eddington-sınırının* altında (*sub-Eddington*) bir yığılma (accretion) ile açıklanabilir (Colbert ve Mushotzky, 1999, Farrell vd., 2009; Mezcua vd., 2015). Karadeliik X-ışın çiftleri bu mekanizmaya örnek olarak verilebilir. Diğer bir olasılık ise, bir ULX, yıldız kütleli bir (SMBH) barındırıyorsa, yüksek parlaklık bu tip karadeliiklere, *Eddington-sınırının* üstünde (super-Eddington) bir yığılma ile üretilebilir (Poutanen vd., 2013; Sutton, Roberts ve Middleton, 2013; Motch vd., 2014; Fabrika vd., 2015).

ULX'ler ilk kez 1980'lerde *Einstein gözlemevi* tarafından keşfedildi. Ancak bu kaynakların sınıflandırılması kısa bir zamanda gerçekleşemedi. Kaynakların uzun süreli gözleminin mümkün olamaması, sürekli yüksek ışıtmaya yayan yani tıkız nesnelere üzerine yığılma sonrası güçlü ışıtmaya sahip kaynaklar ile genç süpernova gibi geçici yüksek ışıtmalar arasında ayırım yapılamıyordu. Keşfedildikten yıllar sonra, *ROSAT* ve *ASCA* gibi X-ışın gözlemevlerinin verileri ile, gökbilimciler bazı ULX'ler hakkında bilgi sahibi olmayı başardılar. Gözlemsel verilerin artması ile, bu tür kaynakların genç süpernovalar olamayacağı anlaşıldı. Ancak, bu ilginç kaynakların doğası hakkında soru işaretleri giderilmedi. Bu aşırı parlak kaynaklar için, yıldız kütleli karadeliiklere süper-Eddington oranında kütle yığılması, orta kütleli karadeliiklere (100–200 M_\odot) ise *sub-Eddington* oranında kütle aktarması gibi en olası senaryolar tartışılmıştır (Komossa ve Schulz 1998; Okada vd., 1998).

Einstein gözlemevi veri kalitesi ve uzaysal çözünürlük açısından oldukça sınırlı özelliklere sahipti. *ROSAT* ve *ASCA*'nın gözlem verileri ile belirlenen ULX sayısı artmaya başladı. Böylece, gözlenen ULX kaynakları için kataloglar oluşturuldu (Colbert ve Mushotzky, 1999; Roberts ve Warwick, 2000; Colbert ve Ptak, 2002, Liu, 2005). Katalogların yayınlanmasıyla, ULX'ler X-ışın astronomisinde oldukça ilgi çeken kaynaklar olup aktif çalışma konuları arasına girmiştir.

ULX'lerin ayrıntılı çalışmaları, yeni nesil X-ışın uyduları *Chandra*, *XMM-Newton*, *Suzaku* ve *Swift* verileriyle mümkün hale geldi. Bu uyduların sağladıkları yüksek kaliteli veri istatistikleri ile keşfedilen ya da yeniden tanımlanan ULX kaynaklarının sayısında artış gerçekleşmiştir. Bu kataloglarda bulunan ULX adaylarının sayısı, kaç gökadadan gözlemlendiği ve hangi X-ışın uydusunun gözlemlerinden algılandığı Tablo 1' de özetlenmiştir. Bu gözlemler sonucu yeteri kadar foton sayısına sahip ULX'lerin doğası hakkında belirgin özellikler ortaya çıkarılmıştır.

Kaynak yoğunluğunun fazla olduğu veya uzaysal olarak karmaşık alanlarda bulunan daha fazla sayıda ULX, *Chandra* X-ışın gözlemevinin yüksek uzaysal çözünürlüğü sayesinde ayırt edilebilmektedir. Ayrıca, yüksek hassasiyetli CCD kameralarından ULX'lerin veri kalitesi yüksek X-ışın tayfları elde edilebildiğinden, bu kaynakların ışıma mekanizmaları hakkında bilgi sahibi olmamız olanaklı olmaktadır. Günümüzde, hassas ve kaliteli veri üreten X-ışın gözlemevlerinin artmasıyla, bu gizemli kaynaklar için önerilen fiziksel modeller ve senaryolar çeşitlenmektedir.

ULX çalışmalarının başlangıcında, kanıtlar orta kütleli karadelik içeren ULX'leri işaret ediyordu. Özellikle, orta kalitede ULX X-ışın tayflarının, Galaktik karadelik çiftlerine benzer şekilde, *diskbb* ve *güç-yasası* gibi iki bileşenli modellerle iyi uyumlandığı belirtilmiştir (Miller vd., 2003). Ancak, ULX tayflarının disk sıcaklıkları, Galaktik karadelik X-ışın çiftlerin disk sıcaklıklarından çok daha düşük ($\sim 0,2$ keV) olduğu bulunmuştur (Miller vd., 2004). ULX tayflarının doğrudan Galaktik karadelik X-ışın çiftlerin tayflarına benzer olduğunu varsayıldığında, disk bileşeni ULX'lerin yığılma diskin en iç bölgesinin sıcaklığını gösterir. Standart yığılma disk modeline göre, disk sıcaklığı Denklem 2.1'e göre tanımlanmıştır (Shakura ve Sunyaev, 1973):

$$kT \approx (M_{\text{tıkız}}/M_{\odot})^{-(3/4)}(L/L_{Ed})^{1/4} \text{ keV} \quad (2.1)$$

Tablo 1

ULX adaylarını içeren bazı kataloglar

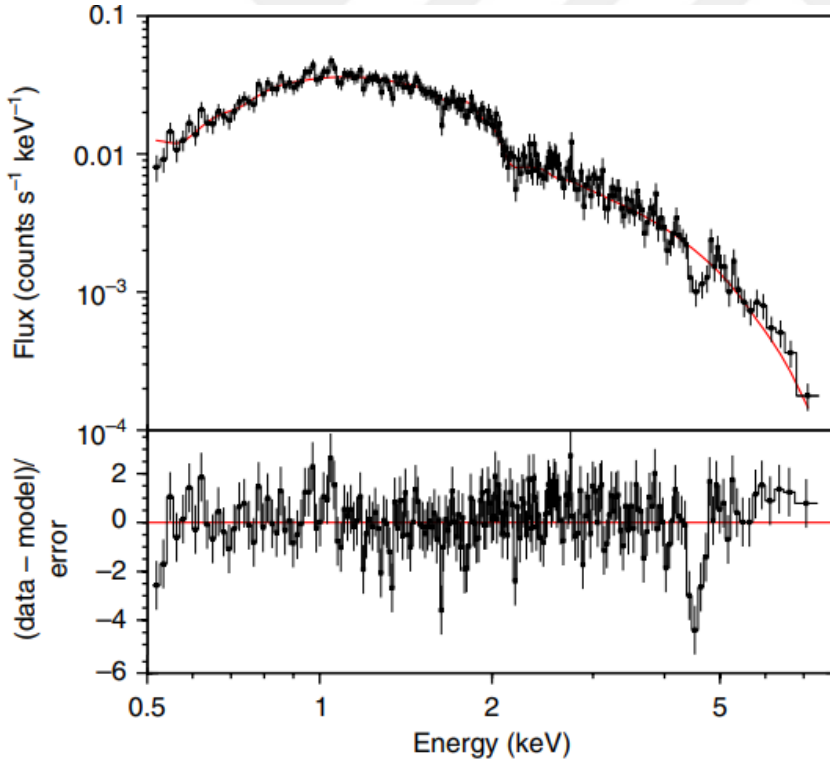
Kaynaklar	ULX aday sayısı	Gökada sayısı	Gözlemevi
Colbert ve Ptak, 2002	87	54	<i>ROSAT ve Chandra</i>
Swartz vd., 2004	155	84	Chandra
Liu ve Bregman, 2005	106	313	<i>ROSAT</i>
Swartz vd., 2011	107	127	<i>Chandra</i>
Walton vd., 2011	470	238	<i>XMM-Newton</i>
Earnshaw vd., 2019	384	451	<i>XMM-Newton</i>
Soria vd., 2022	80	75	<i>Chandra</i>
Walton vd., 2022	689	951	<i>XMM-Newton, Swift ve Chandra</i>
Bernadich vd., 2022	779	204733	<i>XMM-Newton ve Chandra</i>

Bu tanıma göre, aynı büyüme hızında etrafına kütle toplayan daha büyük kütleli nesnelere için disk sıcaklığının daha düşük olması gerektiği anlamına gelir. Bu düşük disk sıcaklıklardan, tıkız cismin kütlesi $\sim 1000 M_{\odot}$ olduğu hesaplandı ve bu da ULX'lerin orta kütleli karadelik barındırdığı sonucu çıkarıldı.

Teorik çalışmalar, ULX'lerin iki farklı modelle yaydıkları yüksek enerjinin açıklanabileceğini önermektedir. İnce disk geometrisi kullanarak dışarı akan bir rüzgârın fırlatılması (Poutanen vd., 2007) bu modellerden birincisidir. İnce disk modelinde, disk içindeki ışımaya basıncı desteği nedeniyle, H (disk yüksekliği) / R (disk yarıçapı) oranı yaklaşık olarak 1'e yükseltilir. Diskin iç kısmından yüzeyine foton difüzyon süresinin toplanma süresinden daha büyük olduğu durumda diskte adveksiyon (advection) hâkim hale gelir. Böylece fotonlar diskten dışarı çıkmadan önce tıkız nesneye doğru yönlendirilir (Abramowicz vd., 1988). Bu, standart disk durumunda radyal sıcaklık profilinin $T(R) \propto R^{-3/4}$ den ince disk modeline $T(R) \propto R^{-1/2}$ ye dönüşümüne neden olur.

Gözlemsel veriler, ULX popülasyonlarının gökadalardaki yıldız oluşum bölgeleri ile ilişkili olduğunu göstermiştir (Gao vd., 2003). King (2004), Cartwheel gökadasında bulunan tüm ULX'ler orta kütleli karadelikler içeriyorsa, yıldız kümelerinde görünmesi için çok büyük bir kütleyle sahip olmaları gerektiğini göstermiştir. Bu, *süper-Eddington* yığılma oranında madde biriktiren tipik $\geq 10 M_{\odot}$ yıldız kütleli karadelikle tutarlıydı. Orta kütleli karadelikler varsayımında başka bir tutarsızlık, yakın gökadalarda ($\leq 10 Mpc$) tespit edilen nokta benzeri X-ışın kaynaklarının X-ışın parlaklık fonksiyonu (XLF) grafiği $\sim 2 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$ de kırılma görülmesidir (Grimm vd., 2003; Swartz vd., 2004, 2011; Mineo vd., 2012). $100 M_{\odot}$ kütleli bir karadelik için kırılma değerinde ısıtma *Eddington* ısıtmasına karşılık gelir.

Ayrıca, Şekil 14'de görüldüğü gibi, 2 keV' da enerji tayfı aşağı doğru yönelmiştir. Bu profil 2 keV'de dönme ya da sert eğrilik bileşeni olarak adlandırılır.



Şekil 14. 0,5-8 keV bandında M51 ULX-8 *Chandra* enerji tayfı (Şekil Brightman vd. (2018) çalışmasında alınmıştır).

Aslında, ULX tayflarında tespit edilen sert eğrilik, karadelik X-ışın çiftlerinin tipik yığılma durumlarının davranışından farklıdır. Aslında, bu eğriliğin, ULX'lerin farklı bir tayfsal durumu işaret ettiğini belirten çalışmalar bulunmaktadır. Gladstone vd. (2009) bunu aşırı parlak durum (ultraluminous state) olarak tanımladı ve *sub-Eddington* durumlardan farklı olarak, ULX'lerin *süper-Eddington* yığılma oranında yıldız kütleli karadeliklere madde aktarıldığını belirtti. ULX'ler ile ilgili son çalışmalar bu sonucu desteklemektedir (Middleton vd., 2013; Liu vd., 2013; Walton vd., 2018; Sathyaprakash vd., 2019; Rodríguez Castillo vd., 2020). NGC 7793' teki bir yıldız kütleli karadeliğin, *süper-Eddington* oranında yığılma yaptığı aşırı parlak durum özelliklerini sergilediği belirtilmektedir (Motch vd., 2014).

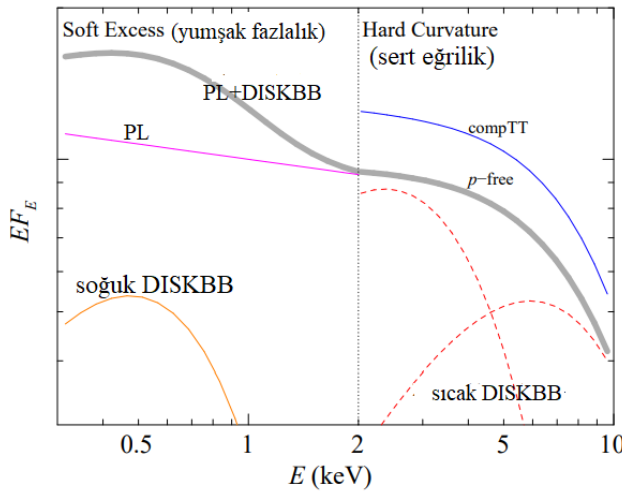
Bachetti vd. (2014), yakın zamanda M82'de parlak bir ULX'in yalnızca bir nötron yıldızından gelebilecek atımlar (pulsar) sergilediğini gösterdiler. Bu keşif, tıkHz cisim olarak nötron yıldızı üzerine süper-Eddington yığılma ile açıklanabileceğini ancak manyetik alanın çok yüksek olması gerektiğini ortaya çıkardı. Altı yeni ULX'de de pulsarların keşfi, her birinin *Eddington* limitinin neredeyse yüz katını aşan L_X ışımasına sahip, tıkHz nesnenin nötron yıldızı olduğu sistemlerde yığılmanın *süper-Eddington* yığılma oranında gerçekleştiğinin açık bir kanıtıdır (Bachetti vd., 2014; Israel vd., 2017; Fürst vd., 2016; Carpano vd., 2018, Sathyaprakash vd., 2019; Rodríguez Castillo vd., 2020). Ayrıca, Brightman vd. (2018), M51 gökadasında bulunan ULX-8'in bir siklotron rezonans saçılma (cyclotron resonance scattering) özelliğine sahip olduğunu keşfetti. Bu özellik, yüklü parçacıkların güçlü bir manyetik alanla etkileşimlerinden kaynaklandığını, bu nedenle ULX-8 sisteminin bir nötron yıldızı barındırdığını önermektedir.

Son yıllarda ULX'ler için temel sorular genellikle hangi ULX sistemlerinin nötron yıldızı barındırdığı ve olası güçlü manyetik alan değerine sahip olduğunda *süper-Eddington* yığılmayı nasıl gerçekleştirebildiklerini belirleme konularında yoğunlaşmaktadır. ULX'lerin nötron yıldızı barındırdığı bazı sistemler, bu konuda dikkate değer bazı kanıt ya da ipuçları sunmaktadır. Pulsasyon, siklotron rezonans saçılması ve pervane etkisi (*propeller effect*) gibi özellikler, ULX sistemlerinde bir nötron yıldızı barındırılabilirliğini gösterebilir (Brightman vd., 2018; Earnshaw vd., 2018; Son vd., 2020). Bunlardan pervane etkisi, pulsar benzeri sinyallerin belirlenemediği durumda bir gösterge olabilir. Nötron yıldızının manyetik alan yarıçapından dolayı yığılma durdurabilir bu da akının oldukça hızlı bir düşüşe uğramasını

sağlar ve nötron yıldızın manyetik alan yarıçapı küçüldüğünde yığılma devam eder yüksek akı durumuna geçer. Bu konu ile ilgili detaylı açıklama Bölüm 2.3’de verilmiştir.

2.2. ULX’lerin X-ışın Enerji Tayfları

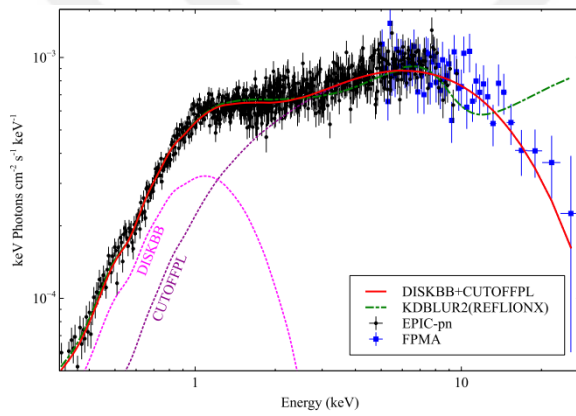
0,3-10 keV enerji bandındaki normal bir ULX’in X-ışın tayf özellikleri Şekil 15’de verilmiştir. Genel olarak, tayflar düşük enerjilerdeki yüksek akı (soft excess) ve yüksek enerjilerdeki düşük akı olmak üzere iki bileşenden oluşur (Feng ve Soria, 2011). Tayfları açıklamak için çeşitli modeller kullanılabilir, bu da ULX’lerin doğasının farklı yorumlanmasına yol açar.



Şekil 15. 0,3-10 keV’ da genel bir ULX’in enerji tayfı (gri). 2 keV’ nin altında yumuşak bir fazlalık ve 2 keV’ nin üzerinde sert bir eğrilik olduğu görülmektedir (Şekiller Feng ve Soria (2011) çalışmasında alınmıştır).

Düşük ve orta kalitede X-ışın tayfları için iki bileşenli: *güç-yasası*+*DISKBB* modeli, ULX’lerin tayflarını temsil etmek için kullanılabilir. Burada, ikinci bileşen, çok renkli bir disk karacisim modelinin (*DISKBB*) uygulamasıdır (Mitsuda vd., 1984). *DISKBB*, kaynağın düşük enerjilerindeki durumu tanımlarken *güç-yasası* yüksek enerjilerde azalma eğilimini temsil eder. Miller vd. (2003) çalışmalarında görüleceği üzere; bu yaklaşım soğuk bir disk sıcaklığına yol açtığından ULX’lerin orta kütleli karadelikler içerebileceği yaklaşımını açıklamaktadır.

Bununla birlikte, yüksek kalitede tayflara odaklandığında, yüksek enerjilerde belirgin bir eğrilik (ya da sert düşüş) gözlenmiştir (Stobbart vd., 2006; Gladstone vd., 2009). Bu eğrilik, yakın zamanda, 10 keV' nin üzerine çıktığını gösteren geniş bant *NuSTAR* gözlemleriyle doğrulanmıştır (Bachetti vd., 2013; Walton vd., 2014). Şekil 16'da yüksek enerji bölgesinde eğriliklerinin 30 keV'de tam bir eğrilik (ya da kesilme) görülmektedir. Bu nedenle, yüksek ve düşük enerjili tayfsal bileşenlerin *XSPEC*' de *DISKBB*, *DISKPB* + *compTT* modelleri gibi termal modellerle iyi bir şekilde temsil edilebileceği gösterilmiştir (bkz. Şekil 15). İnce disk modeli (*DISKPB*) veya sıcak, kalın *Comptonization* modeli (*compTT*) sert eğrilik için uygun modellerdir.



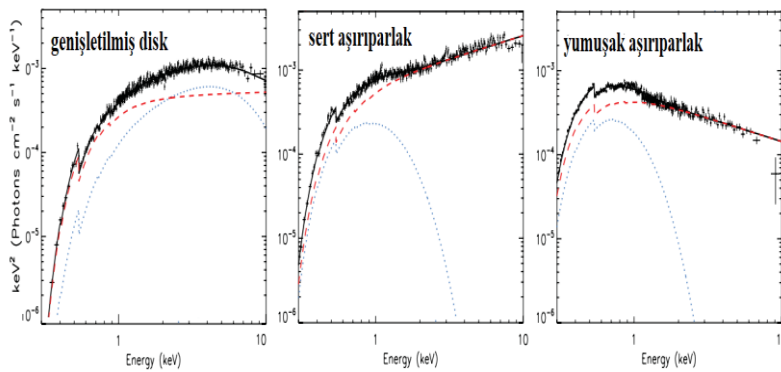
Şekil 16. *XMM-Newton* (siyah) ve *NuSTAR* (mavi) tarafından eşzamanlı olarak gözlemlenen NGC 1313 X-1'in enerji tayfi (Şekil Bachetti vd. (2013) çalışmasında alınmıştır).

Diskin en iç bölgelerini örtecek kadar soğuk ve optik olarak kalın bir korona olduğunda, standart bir disk modeli (örn. *DISKBB*) ile uyumlu, yığılma diskten dış bölgesinden gelen yumuşak ışınımı tanımlamak için *compTT* modeli kullanılmıştır. (Gladstone vd., 2009; Vierdayanti vd., 2010; Pintore ve Zampieri, 2012). Bununla birlikte, birçok çalışma alternatif bir yorum sunmaktadır. Örneğin, sert tayfsal bileşen diskten en iç bölümlerinden gelebilir (Middleton vd., 2011; Kajava vd., 2012).

Öte yandan, düşük enerjilerdeki yüksek akı, optik olarak kalın diskten gelen güçlü yıldız rüzgârlarıyla açıklanabilir (Middleton vd., 2014). Kajava ve Poutanen (2009) çalışmasında, 11 ULX'in *XMM-Newton* ve *Chandra* arşiv verileri kullanılarak tayfsal değişkenlikleri incelenmiştir. Gözlenen tayfları tanımlamak için *güç-yasası*, *DISKBB* ve bu iki modelin bir kombinasyonu olan *güç-yasası* + *DISKBB* kullanılmıştır. Yedi ULX için L_X

ile foton indisi, Γ arasında bir ilişki olduğunu vurgulanmıştır. Bu kaynaklar, bilinen karadelik X-ışın çiftleri ile karşılaştırılmış ve ısıtma-sıcaklık diyagramlarında benzer yollar izlediklerini belirtmişlerdir. Ancak, kaynaklarının çoğunun $L_{soft} \propto T^4$ diskinin beklenen standart yığılma diski bağıntısı yerine, *DISKBB* modelinden çıkarılan yumuşak tayfsal bileşenin sıcaklığı, $L_{soft} \propto T^{-3,5}$ gibi yumuşak bileşen parlaklığı ile ilgili olduğu gösterilmiştir.

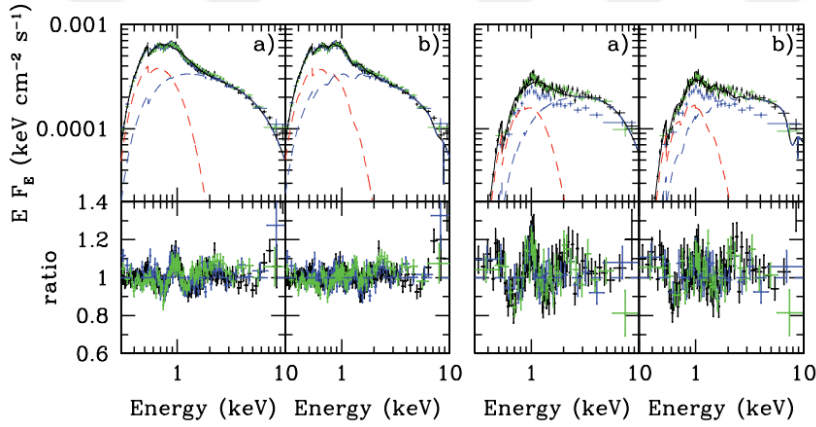
Sutton vd. (2013), ULX'lerin X-ışın enerji tayfları için üç farklı sınıf belirlemiştir: (1) genişletilmiş disk, (2) sert aşırı parlak (sert bileşen ağırlıklı tayf) ve (3) yumuşak aşırı parlak (yumuşak bileşen ağırlıklı tayf). Bu sınıflara ait enerji tayfları Şekil 17'de gösterilmiştir. Buna göre, daha düşük X-ışın ısıtmasına ($<3 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$) sahip ULX'ler, yıldız kütleli karadeliklerin yaklaşık *Eddington* oranında kütle toplayacağı durumlarda, tayflar genişletilmiş disk modeli ile temsil edilebilir. Bu tayflar, tek bir disk bileşenli model yerine çift bileşenli bir model gerektirir. Yüksek düzeyde değişkenliğin, yumuşak aşırı parlak tayflara sahip ULX'ler ve birkaç genişletilmiş disk kaynağı ile sınırlı olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, bu kaynaklardaki değişkenlik yüksek enerjilerde en güçlü olduğunu, bu da iki tayfsal bileşenden daha sert olan bileşenden kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Bu özelliklerin, güçlü bir rüzgarla yığılmanın merkezi bölgeleri etrafında huni benzeri bir geometri oluşturduğu mevcut *süper-Eddington* ışınım modelleriyle tutarlı olduğunu savunmuşlardır.



Şekil 17. Üç tayfsal tipin her birini sergileyen farklı ULX'lerin gözlemlerinden örnek tayflar (*güç-yasası*+*DISKBB*). Soldan sağa: genişletilmiş disk- NGC 1313 X-2; sert aşırı parlak- Ho IX X-1; yumuşak aşırı parlak- NGC 5408 X-1 (Sutton vd., 2013). Mavi noktalı çizgiler *DISKBB* ve kırmızı kesikli çizgi *güç-yasası* modelindeki bileşenlerin katkıları gösterilmiştir

Ayrıca, çoğu ULX'in; *Eddington* sınırında ve üzerinde gerçekleşen yığılmaların, yıldız kütleli karadelik X-ışın çiftleri için daha olası olduğunu ve gözlenen özelliklerinin yığılma hızına ve eğimine bağlı olduğu önerilmiştir.

ULX sistemlerinde, X-ışın tayfları üzerinde Fe-K soğurma özelliklerinin baskın olduğu dışarı akan bir rüzgârın doğrudan kanıtını arama girişimleri olmuştur. Ancak, gözlem hedefinin bir sert aşırı parlak nesne olması nedeniyle böyle bir özellik tespit edilmemiştir (Walton vd., 2012; 2013). Bununla birlikte, geniş soğurma özellikleriyle modellenebilen ~ 1 keV'de görülen yumuşak aşırı parlak (1 keV'de görülen saçılma, bkz. Şekil 18) bir rüzgâr için kanıt olabileceği ileri sürülmüştür.



Şekil 18. En iyi uyum veren model ile veri üst panelde arasındaki oran alt panellerde gösterilmektedir ve 1 keV' de enerji tayı fazlalığı (yumuşak aşırı parlaklık) açıkça göstermektedir (Şekiller Middleton vd. (2014) çalışmasında alınmıştır).

2.3. Süper-Eddington Yığılma

Süper-Eddington birikimi için ilk kanıt, Büyük Macellan Bulutu'nda geçici bir X-ışın kaynağı olan A0538-66 için periyodu 69×10^{-3} s olan pulsarın keşfidir. Bu keşif kaynağın tıkız nesnesinin nötron yıldızı olabileceğinin bir kanıtıydı. A0538-66, X-ışın ışırtması $L_X \sim 8 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$, *Eddington* sınırını 4 kat aştığını gösterir. *Süper-Eddington* oranında yığılmanın en açık kanıtı, *Eddington* sınırını ~ 500 kat kadar aşan nötron yıldızları içeren ULX pulsarların keşfidir. ULX'ler oldukça yüksek ışırtmalara ulaşır ve ULX'lerin bir kısmı yıldız kütleli karadelikler barındırıyorsa, yığılmanın *süper-Eddington* oranında olması

gerekmektedir. Ayrıca, geniş optik salma çizgileri ve maviye kaymış X-ışın soğurma özellikleri de bu oranda yığılmalar için ipuçları olabilir. Yığılan kütleler için gerekli olan kinetik enerji, genellikle X-ışın ısıtması ile karşılaştırılabilir veya ondan daha büyüktür ve yığılma akışının toplam enerji salınımının büyük bir bölümünün kütle akışını sağlamak için harcadığı düşünülmektedir. Bu güçlü kütle akışları, ULX'lerde *super-Eddington* birikimi için kanıt olarak görülebilir (Kaaret vd., 2017).

Eddington limitini aşmanın ilk şartı, aşırı enerji salınımına güç sağlamak için tıkız nesneye doğru yeterli bir kütle transferinin olması gerektiğidir. Bir yığılma sisteminin bolometrik ısıtma L_{bol} , donör yıldızdan kütle aktarım hızı \dot{m} (ya da oranı) Denklem 2.2'den türetilir:

$$\dot{m} = \frac{L_{bol}}{\eta c^2} \quad 2.2$$

Burada η , yığılma akışının ışınımsal verimliliğidir. Katsayıların verimli bir şekilde dönüştürülmesi için $\eta = 0,1$ olarak alınabilir. $L_X = 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ ısıtma için $\approx 1,8 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yıl}^{-1}$ kütle aktarım hızı gereklidir. $M_{tıkız}$ kütleli bir nesne için *Eddington* ısıtması $L_{Edd} \approx 10^{38} \text{ erg s}^{-1} \times M_{tıkız}$ olarak tanımlanır ve *Eddington* sınırına ulaşmak için kütle aktarım hızı Denklem 2.3'deki gibi tanımlanabilir:

$$\dot{m}_{Edd} = 2,3 \times 10^{-8} M_{tıkız} M_{\odot} \text{ yıl}^{-1} \quad 2.3$$

Bu nedenle, $10M_{\odot}$ kütleli bir karadelik, *Eddington* sınırını aşmak için $2,3 \times 10^{-8} M_{\odot} \text{ yıl}^{-1}$ 'den fazla bir ortalama yığılma hızı gerektirir. Bu, genel olarak Galaktik sistemlerdeki kütle aktarım hızlarından çok daha fazladır. Bu kadar yüksek bir kütle aktarım hızının nedenlerden biri, HMXB'lerin termal-zaman ölçeğinde (EM'nin, yıldızın en iç bölgesinden yüzeyine ulaşması için geçen süre) kütle transferi olduğu düşünülmektedir. Bu, tıkız bir nesne içeren XRB'lerin büyük kütleli donör yıldızın Roche lobunu doldurduğunda meydana gelir. Ayrıca, karadelik içeren XRB'lerde de yığılma hızı $\sim 1000 \dot{m}_{Edd}$ kadar olduğu bulunmuştur.

Yıldızın yüzey ışıması ve potansiyel olarak yüksek manyetik alanı, birikim sürecini güçlü bir şekilde etkileyebileceğinden, nötron yıldızı üzerine yığılmalar karmaşık bir durum

olabilir. Bu çalışmada, sonraki bölümlerde de anlatılacağı M82’de bir ULX sisteminde nötron yıldızının keşfi, *Eddington* limitinin yaklaşık 100 katı kadar bir yığılma oranına sahip olmasını gerektirir. Bunu açıklamak için, ısıtma ve pulsar frekansının türevi üzerinden modeller geliştirilmiştir. Genellikle büyük yarıçaplardaki yığılmanın standart bir yığılma diski aracılığıyla olacağı varsayılır. Bu konu ile ilgili detaylar Bölüm 2.4’de verilmiştir.

Güçlü manyetik alanlar yığılmayı nötron yıldızına yönlendirilir ve nötron yıldızı yüzeyinin yakınında kütle akışı bir sütun veya huninin geometrisi oluşturur (bkz. Şekil 20). Işıma, akışa dik olan huninin kenarlarından kaçabileceğinden, bu, *Eddington* sınırını aşmak için geometrik bir yol sağlar. Bachetti vd. (2014), pulsar frekansı türevi aracılığıyla M82 X-2 üzerindeki yığılma oranı için *Eddington* limitinden birkaç kat daha büyük bir değer ve böyle bir sistem için manyetik alanı $B \sim > 10^{12}$ G olarak tahmin ettiler. Bu, aynı zamanda yüksek ısıtmanın nedeni olarak kabul edilmiştir (Kaaret vd., 2017).

Daha düşük manyetik alana nötron yıldızları için de modeller önerilmiştir. Örnek olarak, ısıtma izotropik varsayıldığında yığılma diski, nötron yıldızının yüzeyine uzanır. Bu varsayımda, yığılma torkunun nötron yıldızının yarıçapı ile karşılaştırılabilir bir yarıçapta uygulanabilir olması gerekir. Bu durumda, manyetik alan zayıf olacaktır, $B \sim < 10^9$ G ve ısıtmanın büyük bir kısmı diskte serbest bırakılacaktır, bu nedenle karadelik üzerine *süper-Eddington* oranında yığılmalar söz konusu olur.

Bazı modellerde, hüzmelenmenin (beaming) karadeliklere kıyasla nötron yıldızlarında ~ 10 kat daha güçlü olduğu varsayılmaktadır, bu da nötron yıldızlarının daha düşük *Eddington* limitlerine karşılık gelebilir. Yığılmadan dolayı manyetik alan etkisini kaybedince pulsarlar gözlemlenmeyebilir bu yüzden ULX popülasyonunun büyük bir kısmı, titreşim göstermeyen nötron yıldızları olabilir. Ters durumda, nötron yıldızlarından yüksek düzeyde *süper-Eddington* ışıması, oldukça nadir olacak kadar yüksek manyetik alanlar gerektirebilir.

Eddington sınırını aşmanın basit bir yolu, eşyönlü olmayan (anisotropic) ışımadır. Bu durumda, görüş hattı boyunca bakıldığında bir nesnenin *süper-Eddington* gibi görünmesi için yığılma hızının *Eddington* sınırını aşmasına gerek yoktur. Bu tür ışınlama iki şekilde olabilir: görelî ve geometrik. İlk durumda, görünür ısıtmasını 77 kat artırabilen, jet ışını boyunca doğrudan standart bir XRB görünür. Ancak, ULX tayfları, bu tür hüzmelenmiş jetlerden bekleyeceğimiz güç-yasası tayflarına benzemez. Geometrik (veya hafif, mild) hüzmelenme, fotonların tercihen en düşük saçılma optik derinliği yönlerinde, yani dönme

kutupları boyunca ortaya çıkmalarını sağlayacak şekilde, kaçışını sınırlayan yığılma diskindeki yapının sonucu olabilir. Bu etki için gerekli olan yüksek disk ölçeği, *alt-Eddington* disklerinde doğal olarak oluşmaz. Bunun yerine *süper-Eddington* yığılmaları ile oluşan disklerin doğal bir sonucu olabilirler.

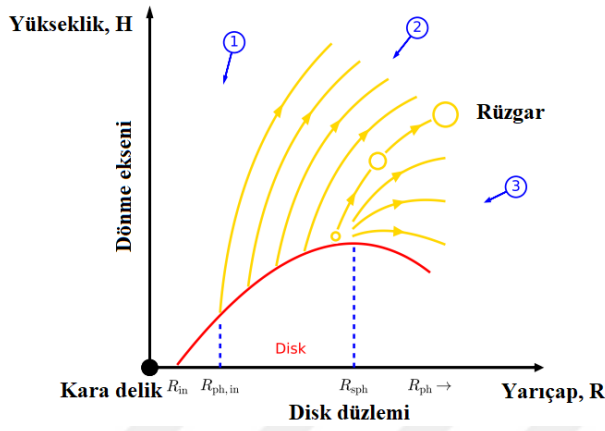
Eddington limiti, özellikle küresel olarak eşyönlü ışınım ile açıklanır. Aslında, disk yığılması için kütle için içeri doğru yönü (diskten radyal olarak, karadeliğe doğru) ve ışınım enerjisi salınımı için tercih edilen yön (disk yüzeyinden yukarı doğru) birinci dereceden dikeydir. Disklerin *Eddington* limitini aşabileceği, disk yığılma teorisi formüle edildiğinden beri varsayılmıştır (Shakura & Sunyaev 1973); bu, bu kritik üstü birikim rejiminde disklerin nasıl çalıştığına dair çeşitli modellere yol açmıştır.

İlk modellerden biri, süperkritik disk için öngördüğü sıkı, simit benzeri yapıya benzeyen modeldir. Dönen yığılma akışlarının merkezi bölgeler eksensel simetriye sahip olup, optik ve geometrik olarak kalındır. Bu nedenle, *Eddington* sınırını 15 veya daha fazla faktörle aşan yığılma oranları için, en iç bölgelerindeki bu oran $H/R \gg 5$ 'tir. Bu, X-ışını emisyonunu karadeliğe en yakın noktadan bir gözlemciye doğru kolayca ışınlayabilen dönme eksenini etrafında optik olarak kalın kütleli dar huniler oluşturabilir (Şekil 20, Pinto, 2016)). Ancak, bu modelin sınırlamaları arasında, yalnızca diskin ışınımsal olarak verimli olması durumunda geçerli olması ve diskin içindeki fiziksel süreçlerin yok sayılması yer alır. Aslında, geometrik olarak kalın *süper-Eddington* disklerinde, diskteki kütle için içeri akış süresinin, fotonların diskin son saçılma yüzeyine ulaşması ve yayılması için yayılma süresinden daha kısa olmasını beklenmektedir; fotonlar bu nedenle diskte tutulur ve karadeliğe yönlendirilir. Bu etkiyi hesaba katan modeller genellikle ince disk modelleri olarak adlandırılır ($H/R \sim <1$). Her ne kadar birçok çalışma *Eddington* hızı civarında meydana gelen ince diskler üzerine odaklanmış olsa da son çalışmalar, adveksiyonun disk yüksekliğini ve sonuç olarak, tüm *süper-Eddington* oranlarında ışınlama derecesini sınırlamak için hareket ettiğini göstermiştir. Disklerin geometrik olarak çok kalın olmaktan ziyade ince olmasını beklenir.

Süper-Eddington yığılmasının bir başka özelliği, *Eddington* sınırının her zaman yerel (local) olarak geçerli olmasıdır; böylece fazla kütle diskten büyük bir rüzgâr şeklinde sürülür. Bu, kütle aktarım hızı $(9/4)\dot{m}_{Edd}$ 'i aştığında önem kazanır. Bu senaryoda, yığılma diskinin dış kısımları, belirli bir küreselleşme yarıçapına ($R_{sph} = (\dot{m}/\dot{m}_{Edd})R_{in}$) kadar geometrik olarak ince kalır. Bu yarıçap içinde disk, ışınım basıncı onu şişirdikçe geometrik

olarak kalınlaşır ve fazla malzeme diskin üst katmanlarından ışınma basıncıyla tetiklenen bir rüzgâr şeklinde çıkarılır. Bu rüzgâr çok büyük olacak ve diskten uzaklaştıkça optik olarak kalın kalacaktır. Rüzgârda (adveksiyon yokluğunda) diskin iç kenarındaki yığılma oranının \dot{m} 'ye eşit olması gereken yeterli kütle kaybolur.

Geometrik olarak kalın bir disk ve ışınım kaynaklı bir rüzgârdan oluşan bu model, doğrudan ilk olarak Shakura & Sunyaev (1973) tarafından tanımlanmış ve daha sonra geliştirilen süper kritik disk modelinden türetilmiştir. Bu model Şekil 19’de özetlenmiştir.



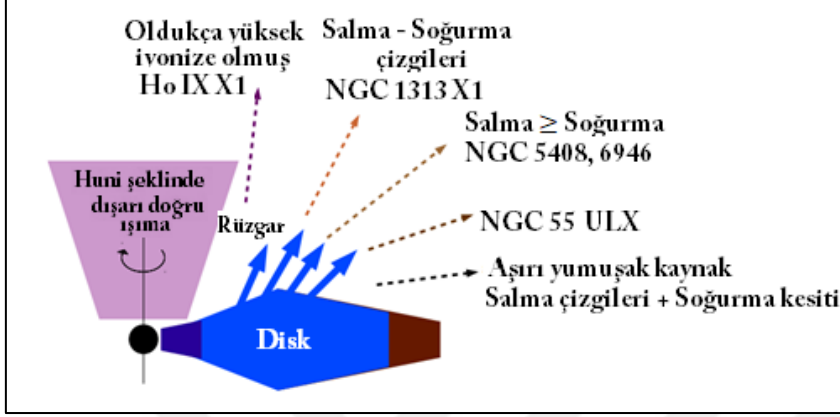
Şekil 19. Süper kritik bir yığılma akışının diyagramı (Şekil Kaaret vd. (2017) çalışmasında alınmıştır).

Süperkritik bir yığılma yapısı, üç farklı yarıçapla tanımlanan 3 ana bölgeye ayrılabilir (bkz. Şekil 19): $R_{ph,in}$, fotosferin iç kenarı; R_{sph} ve R_{ph} , küreselleşme yarıçapı ve fotosferin dış kenarı. Buna göre;

$R < R_{ph,in}$: En küçük disk yarıçaplarında rüzgâr, dikey yönde elektron saçılımına karşı optik olarak incedir ve X-ışın ışınması sıcak bir yığılma diskinden yayınıma benzer.

$R_{ph,in} < R < R_{sph}$: Rüzgâr bu bölgede opaktır ve etkin bir şekilde içeri akışın dikey bir uzantısı haline gelir. Bu kütlede adveksiyon hakimdir ve bu nedenle $R^{-1/2}$ sıcaklık profiline sahiptir. Işınma rüzgâr tarafından yönlendirildiği için üretildiği yerin kabaca iki katı bir yarıçapta kaçar.

$R_{\text{sph}} < R < R_{\text{ph}}$: Bu bölgedeki rüzgârın optik derinliği $1/r$ olarak düşer ve bu nedenle ışıma yaklaşık olarak üretildiği yarıçapta ortaya çıkar. Sıcaklık profili, kabaca bu bölgede üretilen *Eddington* parlaklığı ile klasik disk $R^{-3/4}$ profili olarak görünür.



Şekil 20. Karadeliğin dönme eksenini etrafında huni benzeri bir yapının gösterilmesi.

Özetle, süper kritik bir yığılma akışının sistem için farklı bölgelerin farklı görüş açıları arasında görülebileceği anlamına gelir, bu nedenle tahmini görünümü, görüş hattına olan eğimin bir fonksiyonu olarak değişir. Örneğin, yığılma akışının merkezi bölgelerinde (Şekil 19, 1. bölge) iç disk hâkim olabilir ve ışıma huni benzeri yapıdan hüzmelenme ile yayılır. Orta açılarda (Şekil 19, 2. bölge), görüş rüzgârın içinden geçecektir ve böylece küreselleşme yarıçapındakine benzer bir sıcaklığa sahip yumuşak, termal bileşen oluşur. Büyük eğim açıları (Şekil 19, 3. bölge) fotosferin dış bölgesi görünür ve bu durumda ışıma ağırlıklı olarak daha soğuk olacaktır. Yığılma hızındaki değişiklikler rüzgâra giren kütle akışını ve dolayısıyla rüzgâr ölçeği yüksekliğini etkiler, böylece sabit eğimde görünümü değiştirir.

ULX'lerin iki bileşenli tayfları, süperkritik yığılma modelleri aracılığıyla fiziksel olarak yorumlanmıştır. Aşırı parlak (UL) tayflar, belirgin şekilde iki bileşenden oluşur. Yumuşak termal bileşenin, kütle akışları iç fotosferden kaynaklandığı düşünülür ve 0,1-0,3 keV sıcaklıkta bir *karacisim* veya çok *DISKBB* ile modellenilebilir. Sert bileşenin, yığılma diskinin sıcak, iç bölgelerinden kaynaklandığı düşünülür ve 1,5 – 3 keV sıcaklıklarda bir *DISKBB* veya optik olarak kalın korona olarak modellenilebilir. Sert UL, iç diskin belirgin olduğu düşük eğimli görüş hatlarına (Şekil 19, 1. bölge) karşılık gelir. Yumuşak UL, iç diskin görünümünün azaltıldığı ve fotosferin görünümünün arttığı orta derecedeki eğimden

(Şekil 19, 2. bölge) ortaya çıkar. Süper yumuşak aşırı tayflar (SSUL), büyük eğimlere karşılık gelebilir (Şekil 19, 3. bölge). Daha sonra iç disk gizlenecek ve tayf, daha soğuk ve dış fotosferden gelen ışığa hâkim olacaktır. SSUL, aynı zamanda, yığılma hızı, çoğu eğimde, çıkış diskini kaplayacak ölçüde arttığında da ortaya çıkabilir. Genişletilmiş disk tayfları (BD), yığılma diskinin baskın olduğu, ancak disk yapısının yüksek yığılma hızı nedeniyle standart ince disk yapısından saptığı durumlarda görülebilir.

2.4. ULX'lerin X-ışın Zamansal Çalışmaları

Galaktik karadeliklerin X-ışın zamansal çalışmaları, keşfedilen pulslardan nötron yıldızı etrafındaki yığılma diskinin tanımlanmasına, yörünge ve süper yörünge dönemlerin ölçülmesine olanak sağlar. Aynı zamanda, yığılma durumu ve tıkHz nesnelere kütle ile ilgili ipuçları sunmaktadır. X-ışın zamansal çalışmalar, ULX'lerin fiziksel yapısını anlamak için büyük umut vaat etse de zamanlama analizi için çok sayıda foton ve kapsamlı ve sürekli gözleme ihtiyaç vardır. Yüksek sinyal-gürültü güç tayfları ve kapsamlı izleme kampanyaları çok az sayıda ULX'ler için elde edilmiştir.

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 vd., 2014). Sinyal, M82' nin merkezin kalabalık bölgesinde bulunan, 10^{40} erg s^{-1} 'in üzerinde bir tepe pik ışımasına sahip geçici bir X-ışın kaynağı (transient) olan M82 X-2' den gözlemlendi. Tutarlı titreşimler, dönen bir nötron yıldızının açık göstergesidir. Bu durum, karadeliğe üzerine yığılma olasılığını dışladığı gibi ve gözlenen parlaklığın *Eddington* sınırını çok aştığından nötron yıldızların bilinen kütle ile açıklanmasının zorluğunu gösterir (Kaaret vd., 2017). Pulsar benzeri sinyal keşfedilen diğer sistemlere örnek olarak, NGC 7793 P13 (Furst vd., 2016; Israel vd., 2017b), NGC 5907 ULX-1 (Israel vd., 2017), NGC 300 ULX-1 (Carpano vd., 2018), NGC 1313 X-2 (Sathyaprakash vd., 2018) ve M51 ULX-7 (Rodriguez Castillo vd., 2020) verilebilir.

ULX'lerin kısa dönem (saniye ya da saat mertebesinde) zamansal özellikleri, Galaktik X-ışın çift sistemlerinde gözlemlenenlerden oldukça farklıdır ve belirli tayfsal durumlarla ilgili olmadığı belirtilmiştir (Chiara Salvaggio vd., 2022). Kısa dönem değişkenliği, yumuşak aşırı-parlak kaynaklarda sert olanlara göre daha fazladır (Sutton vd.,

2013), değişkenlik yumuşak tayfa sahip tüm kaynaklarda gözlenmeyebilir ve ULX'in tüm gözlemlerinde bu değişkenlik belirlenmeyebilir. Böyle bir değişkenliğin gözlenmeme nedeni, optik olarak kalın ve düzgün olmayan rüzgarların varlığıyla açıklanabileceği belirtilmiştir (Middleton vd., 2011; 2015; Chiara Salvaggio vd., 2022). Bu tür rüzgarların varlığı, birçok ULX'in istatistiksel olarak zengin tayfsal verilerinde, radyo bölgede gözlemlenen bulutsularda, optik gözlemlerde ve X-ışın tayflarında tespit edilmiştir (Pinto vd., 2016; Kosec vd., 2018; Belfiore vd., 2020).

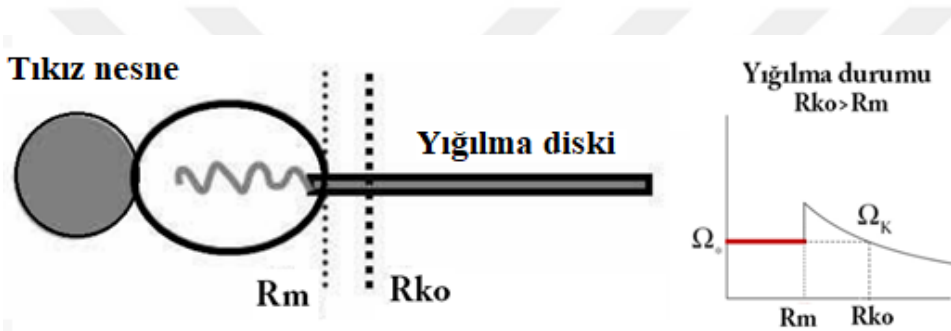
ULX'lerin çoğu, birkaç yıl, hatta on yıllar boyunca sabit ışıtmaya sahip olabilirler. Bazıları ise kısa zaman ölçeğinde yüksek akı değişiklikleri gösterebilirler. Hatta bazıları günler ya da aylar mertebesinde tamamen sönebilir ve tekrardan ULX seviyesinde ısıtma yapabilirler (Walton vd., 2020). Bu tür kaynaklara geçici ya da transit (transient) ULXs denir. Pulsar özelliği keşfedilen ULX'ler (PULX'ler), genellikle geçici ULX'ler olarak tanımlanabilecek kadar yüksek akı değişkenliği gösterirler.

Remillard ve McClintock (2006) çalışmasında, X-ışın çiftlerinin X-ışın ısıtması *Eddington* sınırının altında olanların, Roche lobuyla kütle transfer eden küçük kütleli donörler barındıran sistemler, genellikle geçici kaynaklar olarak tanımlanırken donörü kütlece büyük olan ve kütle transferini rüzgâr yoluyla gerçekleştiren sistemler ise genellikle kalıcı kaynaklar olarak tanımlamıştır. Ancak, geçici ULX'ler için böyle bir tanım yapmak çok zordur. Geçici ULX'lerin doğasını açıklayacak mekanizmaların yığılma diski, yığılma diskindeki yalpalamalar veya pervane etkisinin kısmı olduğu tartışılmaktadır (Wang vd., 2019). Ayrıca, bu kaynaklar farklı türdeki gökadalarda (örn. Erken tip, sarmal ve yıldız oluşum gökadaları) da keşfedilmiştir.

Geçici ULX'lerin donör kütleleri ve yaş aralıkları hakkında ortak bir görüş henüz oluşmamıştır. Bu yüzden, optik karşılıklarının belirlenmesi bu konuda önemli gelişmelere olanak sunabilir. Ancak, optik ışımaya kaynağının disk mi, donör yıldızı mı veya her iki bileşenin katkısı konusunda belirsizler mevcuttur. Yüksek uzaysal çözünürlüklü, sürekli *HST* gözlemlerinin yanı sıra yeni nesil *James Webb* teleskobu verileri ile bu belirsizlikleri büyük oranda çözülmesi beklenmektedir. Sürekli X-ışın gözlemlerinin geçmişte çok az olması ve geçici ULX'ler barındıran gökadalarda gözlemlerinin az olması nedeniyle geçici ULX'lerin sayısı oldukça azdır. Geçici ULX'ler yeni nesil X-ışın gözlemevleri (örn. *XMM-Newton*, *Chandra* ve *Swift*) sayesinde sayıları artmaktadır (Pintore vd., 2018; Earnshaw vd.,

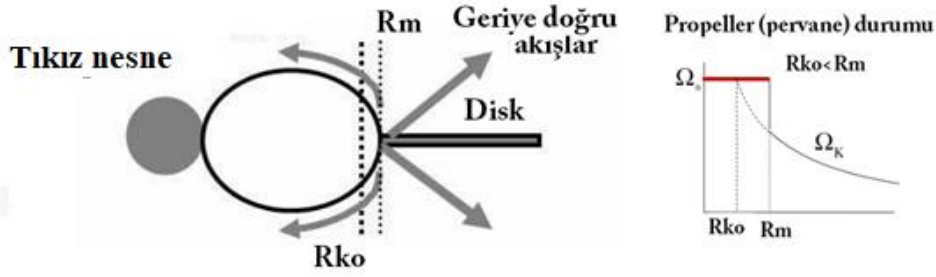
2019; Wang vd., 2019; Allak vd., 2020; Earnshaw vd., 2020; Walton vd., 2021). Her bir yeni X-ışın gözlemi yeni bir geçici ULX'in keşfi için iyi fırsattır.

Genelde, PULX'lerin uzun dönem X-ışın akı ışık eğrilerinde iki-tepeli bir dağılım (bi-modal) gözlenmesi önemlidir (Walton vd., 2015; Motch vd., 2014, Earnshaw vd., 2018, Song vd., 2020). ULXs akılarındaki güçlü değişimin göstergesi olan bu durumlarda, yığılmaların pulsarın manyetosferik yarıçapında kesilmesi nedeniyle meydana gelebilir. Buna pervane (*propeller effect*) etkisi denir (Tsygankov vd, 2016). Başka bir deyişle, mekanizmanın yığılma yarıçapı görece manyetosferik yarıçaptan büyük hale gelirse X-ışın akısı normal olarak gözlenir (normal ya da yüksek akı durumu, Bkz. Şekil 21).



Şekil 21. Manyetik alan yarıçapının (R_m) korotasyon yarıçapından (R_{ko}) küçük olma durumu. Burada, Ω_K Keplerian dönüşü, Ω_* ise yıldız dönüşünü temsil eder (Romanova vd., 2008; 2016)

Diğer yandan, nötron yıldızının manyetosferik yarıçapı, diskte biriken kütle için korotasyon yarıçapından (yerel Kepler frekansının yıldız dönme frekansına eşit olduğu durum) daha büyük olduğunda X-ışın akısının gelmesini engeller (düşük akı durumu, Bkz. Şekil 22). (Illarionov ve Sunyaev, 1975; Tsygankov vd., 2016; Grebenev, 2017). Pervane etkisi; tıkız nesne, güçlü bir manyetik alana sahip bir nötron yıldızı ise açıklanabilir. Bu nedenle, pulsasyonlar tespit edilmediğinde bile, pervane etkisi sonucu uzun dönem X-ışın ışık eğrilerinde görülen iki modlu dağılımlar PULX'leri tanımlamak için bir kanıt olarak kabul edilmektedir (örn. Earnshaw vd., 2018; Song vd., 2020).



Şekil 22. Manyetik alan yarıçapının (R_m) korotasyon yarıçapından (R_{ko}) büyük olma durumu. Diğer açıklamalar Şekil 21’de olduğu gibidir.

Ayrıca, uzun ve sürekli ULX gözlemlerinde, son zamanlarda bazı ULX’lerde onlarca gün mertebesinde süper-orbital periyotlar keşfedilmiştir. Örneğin, M82 X-2 kaynağı (Brightman vd., 2019) ve M51 ULX-7 kaynağı (Brightman vd., 2020). Bu uzun süreli gözlemler daha çok *Swift* X-ışın gözlemevinin gözlemleri ile mümkün hale gelmiştir. Süper-orbital olarak adlandırılan bu değişkenliğin doğası tam olarak bilinmese de birçok çalışmada olası senaryolar açıklanmıştır (örn. Townsend ve Charles, 2020).

Belirlenen süper-orbital periyotların nedenleri olarak; tıkız nesneyi örten bir diskin devinimi veya süperkritik yığılma akışının Lense–Thirring (Çerçeve sürüklenmesi, kütleçekim etkisi) devinimi gibi çeşitli mekanizmalar önerilmiştir (Motch vd., 2014; Middleton vd., 2018, 2019, Fabrika vd., 2021). Bu süper-orbital periyotların PULX’lerde belirlenmesi, nötron yıldızı içeren ULX’lerin neredeyse ayırt edici bir özelliği haline gelmiştir. Ayrıca, nötron yıldızı içeren ve çok iyi bilinen LMC X-4 (Lang vd., 1981) ve SMC X-1 (Gruber ve Rothschild, 1984) X-ışın çiftlerinde de bu süper-orbital periyotlar gözlenmiştir. Bu tip sistemlerde, yani daha düşük ısıtmada ve daha düşük kütle yığılma oranlı sistemlerde, genellikle akı modülasyonlarını açıklamak için kütleçekim kuvvetin etkisiyle disklerdeki yalpalanmalar sonucu yığılma diskinin bozulması örnek verilmektedir. ULX sistemlerinde yörünge periyotları belirsiz olanlar için belirlenen bu periyotların sözü edilen periyot olma ihtimalini de tartışılan bir durumdur.

2.5. ULX'lerin Optik Özellikleri

Çoklu dalga boylarındaki (UV, optik, kızılöte ve radyo) çalışmalar ULX'lerin doğasını açığa çıkarmamıza yardımcı olmaktadır. Ayrıca, yeni nesil gözlemlerinin örneğin *James Webb Uzay Teleskobu* ve *eROSITA* yanı sıra gibi yeni araçlar bu kaynakların anlaşılmasına olanak sağlayacaktır. Yer-tabanlı ve *HST* ile yapılan optik gözlemler ile iyi çözünürlüğe sahip *Chandra* gözlemleri kullanılarak ULX'lerin optik karşılıkları belirlenebilir.

Özellikle, ULX'lerin optik karşılıklarının tanımlanması ve özelliklerinin ortaya çıkartılması, X-ışın çiftlerinin anlaşılması ve tıkHz nesnelere kütlesi 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. Fotometrik ve tayfsal gözlemler donörün tayfsal türü, yaşı, metal bolluğu, kütlesinin ve yerel çevresinin fiziksel durumu hakkında tanımlamalara olanak vermektedir (Zampieri vd. 2004; Kaaret vd. 2004, Feng ve Kaaret, 2008; Grise vd., 2012).

Çoğu ULX çok kalabalık bölgelerde ve hatta yıldız kümelerinde/yakınlarında yer aldığından, optik karşılıkları için özellikle tek optik aday bulmak oldukça zordur. Ayrıca, çoğu optik karşılıklar yer tabanlı gözlemlerle tespit edilemeyecek kadar sönüktür. Şimdiye kadar belirlenen optik karşılıkların görünür parlaklıkları $m_V > 21$ kadir civarındadır (Tao vd., 2011; Gladstone vd., 2013; Vinokurov vd., 2018). Bununla birlikte, görünür parlaklığı $m_V \approx 20$ kadir veya biraz daha parlak olan ULX optik karşılıkları da vardır. NGC 7793 P13 (Motch vd., 2014), NGC 300 ULX-1/SN2010da (Villar vd., 2016) ve UGC 6456 ULX (Vinokurov vd., 2020) bu sistemlere örnek verilebilir. ULX'lerin çoğunun mutlak parlaklıkları (M_V) $-4 < M_V < -9$ aralığında hesaplanmıştır (Vinokurov vd., 2018).

Yüzlerce ULX olmasına karşın yalnızca şimdilik, tek optik adayları olanların sayısı ~30'dur (Tao vd., 2011; Gladstone vd., 2013; Avdan vd., 2019; Allak vd., 2020). Birden fazla optik karşılığı ya da adayları olan ULX'lerin sayısı daha fazladır (Soria vd., 2005; Mucciarelli vd., 2007; Avdan ve diğerleri 2019; Aksaker vd., 2019; Akyuz vd., 2020; Allak vd., 2022). ULX sistemlerinde tıkHz nesnelere kütlesini belirlemenin en iyi yolunun çift sistemlerin dinamik kütle ölçümleri olduğu bilinmektedir. Ancak, ULX'lerin optik karşılıkları optik dalgaboyunda sönük olduğundan, radyal hız eğrisini elde etmek ve kütle fonksiyonunu ölçmek de zordur.

HST optik görüntülerinde ULX'lerin birçoğunun kalabalık yıldız alanlarında, yıldız kümelerinde veya kalabalık yıldız gruplarında yer aldığından, yıldız oluşum bölgeleriyle olan olası ilişkileri göz önüne alındığında optik karşılıkların belirlenmesi oldukça önemlidir (Fabbiano vd., 2001; Lira vd., 2002; Swartz vd., 2009, Avdan vd. 2013). Erken tür OB yıldızlarının göstergesi olan mavi renklere sahip ULX'lerin nokta benzeri karşılıkları belirlenerek bu sistemlerinin donör yıldızları hakkında önemli çıktılar elde edilmiştir (Liu vd., 2004; Soria vd., 2005; Roberts vd., 2008;). Ancak, mavi renklere sebep olan optik ışımının kaynağının disk ya/ya da donör katkısı tartışılmaktadır.

Şimdiye kadar, sadece NGC 7793 gökadasında bulunan P13 kaynağın donörünün tayf gözlemlerinde fotosferik soğurma çizgileri belirlenebilmiştir (Motch vd., 2014). Genç yıldız kümeleri ve ULX'ler arasındaki ilişki, bazı donör yıldızların kırmızı süperdevler olabileceğini ve bu donörlerin yakın kızılötesi dalgaboyunda ışımaya yaptığı varsayılmıştır (Heida vd., 2014, 2016; López vd., 2017). Yakın kızılötesi bölgede (H band) yapılan çalışmaların çıktıları oldukça önemlidir çünkü, bu dalgaboyu aralığından gelen ışımının yığılma diskinden daha çok donör kaynaklı olma olasılığı yüksektir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL VE YÖNTEM

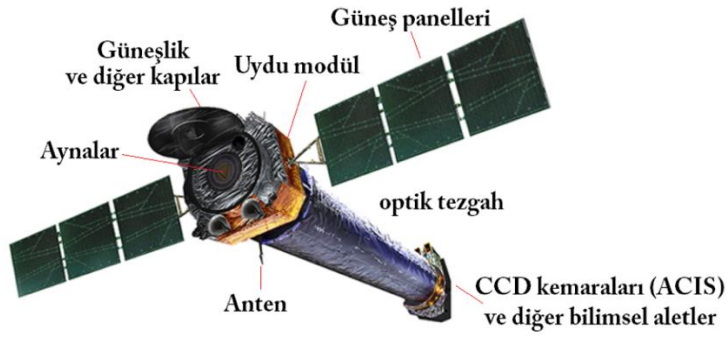
1.1. X-ışın Uydu Gözlemleri

X-ışın uyduları, astronomik nesnelere yayılan X-ışınlarını gözlemlemek için en ideal gözlem araçlarıdır. Bu tez çalışmasında, ULX kataloglarından seçilen NGC 1316 ve M51 gökadalardaki ULX kaynakları ile ilgili yapılan analizlerde *Chandra*, *XMM-Newton* ve *Swift* X-ışın uyduları verileri ile *HST* optik arşiv gözlem verileri kullanılmıştır. Bu bölümde, bu uydular hakkında genel bilgiler ve yapılan analiz yöntemleri sunulmuştur. Ayrıca, X-ışın gözlemlerinin temel özellikleri Tablo 2’de karşılaştırılmıştır.

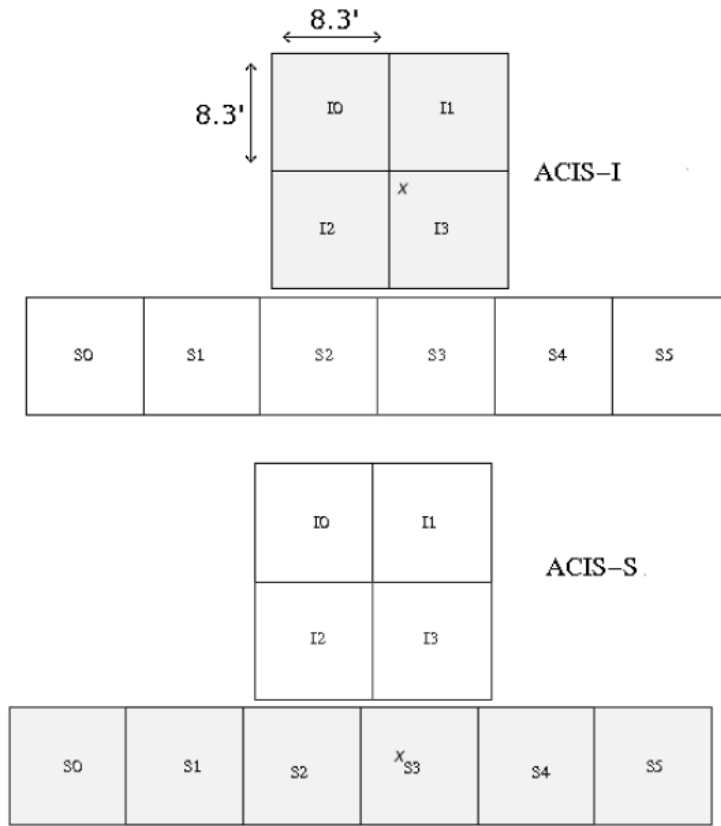
3.1.1 *Chandra* X-ışın Gözlemi

Chandra X-ışın uzay teleskobu, *HST* ve *Spitzer* uzay teleskopları ve misyonunu tamamlamış *Compton Gama Işını Gözlemi* ile birlikte NASA’nın büyük gözlemlerinden biridir ve X-ışın enerji aralığında gökyüzünü gözlemlemek için tasarlanmıştır. NASA’nın uzay mekiği Columbia tarafından 23 Temmuz 1999’da ABD Florida’daki Kennedy uzay merkezinden fırlatılan uzay aracı, üç ana bileşenden oluşan bilimsel cihazlar ve bir X ışın teleskopu taşımaktadır (bkz. Şekil 23). Bu cihazlar; i) yüksek çözünürlüklü ayna düzeneği, ii) gelişmiş CCD görüntüleme spektrometresi (*ACIS*) ve yüksek çözünürlüklü kamera (*HRC*) ve iii) iki yüksek ve düşük enerji iletim ızgaraları (sırasıyla *HETG* ve *LETG*). Bu tez çalışmasında, analizlerde kullanılan tüm *Chandra* verileri *ACIS* gözlemlerinden elde edildiğinden, *ACIS* detektörünün özelliklerine odaklanılmıştır. *Chandra* uzay teleskobunun tüm detaylarına <https://chandra.harvard.edu/> bağlantısından ulaşılabilir.

ACIS, X-ışın görüntüleyici olarak çalışan bir dizi CCD dedektörlerinden oluşur. Dedektörlere çarpan X-ışın fotonlarının konum, enerji ve varış süresi gibi önemli özelliklerini kaydederek, yüksek çözünürlüklü görüntüleme, orta çözünürlüklü tayfsal ve zamansal çalışmalar için olanaklar sağlar. *ACIS* odak düzleminin şeması Şekil 24’de verilmiştir. *ACIS*, iki sete bölünmüş 10 düzlemsel (*ACIS-I* (2×2) ve *ACIS-S* (1×6)), 1024×1024 piksel CCD içerir.



Şekil 23. Chandra X-ışın teleskobunun temel aygıtları



Şekil 24. Chandra/ACIS odak düzlem şeması (<https://chandra.harvard.edu>)

ACIS enerji bant aralığı 0,1-10 keV'dir. Prensip olarak, altı ACIS detektörünün herhangi bir kombinasyonu aynı anda çalıştırılabilir. Bir gözlem sırasında iki ACIS çalışma modundan biri seçilmelidir: zamanlı pozlama (TE) modu veya sürekli saat ölçümü (CC) modu. TE modu, önceden seçilmiş her zaman miktarından (çerçeve süresi, frame time=3,2 saniye) verileri toplar ve bu mod, tam bir iki boyutlu uzaysal olarak çözümlenmiş görüntü

sağlar. CC modu, tek boyutlu uzaysal çözünürlükle verilerin çok hızlı bir şekilde toplanmasını sağlar (her 3 milisaniyede bir).

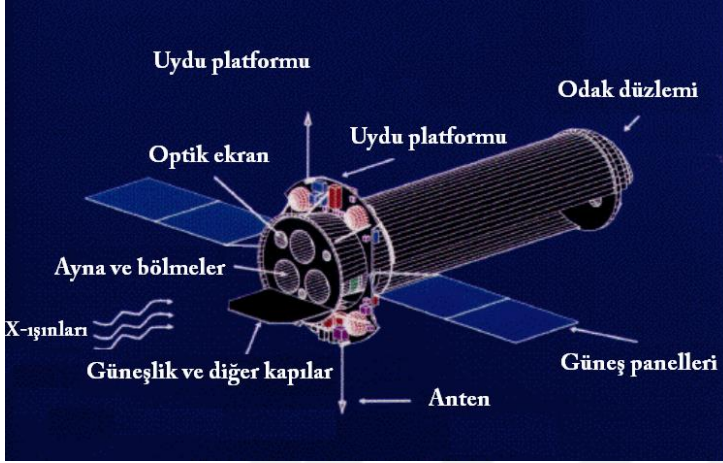
Yüksek akı yoğunluklu X-ışın kaynaklarının herhangi bir gözleminde, yığılmanın (pile-up) etkilerinden kaçınmak için çerçeve süresinin optimize edilmesi gerekir. Bu süreyi azaltmak veya CC modunu kullanmak bu sorunu önlemeye yardımcı olabilir. Gerçekte, *Chandra ACIS* mükemmel görüntüleme çözünürlüğüne sahiptir. Tespit edilen kaynakların çok daha yüksek uzaysal çözünürlüğe izin verirken, X-ışın fotonlarını etkin alanda toplama yeteneği, *XMM-Newton* gibi diğer X-ışın uydularınınkinden daha azdır. Bu nedenle, özellikle ULX'ler için yüksek kaliteli enerji tayfları elde etmek için uzun pozlama süreleri gereklidir. Ayrıca, yörünge başına 160 kilo saniye (ks) maruz poz süresine kadar yoğun parçacık ışınmasına hâkim olduğu bölgeler dışında oldukça iyi çalışır.

3.1.2 XMM-Newton X-ışın Gözlemevi (X-ray Multi-Mirror Mission Newton)

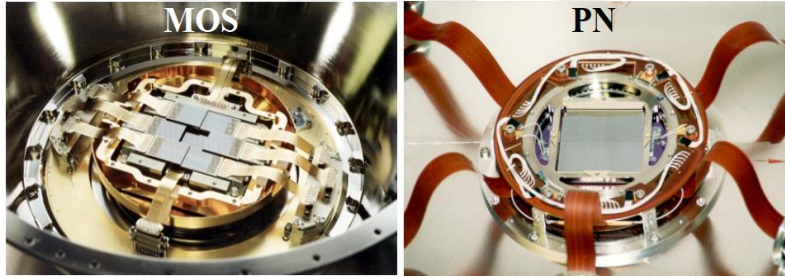
XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror Mission Newton), 10 Aralık 1999'da Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından gönderilen bir X-ışın uzay teleskopudur. Uzay aracı üç tür bilimsel cihaz taşır: i) X-ışın görüntüleme ve X-ışın spektroskopisi için Avrupa foton görüntüleme kameraları (The European Photon Imaging Camera, *EPIC*), ii) yüksek çözünürlüklü X-ışın için yansıma ızgarası spektrometreleri (The Reflection Grating Spectrometer, RGS) ve iii) optik/UV görüntüleme ve grizm spektroskopisi (180-600 nm) için bir optik monitör (OM). Gözlemevi, tek bir platformdan X-ışın ve optik /UV' de eşzamanlı gözlemler sağlar. Bu tez çalışmasında analiz edilen veriler *EPIC*'den elde edilmiştir ve bu nedenle bu cihazların özellikleri üzerinde durulacaktır. Bı uydu hakkında detaylı bilgi için <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton> bağlantısından ulaşabilir. *XMM-Newton* gözlem aracının şeması Şekil 25'de gösterilmiştir.

XMM-Newton, 58 altın kaplı iç içe aynadan oluşan ve 7500 mm odak uzunluğuna ve 30' çapında dairesel bir FOV'a (teleskobun görüş alanı) sahip, bir Wolter I teleskopu olan üç X-ışın dedektörü taşır. Bu teleskopların kombinasyonu, X-ışın fotonları için yüksek bir toplama alanı sağlar. Tam FOV boyunca 1"-2" olacak şekilde kalibre edilmiş üç *EPIC* kamera arasındaki göreceli bir astrometri ile birlikte hizalanırlar. Her bir X-ışın dedektörünün odak düzlemine yerleştirilmiş üç *EPIC* kamera, uzaysal çözünürlük 6" FWHM (Full Width at Half Maximum) ile 0,15-12 keV enerji aralığında orta derecede

taıysal çözünlükle çok hassas X-ışın görüntüleme ve X-ışın spektroskopisi gerçekleştirir. *EPIC*, *EPIC PN* adı verilen CCD kamera ve *EPIC MOS* (Metal Oksit Yarı İletken, Metal Oxide Semi-conductor) adı verilen iki özdeş CCD tipi kameradan oluşur (*MOS1* ve *MOS2*). *MOS* ve *PN* dedektörler Şekil 26’de gösterilmiştir.



Şekil 25. *XMM-Newton* teleskobunun Şeması ve bilimsel cihazlar (NASA)



Şekil 26. *XMM-Newton* MOS (sol) ve PN (sağ) dedektörleri

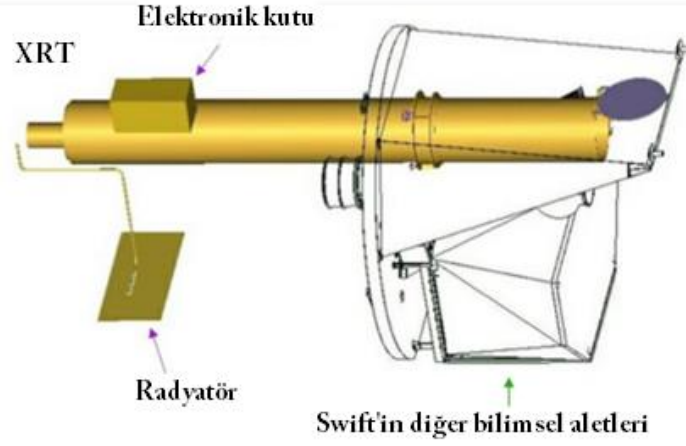
EPIC MOS, yedi ayrı özdeş çipten oluşur; her bir CCD eş düzlemsel değildir, ancak Wolter teleskoplarının odak düzleminin hafif eğriliğini takiben birbirlerine göre dengelenirler. *EPIC PN*, tek bir silikon plakaya entegre edilmiş 12 CCD’den oluşur. Bu üç *EPIC* kamera aynı anda çalıştırılır ve her bir gözlemden üç gözlemsel veri seti sağlanır. *EPIC*, bir gözlem için üç ana çalışma modu sunar: tam çerçeve, kısmi pencere ve zamanlama modları. Tam kare modunda, *EPIC MOS* için 2,6 saniye ve *EPIC PN* için 73,4 milisaniye zaman çözünlüğü ile tüm *EPIC FOV* için tam iki boyutlu görüntüleme sağlar. Ayrıca zamanlama modu çok yüksek *EPIC* zamanlama çözünlüğü sağlar; görüntüleme, iplerden yüksek hızlı okumaya izin vermek için yalnızca tek boyuttadır. *EPIC* kameraların en büyük

avantajı, diğer aktif X-ışın teleskoplarına kıyasla çok geniş bir veri toplama alanı sağlamasıdır. *EPIC* özelliklerini uydunun yüksek irtifa yörüngesiyle birleştiren *XMM-Newton* gözlemevi, son derece hassas gözlemlerle uzun kesintisiz gözlemler (yörünge başına maksimum 135 ks) ve ULX'ler gibi nokta kaynakların X-ışın özelliklerini karakterize etmek için önemli bilgiler sunan veriler sağlar.

3.1.3. *Swift* Gözlemevi (The Neil Gehrels Swift Observatory)

Swift, gama ışını patlamaları (GRB) çalışmalarına özel çoklu dalgaboylu gözlemler yapabilen bir gözlemevidir. NASA'nın orta düzey kâşif (MIDEX) programının bir parçası olarak uluslararası iş birliği ile geliştirilmiştir. *Swift*, 20 Kasım 2004' de bir Delta 7320 roketinde yörüngeye fırlatıldı. Uzay aracı üç bilim aleti taşıyor. Bir Patlama Uyarı Teleskopu (*BAT*; 15-150 keV), X-ışın Teleskopu (*XRT*; 0,2 -10 keV) ve UV /Optik Teleskop (*UVOT*; 170-600 nm). Bu üç teleskop, GRB'leri otomatik olarak tespit etmek ve gama ışını, X ışını, mor öte ve optik dalga bantlarında son parlamalarını gözlemlemek için birlikte çalışır. Bu tezde analiz edilen veriler *XRT*'den elde edilmiştir ve bu nedenle bu cihazın özellikleri üzerinde durulacaktır. *XRT* dedektörün ayrıntılı şeması Şekil 27'de gösterilmiştir.

XRT, gama ışınlarının ilk patlamasını takip etmek için tasarlandı. Bir Wolter 1 teleskopu, X-ışınlarını odak düzlemine yerleştirilmiş bir CCD dedektörüne odaklamak için kullanılır. *XRT* kamerası, *XMM-Newton MOS* dedektörüne çok benzeyen tek bir CDD'ye sahiptir ve 1 keV' de 70 eV enerji çözünürlüğü ile 0,2-10 keV enerji aralığında çalışır. Açısal çözünürlüğü $\approx 9''$ FWHM olan $23,6' \times 23,6'$ FOV'a sahiptir. *XRT* şu anda üç çalışma modu sunmaktadır: i) piksel başına biriken toplam enerjiyi ölçer ve böylece GRB merkezi konumunu ve tahmini X-ışın akısını sağlar, ii) tek boyutlu konum bilgisi ve spektroskopi ile yüksek çözünürlüklü zamanlama verilerini (2,2 ms) elde etmek için kullanılan zamanlama modu ve iii) FOV içinde tam tayfsal ve uzaysal bilgiye izin veren foton sayma modu (PC).



Şekil 27. *Swift-XRT* dedektörün ayrıntılı şeması

GRB'ler yüksek akı değişkenliği gösterse bile *Swift*, bir patlama sırasında çalışma modları arasında otomatik olarak geçiş yapabilir. *Swift*, yörünge periyodu ~90 dakika olan alçak irtifalı (~600 km yükseklik); Dünya yörüngesinde bir X-ışın uydusudur. *Swift-XRT*'nin *Chandra* veya *XMM-Newton* ile karşılaştırıldığında çok küçük bir etkin alana sahiptir. Ayrıca, *Swift* gözlemleri, bireysel gözlem başına poz süresi olarak <40 ks ile sınırlıdır. Bu nedenle, *XRT*'den elde edilen ULX tayflarının çoğu, çok düşük sayıda foton içerir.

3.1.4 Hubble Uzay Teleskobu (*Hubble Space Telescope, HST*)

Adı Amerikalı astronom Edwin Hubble'ın anısına verilmiş Hubble Uzay Teleskobu (*Hubble Space Telescope, HST*), NASA ve ESA arasında ortak bir çalışma sonucu 1990'da 600 km yüksekliğinde L2 yörüngesine gönderilmiştir. 20 Mayıs 1990 tarihinde gözlemlere başlamıştır. Gözlem yapılan dalga boyu aralığı 115 nm-1000 nm dir. Optik açıdan, *HST*, Ritchey-Chrétien tasarımına sahiptir. *HST*'nin birincil aynasının çapı 2,4 m'dir. *HST* 'nin kesit diyagramı ve dedektörleri Şekil 28'da gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan *HST* verilerinin ilgili dedektörleri aşağıda açıklanmıştır.

Tablo 2

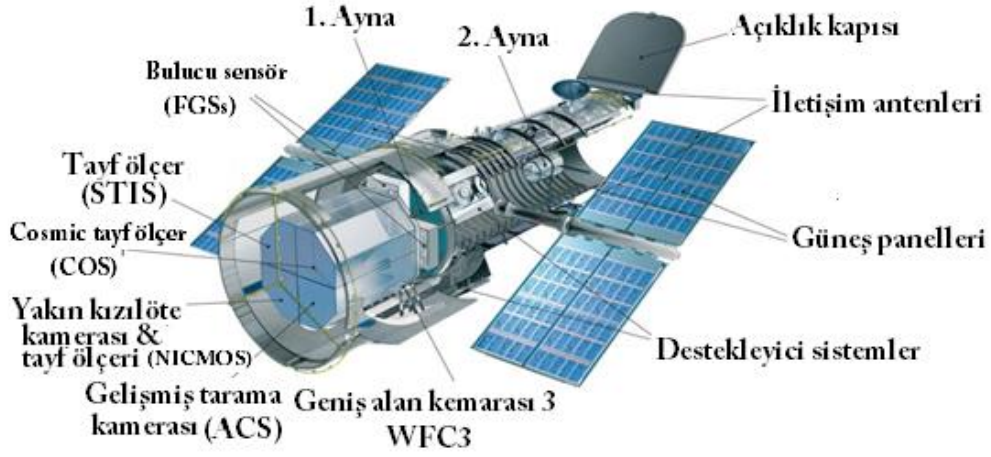
Bu çalışmada kullanılan X-ışın gözlemevi dedektörlerin özelliklerinin karşılaştırılması.

X-ışın Gözlem Dedektörleri	Enerji aralığı (a)	Enerji çözünürlüğü (b)	PSF (c)	Etkin alanı (d)	FOV (e)	Görünürlük (f)
	(keV)	(eV)	(")	(cm^2)	(')	(saat)
<i>Chandra</i>	0,1-10	100	0,5	555	30 × 30	44,4
<i>XMM-Newton</i>	0,15-12	55	6	4650	30	36,7
<i>Swift-XRT</i>	0,2-10	70	8,8	133,5	23 × 23	~0,8

Not: (a): Teleskop enerji bandı. (b): 1 keV' de cihaz enerji çözünürlüğü. (c): Teleskobun nokta yayılım fonksiyonunun (PSF), bir görüntüleme sisteminin bir nokta kaynağına tepkisini tanımlar. (d): 1 keV 'de teleskobun etkin alanı. Bu alan, gökyüzündeki kaynakların fiziksel özelliklerini (örn. akı, yüzey parlaklığı) hesaplarken kullanılmaktadır. (e): Teleskop görüş alanı (FOV). (f): Parçacık ışımalarının hakim olduğu bölgenin maksimum hedef görünürlüğü.

İleri Tarama Kamerası (Advanced Camera for Surveys, ACS), dalga boyu aralığı mor-öte, görünür ve yakın-kızılötesi arasında uzanır. ACS, gökyüzünün geniş alanlarını ayrıntılı bir şekilde haritalama özelliğine sahiptir ve her biri belirli hedefler için yenilenmiş üç kanaldan oluşur: Geniş Alan Kanalı (Wide Field Channel, WFC) en çok kullanılan kameradır. Görüş alanı 202" x 202" dir. Elektrik arızası nedeniyle 2007'den bu yana kalıcı olarak devre dışı bırakılan Yüksek Çözünürlüklü Kanal (High Resolution Channel, HRC) onarılamamıştır.

Geniş Alan Kamerası 3 (Wide Field Camera 3, WFC3), UV ve görünür ışık (UVIS) ve yakın kızılötesi (NIR) için iki kanal bulunur. WFC3 üzerindeki CCD 16 megapiksel yüksek hassasiyet ve düşük gürültü dizisine sahiptir. Çözünürlüğü ve görüş alanı, HST'nin diğer bilimsel aletlerinden çok daha büyüktür.



Şekil 28. *HST* teleskobunun bilimsel aletlerinin gösterimi.

UVIS kanalı 200-1000 nm dalgaboyu aralığında 160"–160" FOV'a sahiptir. 62 adet geniş, orta ve dar bantlı filtre bulunur. UVIS WFC/PC Seçilebilir Optik Filtre Düzeneği (SOFA) tekerleklerinde 48 adet filtre yuvası bulunmaktadır. Bu yuvalardan beşinde "dörtlü filtreler" vardır. Her dörtlü filtre dört farklı dalgaboyu özelliği gösterir. Kızılöte (IR) kanalı 850–1700 nm dalgaboyu aralığında 123"×137" görüş alanına sahiptir. IR bandında 18 filtre yuvası vardır. 15'i 800–1900 nm arasında değişen geniş, orta ve dar bantlı dalga boylarını kapsar. WFC3 kamera 200 – 1700 nm arasındaki tüm dalga boylarında gözlem yapmaktadır.

1.2. Analizler

Bu çalışmada, incelenen kaynakların X-ışın ve optik arşiv verileri kullanılarak tayfsal, zamansal ve fotometrik analizleri yapılmıştır. Tayfsal analizlerde, kaynağın elde edilen enerji tayflarında, teorik modeller ile kıyaslanarak ışınım mekanizmaları hakkında önemli sonuçlara ulaşıldı. Zamansal analizlerde, ışınım miktarının zamanla değişimi incelenerek zaman içinde belirli bir değişkenlik gösterip göstermediğine bakıldı. Kısa ve uzun dönem değişim belirlenmesi halinde, bu değişimlerin periyodik olup olmadığı incelendi. Elde edilen bulgular, çift sistemlerin doğası hakkında önemli ipuçları sunmaktadır. Ayrıca, incelenen X-ışın kaynaklarının optik karşılıkları belirlenerek donör yıldızların özellikleri araştırıldı.

Tayfsal analizler için *HEASOFT v6.27* fonksiyonu içinde bulunan *XSPEC* (*An X-ray Spectral Fitting Package*, X-ışın Tayfsal Modelleme Fonksiyonu) yazılımı ve zamansal analizler için de *XRONOS* yazılımındaki *lcurve* ve *powspec* fonksiyonları kullanılmıştır. Optik analizler için ise *IRAF* (*Image Reduction ve Analysis Facility*) yazılım paketleri kullanılmıştır. Ayrıca, optik tayfsal enerji dağılımların analizlerinde, bu çalışmaya özgü *MATLAB* ve *PYTHON* dillerinde yazılmış kodlardan yararlanılmıştır. Grafiklerin oluşturulmasında *Veusz* (<https://veusz.github.io/>) ve *MATLAB*’tan yararlanılmıştır. Bu tez çalışması boyunca, X-ışın ve optik görüntülerin analizinde ve görselleştirmesinde, *SAOImageDS9* (bundan sonra *DS9*) uygulaması kullanılmıştır. X-ışın ve optik analiz adımları aşağıdaki bölümlerde detaylandırılmıştır.

3.2.1. X-ışın Kaynak Belirleme ve Tayfsal Analizler

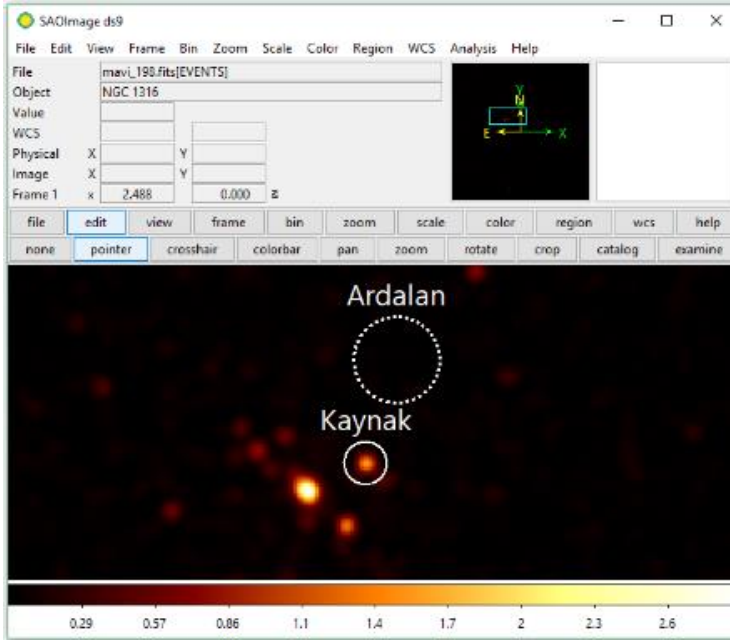
Chandra ACIS görüntülerinde kaynak belirlemek için *CIAO* (*Interactive Analysis of Observations*) yazılımında bulunan *wavdetect* fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu fonksiyonun çalışma prensibi iki adımda açıklanabilir. İlk olarak, bir veri kümesindeki olası kaynak pikselleri farklı ölçeklere sahip dalga fonksiyonuna ilişkilendirerek algılar. Yeterince büyük pozitif korelasyon değerlerine sahip pikseller, varsayılan kaynaklar olarak görüntüden çıkarılır ve sonraki korelasyonlar aynı ölçekte gerçekleştirilir. İkinci aşama, her dalga ölçeğinde birinci aşamadaki bilgilerden bir kaynak listesi oluşturur. Bu araç, yakın aralıklı nokta kaynaklarını ayırır ve dalga ölçekleri uygun şekilde seçildiği sürece genişletilmiş kaynakları bulur.

Tayfsal gözlemlerin ayrıntılı analizleri toplam foton sayısına bağlıdır. X-ışın gözlemevlerinin kameralarına ve enerji aralıklarına bağlı olarak kaynaktan gelen fotonlar sayılarak gözlenen tayfı oluşturulur. Model tayf ile gözlenen tayf arasında aşağıda Denklem 3.1 verilen bir bağıntı bulunmaktadır:

$$C(I) = \int f(E)R(I,E)dE \quad (3.1)$$

Burada $C(I)$ gözlenen tayf, $f(E)$ model tayf, $R(I,E)$ ise dedektörün tepkisini temsil eden fonksiyonudur. Bu bağıntıda, model tayf doğrudan gözlenen tayf ile ilişkilidir.

Gözlenen tayfı en iyi temsil eden model tayflar uyumlandırılarak kaynakların enerji tayfları belirlenir. En iyi uyumu veren modeli seçmek için, yeterli sayıda foton olup olmadığına bakılarak farklı istatistikler kullanılır. Genel olarak kullanılan istatistikler, foton sayısı yüksek olduğunda ki-kare (χ^2) ve foton sayısı <100 olduğunda ise C-istatistik (C-stat) olarak verilebilir. Bu istatistiklerin ayrıntılı açıklamaları Bölüm 3.2.2’de verilmiştir. *XSPEC* (X-ışın tayfsal model uyumlandırma, X-Ray Spectral Fitting Package) yazılımı, bu yöntemi kullanarak tayflara en uyumlu modelin parametrelerini hesaplar. *XSPEC*’in, çalışması için öncelikle kaynağın ve ardalanın veri dosyası gerekmektedir. Ardalanlar, herhangi bir kaynağı içermeyecek şekilde ve kaynağa yakın veya aynı detektör üzerindeki alanlardan seçilir (bkz. Şekil 29).



Şekil 29. Tayf ve ışık eğrilerini oluşturmak için kaynak ve ardalan bölgelerinin ds9 da gösterimi

XSPEC’te tanımlı birçok teorik modeller ve hatta sistemleri iyi bilinen X-ışın kaynak türlerine ait modeller bulunmaktadır. ULX’ler için sıklıkla *güç-yasası* (po) ve birden çok karacisim bileşeninden oluşan bir yığılma diskinden gelen spektrum (Mitsuda vd., 1984; Makishima vd., 1986) *DISKBB* modelleri ve bu iki modelin toplamı ($po+DISKBB$) uygulanmaktadır. Bazı durumlarda, genişletilmiş disk karacisim modeli olarak da bilinen

DISKPBB ve termal komptonizasyon (*COMPTT*) modelleri de kullanılmaktadır. Ayrıca, enerji tayflarının yönelimlerini tanımlamak için sıklıkla *cutoffpl* (yüksek enerjili üstel düşüşe sahip bir *güç-yasası*) modeli kullanılmaktadır. Bu modellere ek bir bileşen olarak, kaynak doğrultusundaki soğurmayı da hesaplamak için, uygulanan modellere bir soğurma bileşeni de eklenmektedir. *XSPEC*'te sıklıkla kullanılan soğurma modelleri arasında *TBABS*, *PHABS* ve *WABS* modelleri bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Tuebingen-Boulder yıldızlar arası ortamın (ISM) soğurma modeli *TBABS* kullanılmıştır. Bu model, ISM'de gaz fazı, parçacık fazı ve ortamdaki moleküller nedeniyle X-ışın soğurmaları için tesir kesitlerin toplamı olarak hesaplanmaktadır. Bu soğurma bileşeni *XSPEC*'te *TBABS* ismiyle tanımlanmış ve N_H parametresi ile birimi $10^{22} \text{atom cm}^{-2}$ olarak verilmektedir.

3.2.2. X-ışın Tayfsal Modeller için İstatistiksel Testler: χ^2 ve C-stat

Tayfsal model parametrelerini tahmin etmek için kullanılan veri setleri ve tanımlanan model için en uygun parametre değerlerini belirlemek için bazı istatistiksel testler kullanılmaktadır. Veri ve modelden hesaplanan bu istatistiksel değer en aza indirilene kadar parametreler değiştirilir. *XSPEC*, ki-kare (Chi-squared, χ^2) veya *C-stat* istatistiklerden birini kullanabilir. χ^2 testi, Denklem 3.2'deki tanımlanabilir:

$$\chi^2 = \frac{\sum(G_i - M_i)^2}{\sigma_i} \quad (3.2)$$

Burada, G_i ve M_i sırasıyla gözlenen ve model foton sayılarını temsil ederken σ_i ise varyans değerini göstermektedir.

Gözlenen ve tahmin edilen sayılar basittir, ancak genel olarak gerçek varyansı tahmin etmek zor olsa da hesaplanabilir. Gaussian dağılımı kullanıldığında yani hatalar kabul edilebilir ise, tahmin edilen olarak her bir aralıkla ilişkili varyans kullanılır. Gauss dağılımı gösteren verileri için standart en iyi uyumu veren test χ^2 testidir. Yüksek χ^2 değerleri bunun bir göstergesidir. *XSPEC*'te χ^2 değeri, serbestlik derecesi (veri sayısı – serbest parametre sayısı) sayısı ile ilgilidir. İndirgenmiş χ^2 (χ^2_ν) ise χ^2 değerinin serbestlik derecesi sayısına

oranı olarak tanımlanır. Model ve veri uyumunun anlamlı olarak nitelenmesi için χ_V^2 değerinin ~ 1 olması beklenir. Ancak, veri kalitesi ve kaynakların doğası gereği her zaman mükemmel uyumlar elde edilmesi beklenmez. Bu tez çalışmasında, iyi model uyumları için $0,8 < \chi_V^2 < 1,5$ aralığı temel alınmıştır. Bu, *XSPEC* kullanıcı rehberinde önerilen aralıktır.

Ancak, Poisson dağılımında işler biraz daha zorlaşabilir. Varsayılan seçenek (ağırlık standart), gözlemlenen foton sayısını temel (ortalama) varyans için bir tahmin aracı olarak kullanmaktır. Bunun için *C-stat* (C statistic), istatistiği kullanılmaktadır. Poisson dağılımı gösteren veri olasılığı için aşağıdaki Denklem 3.3 kullanılır:

$$P = \prod_{i=1}^N (M_i)^{G_i} \frac{e^{-M_i}}{G_i!} \quad (3.3)$$

Cash (1979) çalışmasında verilen Poisson verileri için olasılığa dayalı maksimum istatistik Denklem 3.4'de tanımlanmaktadır.

$$C = 2 \sum_{i=1}^N (M_i) - G_i \ln(M_i) + \ln(G_i!) \quad (3.4)$$

Bu istatistik yalnızca ardalanları çıkarılmayan tayflarda çalışır. Ardalan modellenebilecek kadar önemliyse, o zaman en iyi çözüm, *C-stat* kullanarak hem kaynak hem de ardalan tayflarına aynı anda model uygulamaktır. Ardalan için basit bir model yoksa veya bu yöntem uygun değilse Poisson olarak bilinen sorun ortaya çıkar. Bu sorun için birkaç yaklaşım vardır. *XSPEC*, tahmin edilen ardalan sayıları için her tayfsal kanalın bir serbest parametreye sahip olmasına izin vererek elde edilen profil olasılığını kullanır. *C-stat* bu yüzden veri istatistiği düşük (toplam foton sayısı < 100) tayflar için önerilmektedir. Bu tez çalışmasında, veri kalitesi düşük veriler için *C-stat* kullanılmıştır.

3.2.3. X-ışın Zamansal Analizler

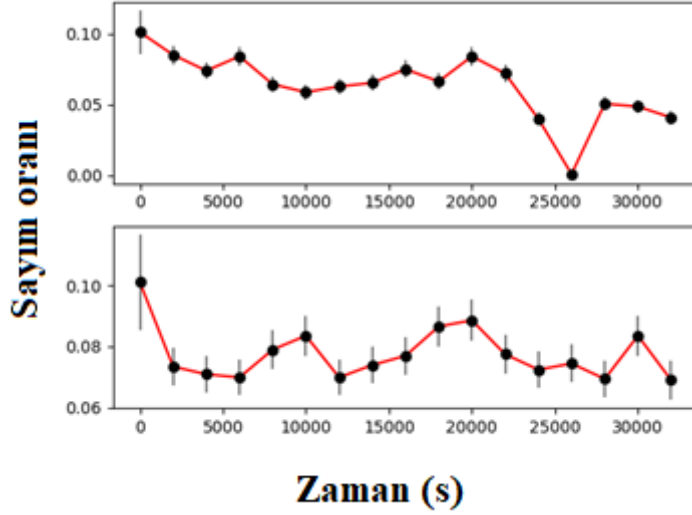
Kaynakların zamansal analizlerinde akısının veya foton sayım oranlarının (toplam foton sayısı/poz süresi) zamana göre değişimi temel alınır. Bunun için, gözlem verileri kullanarak, ardalın çıkarılmış kaynağın ışık eğrisinin üretilmesi gerekmektedir. Zamansal analizler kısa dönem ve uzun dönem olmak üzere iki farklı şekilde ele alınabilir. Kısa dönemin zaman ölçeği, genelde bir gözlem süresini (örn. poz süresi 5 ks olan bir gözlem) içerir başka bir deyişle saniye ya da saat mertebesindeki ölçeklerdir. Ancak, kısa döneme birkaç günü geçmeyecek şekilde gün mertebesinde art arda alınmış gözlemler de dahil edilebilir. Uzun dönem değişimi ise günler mertebesinde yıllara doğru uzanan bir zaman ölçeği için kullanılır.

Chandra ve *XMM-Newton* verilerindeki bir nokta kaynaktan alınan basit bir ışık eğrisi, kaynağın değişkenliği hakkında bir fikir edinmek veya ardalın parlamalarının filtrelenmesi için kullanılabilir. Sırasıyla *Chandra* ve *XMM-Newton* verilerden ışık eğrisi elde etmek için *CIAO/dmextract* ve *SAS/evselect* paketleri kullanılmaktadır. *Dmextract* ve *evselect* ışık eğrileri oluştururken iyi zaman aralığı (Good Time Interval, GTI) bilgilerini doğru bir şekilde uygular. GTI'ler, saniye cinsinden sıralanmış başlangıç ve bitiş zamanlarının tablosudur. Ardışık düzen tarafından üretilen veriler için, GTI'ler, görev zaman çizelgesi parametrelerinin kabul edilebilir aralıklara düştüğü zaman periyotlarını verir.

Tayfları elde ederken nasıl kaynak ve bir ardalın bölgeleri tanımlamak gerekiyorsa (bkz. Şekil 30) aynı işlemi ışık eğrilerini oluşturmak için de uygulanması gerekir. *ACIS* ve *EPIC* gözlemlerinde görülen parlamalar gibi anormal ardalın seviyelerinin görüldüğü zaman aralıklarından kaldırmak için verilerin filtrelenmesi gerekebilir. Bunun için, ham verilerden ışık eğrileri elde edilerek bu parlamalar belirlenir ve ışık eğrilerinden çıkarılır. Kullanım amacına göre, veri farklı enerji aralıklarına ve toplam gözlem süresi dikkate alınarak farklı zaman aralıklarına bölünür.

Ayrıca, Dünya ve X-ışın uyduları Güneş etrafında hareket ederken foton varış sürelerindeki farkı hesaba katmak için bazı düzeltmeler yapmak gereklidir. *Chandra* ve *XMM-Newton* için sırasıyla *axbary* ve *barycen* fonksiyonları kullanılır. Düzeltme, gözlem dosyalarında yer alan yörünge dosyalarını, konum (sağ açıklık, R.A; dik açıklık, Decl.) ve bir referans çerçevesi kullanılarak hesaplanır. Çıktı dosyası, zaman aralıkları, kaynak ve ardalın toplam foton sayıları ile sayım oranlarını içeren çeşitli sütunlar içerir. *XRONOS*

lcurve fonksiyonu ile ışık eğrileri gözlem süresine göre tekrardan üretilebilir. Örnek kısa dönem sayım oranlarına bağlı oluşturulan X-ışın ışık eğrileri Şekil 30'de gösterilmiştir.



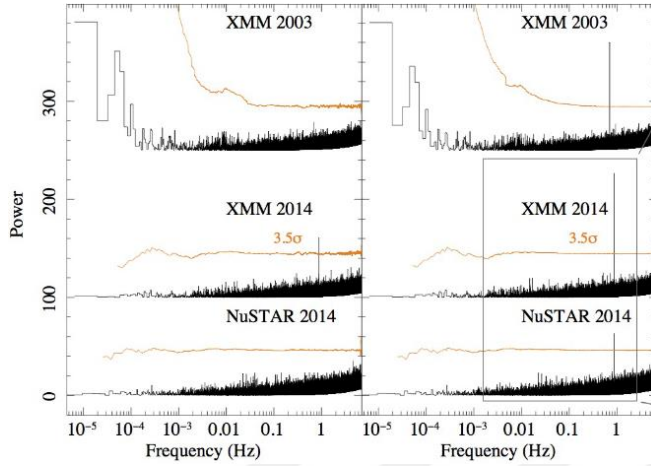
Şekil 30. Örnek olarak iki farklı X-ışın kaynağının aynı gözlemdaki kısa dönem *Chandra* X-ışın ışık eğrileri

Bir X-ışın kaynağında araştırılan düzenli değişimler veya periyodiklik için genellikle FFT (Fourier dönüşümü, Fast Fourier Transform) algoritması kullanılmaktadır. Işık eğrisi, frekansa (ν) karşılık güç yoğunluğu tayflarına (power density spectrum, PDS) dönüştürülmektedir. PDS'de yapılan normalizasyonlar oldukça önemlidir. Çünkü, Fourier genliklerine göre PDS'ler değişmektedir. Literatürde, Leahy (Leahy vd., 1983) (Denklem 3.5) ve Miyamoto (Miyamoto vd., 1991) (Denklem 3.6) olmak üzere iki farklı normalizasyon sıklıkla kullanılmaktadır.

$$P_{i_{sinyal}} + P_{i_{gürültü}} = \frac{2}{N_{foton}} |a_i|^2 \quad (3.5)$$

$$P_{i_{sinyal}} + P_{i_{gürültü}} = \frac{2}{N_{foton} \bar{f}} |a_i|^2 \quad (3.6)$$

Burada, a_i Fourier genliğini N_{foton} toplam foton sayısını gösterirken \bar{f} ortalama X-ışın foton sayım oranını göstermektedir. Her iki durumda da i ; 0'dan $N/2$ 'ye kadar olan sayıları temsil etmektedir. Bu tez çalışmasında PDS'leri elde etmek için *HEASOFT* v 6.29 yazılımı içinde bulunan FFT algoritmasını kullanan *powspec* fonksiyonu kullanılmıştır. Rodriguez Castillo vd. (2020) çalışmasından örnek bir PDS Şekil 31'de gösterilmiştir.



Şekil 31. 0,2–12 keV (*XMM–Newton*) ve 3–30 keV'nin (*NuSTAR*) enerji aralıklarındaki M51 ULX-7'nin tayfsal güç yoğunlukları.

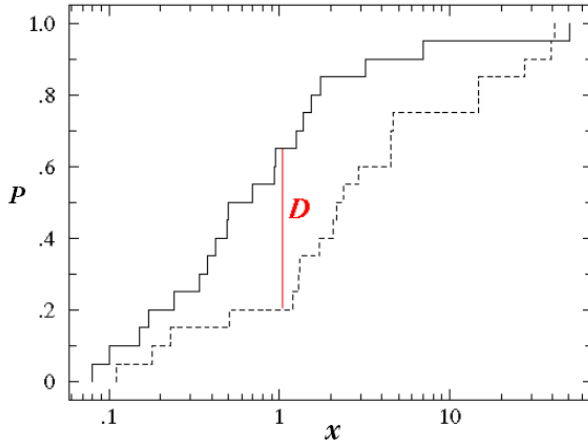
Kısa dönem değişim belirleme araçlarından birisi de Kolmogorov-Smirnov (K-S) testidir. K-S testi, tek bir değişkenin fonksiyonu olan sürekli veri setleri arasındaki farkları ölçmek için kabul edilen testtir. Bu fark ölçüsü, D olarak tanımlanmaktadır. Tek örnekli K-S testi, bir veri setini bilinen bir kümülatif dağılım fonksiyonuyla karşılaştırmak için kullanılırken, iki örnekli K-S testi iki farklı veri setini karşılaştırır. Yani, deneysel dağılım fonksiyonu ile gözlemsel dağılımın kümülatif dağılım fonksiyonu arasındaki veya iki örnekli deneysel dağılım fonksiyonları arasındaki ilişki ile ilgilidir.

Spesifik x_i değeri tarafından kabul edilen olasılık, x_i 'deki olasılık dağılım fonksiyonunun değeridir ve $P(x_i)$ ile gösterilir. Kümülatif dağılım fonksiyonu, verilen bir X_i değerinin solundaki veri noktalarının kesirini veren fonksiyon olarak tanımlanır ($P(x < x_i)$). $S_{N1}(x_i)$ ve $S_{N2}(x_i)$ gibi iki farklı kümülatif dağılım fonksiyonunu karşılaştırmak için (burada $S_N(x_i)$ N sayıdaki değer içeren bir veri kümesinin çizildiği olasılık dağılımının kümülatif dağılım fonksiyonudur ve Denklem 3.7' de verilmektedir. Örnek K-S kümülatif

dağılımı Şekil 32’de gösterilmiştir. Kesikli ve kalın çizgiler sırasıyla beklenen ve gözlenen dağılımları temsil etmektedir. D ise Denklem 3.8’de verildiği gibi bu iki dağılım arasındaki farkı göstermektedir (Chakravarti vd., 1967).

$$S_N(x_i) = \frac{i-N}{N} \quad (3.7)$$

$$D = \max_{-\infty < x < \infty} |S_{N1}(x_i) - S_{N2}(x_i)| \quad (3.8)$$

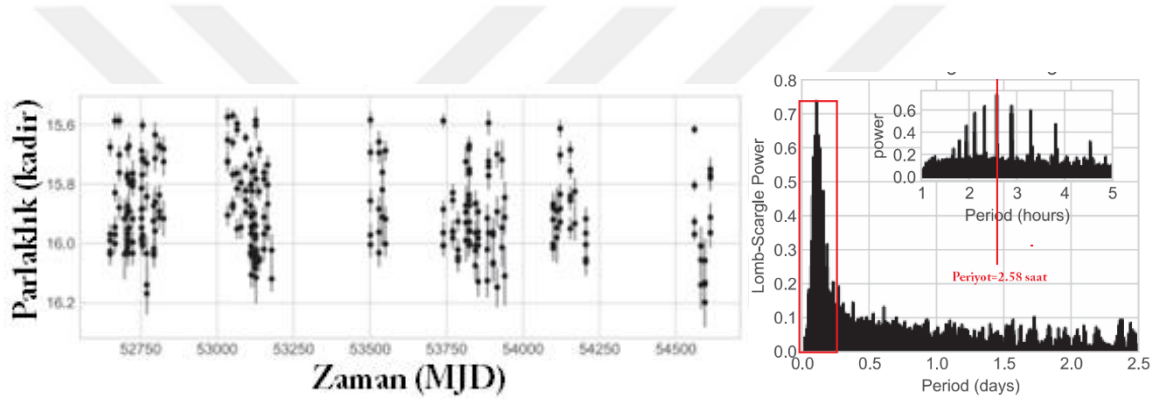


Şekil 32. K-S kümülatif dağılım fonksiyon dağılımı

K-S testi ile elde edilen olasılık $P=1-\alpha$ 'dır. Burada α (Kolmogorov dağılımı altında) D değerinin ölçülen değerden daha büyük veya ona eşit olma olasılığıdır. Ardalandan temizlenmiş ışık eğrileri kullanılarak farklı zaman aralıklarına (örn. 100 s, 500 s, 1000 s vb.) tek veya iki boyutta K-S testi uygulanır. K-S test ile elde edilen olasılık değeri (P), kaynağın bir bölge içindeki varış süreleri, gözlem boyunca sabit bir kaynağın sayım oranı ile tutarsız olduğunda değişimin varlığını işaret eder. Eğer $P \geq 0,5$ ise değişkenlikten söz etmek anlamlı değildir.

Değişkenlik gösteren X-ışın kaynakları, neredeyse tüm dalgaboylarında ve tüm zaman ölçeklerinde gözlenen akıda değişkenlikler göstermişlerdir (Gaskell vd., 2006). Uzun dönem değişkenliğini araştırmak için birçok araç vardır. Bu araçlardan birisi de Lomb–Scargle (L-S) Periodogramdır (Lomb, 1976; Scargle, 1982).

L-S periodogramı, eşit olmayan şekilde örneklenmiş verilerdeki periyodik sinyalleri veya değişimleri tespit etmek ve karakterize etmek için iyi bilinen bir algoritmadır. VanderPlas (2018) çalışmasında verilen bir ışık eğrisi üzerinde (bkz. Şekil 34) açıklamak daha anlaşılır olacaktır. Şekilde verilen ışık eğrisinde değişim olduğu gözle tespit edilebilir ancak, periyodik bir değişim olup olmadığı şekle bakarak anlaşılmaz. Burada da *L-S* periodogram devreye girer. *L-S* periodogramı, bu tür eşit olmayan şekilde örneklenmiş verilerden Fourier benzeri bir güç tayfı oluşturarak periyodik değişimin bulunmasına yardımcı olur. Örneğin, Şekil 33'de verilen ışık eğrisinde 2,58 saatlik bir periyot belirlenmiştir (VanderPlas, 2018). Bu tez çalışmasında hem optik hem de X-ışın uzun dönem ışık eğrileri, *PYTHON* kodu ile hazırlanan *L-S* periodogramı ile analiz edilmiştir.



Şekil 33. VanderPlas (2018) çalışmasından alınan bir ışık eğrisi (sol) ve *L-S* güç tayfı (sağ)

3.2.4. Optik Analizler

Bu tez çalışmasında, *HST* optik ve tayf verileri iki farklı yazılım ile analiz edilmiştir. Bunlardan birincisi, *HST* gözlemlerine özel olarak geliştirilen *DOLPHOT* programıdır. İkincisi, yer tabanlı ve optik uzay teleskopların verilerinin analiz edildiği *NOAO/IRAF v 2.16* (National Optical Astronomy Observatories/Image Reduction ve Analysis Facility) programıdır. *HST* optik verileri için *IRAF*'ta bulunan *DAOPHOT* (Stetson, 1987) yazılımı kullanılmıştır. Sırasıyla M51 ULX-4 ve NGC 1316 X-7 çalışması için *DAOPHOT* ve *DOLPHOT* kullanılmıştır. Bu iki program ve optik analiz yöntemleri aşağıdaki gibi detaylı olarak verilmiştir.

3.2.5. DOLPHOT ve PSF (Point Spread Function) Fotometri

DOLPHOT, genel kullanım için *HSTphot*'tan uyarlanmış bir yıldız fotometri yazılımıdır. *DOLPHOT*, temel görüntü indirgeme rutinleri de dahil olmak üzere bir dizi yardımcı program da içermektedir. *DOLPHOT* literatürde *HSTphot*'un değiştirilmiş bir versiyonu (Dolphin, 2000) olarak isimlendirilmektedir. *DOLPHOT*'un çalışması için başka bir yazılımın yüklenmesi gerekmez, ancak üzerinde çalıştığınız görüntüleri görselleştirmesi için *ds9* gibi araçlara ihtiyaç duyar. Bu çalışmada, *DOLPHOT*'un *PYTHON* dili ile yazılmış (*pydolphot*) versiyonu kullanılmıştır (<https://github.com/dweisz/pydolphot>). *pydolphot*, *python ./make_dolparam.py reference_file* komu ile tüm ön işleme adımlarını yürüten ve bir *DOLPHOT* parametre dosyası oluşturan daha basit bir arayüz sağlar. Örneğin, ilk adım, bir referans görüntüsünü (alt gözlem süreli görüntülerin doğrusal olarak yeniden yapılandırılmış dijital görüntü, *drizzled*) ve tüm alt gözlem süreli görüntülerini (genellikle *flt* veya *flc* görüntüleri) ham dizinden geçerli dizine kopyalar.

Sonraki adım, görüntülerin her birinde *acsmask* (veya *WFC3/WFPC2* görüntüleri için *wfc3mask/wfpc2mask*) paketleri çalıştırmaktadır. *acsmask*, veri kalitesi görüntüsünde kötü olarak işaretlenen tüm pikselleri maskeler ve piksel alanlarıyla çarparak elde edilen görüntülerin ham görüntüde yaklaşık olarak elektron birimlerinde olmasını sağlar. Sonraki adımlarda, görüntü dosyalarını her bir çipe bölen *splitgroups* fonksiyonu ve her çip için her görüntüde *calcsky* fonksiyonu çalıştırmaktır. Buna hem referans hem de alt gözlem süreli (*drizzled* görüntülerinin oluşturulduğu gözlemler) görüntüleri (örn. *flt*) dahildir. *calcsky*, *DOLPHOT* parametrelerinize bağlı olarak, gökyüzü haritasının ilk tahminini veya kesin bir ölçümü sağlayabilen bir gökyüzü görüntüsü oluşturur. Gökyüzü parlaklığının (kaynak ve ardaan dışındaki alan) hesaplaması, söz konusu pikselin etrafındaki bir halkadaki tüm pikselleri alarak yapılır. *calcsky*'yi çalıştırmak ön işleme adımlarını tamamlar ve artık *DOLPHOT* çalıştırabilir. Bu tez çalışmasında, *DOLPHOT* PSF fotometri için 3 piksel yarıçaplı açıklık kullanılmıştır.

3.2.6. DAOPHOT ve PSF Fotometri

DAOPHOT; *HST* gibi kalabalık alanlarda, kaynakların fotometrisi için oldukça uygun bir programdır (Stetson, 1987). Bu program, kaynakları bulma, açıklık fotometrisi, nokta yayılma fonksiyonunu (PSF) elde etme gibi çeşitli görevleri yerine getirir. Kalabalık bölgelerde profil uydurmalarını yinelemeli olarak gerçekleştirir, bu da fotometrinin doğruluğunu artırır. *HST* optik görüntülerinde kaynak belirlemek için *IRAF* yazılımında bulunan *daofind* fonksiyonu kullanılır. Bu paket, görüntülerdeki ardalan üzerinde tanımlanan belirli bir FWHM ve eşik değeri $\times \text{sigma} = \text{sayım}'$ değerinden daha büyük bir tepe genliğine sahip algılanan nesnelere bir listesini yazar. Çıktıya yazılan fiziksel koordinatlarıdır.

Belirlenen kaynakların, parlaklık değerlerinin fiziksel olarak anlamlı olması için arşivlenmiş *HST* optik görüntülerini (drizzled) indirdikten sonra, toplam gözlem süreleri *IRAF*'ta bulunan *imarith* fonksiyonuyla görüntü piksel değerleri ile çarpılır. Daha sonra, *datapars*, *photpars* paketlerin parametreleri yazılır. Burada önemli olan değerler, gözlem süresi ve daha önce deneysel ve teorik olarak *HST* dedektörleri ve filtreleri için belirlenen Vega başlangıç kadir değerleri (Zero Point Magnitude, ZPM) yazılır.

Bu çalışmada, başlangıç kadir değerleri *pysynphot* programıyla elde edildi. Diğer dedektör ve filtreler için bu değerler Sirianni vd. (2015) çalışması gibi diğer çalışmalarda mevcuttur. PSF fotometri için sonraki adım, belirlenen kaynakların fotometrisini yapmaktır. Bunun için, temel parametreler olan, kaynakların açıklık değeri 3 piksel yarıçaplı, ardalan ve kaynak dışı parlaklıklar için sırasıyla 12 ve 18 piksel yarıçaplı alanlar seçilerek *phot* fonksiyonu çalıştırılır. Daha sonra, *psfphot* fonksiyonu ile fotometri çıktısını kullanarak PSF modelleri elde edilir. Bunun için, fotometri çıktısındaki kaynaklar olmak kaydıyla izole ve parlak 50 hedef kaynak seçilir. Son aşama olarak, bu PSF modelleri kullanılarak *allstar* fonksiyonu ile kadir değerleri (parlaklıklar) elde edilir.

3.2.7. Astrometri

ULX'lerin optik karşılıklarının belirlenmesi için astrometrik analizlerle hassas aday kaynak konumları belirlenir. *Chandra* ve *HST* görüntüleri kullanılarak, tez süresince yapılan

araştırmalarla yürütülen yayınlarda (Allak vd., 2022 ve içindeki referanslar) kullanılan yöntem takip edilerek astrometrik hesaplamalar yapıldı. Ayrıca, *Chandra* ve *HST* arasında eşleşen kaynak bulunmadığında *2MASS* veya *GAIA* katalogları da kullanılarak göreli astrometri uygulanabilir. Bu tez çalışmasında, hedef ULX'lerin astrometrisi için *Chandra* ve *HST* arasında gerekli eşleşen ve dolayısıyla referans olarak alınan kaynaklar bulunduğundan, astrometrik hesaplamalar yalnızca bu iki uydu görüntüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Referanslar belirlenirken, kaynakların parlak ancak yaygın olmamasına dikkat edilmelidir. Birden fazla referans bulunduğunda, referansların kayma yönelimleri de aynı olmalıdır. Yapılan astrometrik hesaplamalar aşağıda açıklanmıştır:

Öncelikle, *Chandra* ve *HST* arasında gerekli eşleşen kaynaklar bulunduğunda, bu kaynakların birbiri ile olan uzaklıkları hesaplanır. Bu uzaklıklar, sağ açıklıklar (R.A) ve dik açıklıklar (Decl.) arasındaki farklara dayanır. Daha sonra, hesaplanan farklar kullanılarak standart sapmaları (S) Denklem 3.9 ve Denklem 3.10'daki gibi hesaplanır:

$$S_{R.A} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta R.A_i - \overline{\Delta R.A})^2}{N} \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

$$S_{Decl.} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta Decl._i - \overline{\Delta Decl.})^2}{N} \right]^{1/2} \quad (3.10)$$

Burada, $\Delta R.A_i$, $\Delta Decl._i$, $\overline{\Delta R.A}$ ve $\overline{\Delta Decl.}$ sırasıyla her bir sağ açıklık ve dik açıklık için hesaplanan farkları ve farkların ortalamaları temsil ederken N toplam referans kaynak sayısını gösterir. Astrometrik hesaplamaların sonraki aşamasında, R.A ve Decl. için yay saniyesi (") birimine çevrilmiş ortalama farkların (kaymaların) hatası olarak hesaplanmış standart sapmalar kullanılır. Örneğın, *Chandra* ve *HST* arasındaki toplam hata R.A için Denklem 3.11'deki gibi verilebilir. Benzer durum Decl. için de geçerlidir.

$$Hata_{R.A} = \overline{\Delta R.A} \pm S_{R.A} \quad (3.11)$$

Astrometrik hata yarıçapını hesaplamak için; hesaplanan $S_{R.A}$ ve $S_{Decl.}$ yanı sıra, şimdiye kadar yapılan çalışmalarda 100 foton sayım sayısından fazla olan kaynaklarda, X-ışın ve optik görüntüler arasında 0,1" ortalama bir fark olduğu bilinen bir sabit değer de kullanılmaktadır. Astrometrik hata yarıçapı Denklem 3.12'de verilen bağıntı ile hesaplanır. Bu hata değeri, eğer farklar %68 ($1-\sigma$) güvenilirlikle belirlenirse aynı güvenilirlikte hata yarıçapı hesaplanmış olur. *Chandra* X-ışın koordinatları, türetilen ortalama kayma değerlerinden çıkarılarak optik konumları elde edilir.

$$R_{hata} = \sqrt{(S_{R.A})^2 + (S_{Decl.})^2 + (sabit)^2} \quad (3.12)$$

BÖLÜM 4

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde M51 ve NGC 1316 gökadalarda bulunan ULX'lerin tayfsal, zamansal ve optik özelliklerinin incelenmesiyle elde edilen sonuçlar ayrıntıları ile sunulmuştur. Bölüm 4.1'de, NGC 1316, Bölüm 4.2'de M51 gökadalardaki ULX'lerin analiz ve çıktıları sunulmaktadır.

4.1. NGC 1316'da Yeni bir ULX Kaynağının Tanımlanması

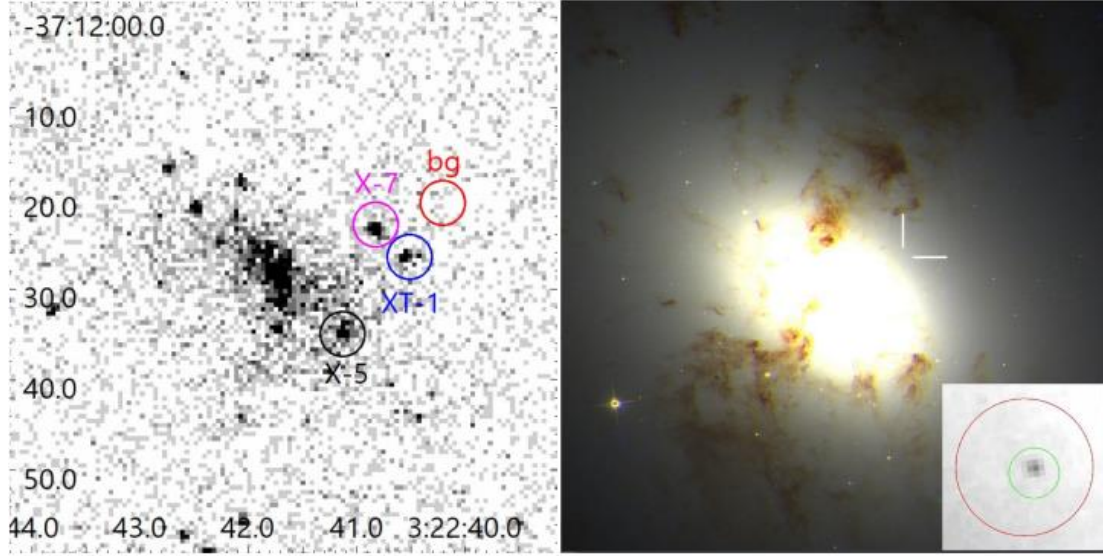
Bu bölümde verilen bilgiler tez kapsamında üretilen Allak vd. (2020) çalışması temel alınarak sunulmuştur.

4.1.1. NGC 1316

NGC 1316 (Fornax A olarak da bilinir), Fornax gökada kümesinin eteklerinde bulunan dev bir eliptik gökadadır. Birçok çalışmada, NGC 1316'nın uzaklığı birbirinden biraz farklı değerlerde (örn. 19.3–20.1 Mpc) dikkate alınmıştır (Jensen vd., 2003; Feldmeier vd., 2007; Stritzinger vd., 2010; Cantiello vd., 2013; Hatt vd., 2018; Lakhchaura vd., 2018; Babyk vd., 2019). Ancak çalışmamızda, NGC 1316'nın uzaklığı 19 Mpc olarak kabul edilmiştir (Jensen vd., 2003). NGC 1316, radyo bandında dev çift radyo lobları ve iyi tanımlanmış çekirdek jet yapısıyla gökyüzündeki en parlak gökadalardan biridir (Geldzahler ve Fomalont, 1984). Gökada, yıldızlararası ortamının halkaları, sayısız gelgit kuyrukları ve kabuk yapıları ile kendine özgü bir morfolojiye sahiptir (Schweizer, 1980, 1981). NGC 1316 ayrıca, Şekil 34'ten görüldüğü gibi optik küçük ekseni boyunca yönlenmiş belirgin toz şeritleriyle birlikte orta kısımda toz bölgelerini de barındırır.

Önceki çalışmalarda, *Chandra* ve *XMM-Newton* arşiv verileri kullanılarak gökadanın birkaç ULX de dahil olmak üzere birçok X-ışın kaynağına ev sahipliği yaptığı bildirilmektedir (Kim ve Fabbiano 2003; Swartz vd., 2004; Liu 2011; Earnshaw vd., 2019). 2001'deki *Chandra* gözlemine dayanarak, Kim ve Fabbiano (2003) NGC 1316'nın D_{25} alanında 81 nokta benzeri X-ışın kaynağı belirlemişlerdir. Burada D_{25} gökadanın $m_B=25$

kadir sınırında ölçülen yüzey parlaklık alanıdır. Aynı çalışmada, oluşturulan kaynak listesine göre, X-ışın ışıması, $L_X \geq 10^{39} \text{erg s}^{-1}$ olan bir kaynak (X29) tanımlanmıştır. Öte yandan, Liu (2011) aynı verileri analiz etmiş ve NGC 1316'da 4 ULX belirlemiştir. Yakın zamanda, Earnshaw vd. (2019), çalışmalarında yukarıda bahsedilen ULX adaylarını *XMM-Newton* verilerini kullanarak belirlediklerini bildirmişlerdir (örn. Şekil 34, X-5 kaynağı).



Şekil 34. Sol: NGC 1316 gökadasının *Chandra ACIS-S* görüntüsü. 2,5" yarıçaplı daireler X-7 (macenta), X-5 (siyah), geçici kaynak XT-1 (mavi) ve ardalanın (kırmızı) konumunu gösterir. Sağ: NGC 1316 gökadasının *HST* RGB görüntüsü (Kırmızı (R): F814W, Yeşil (G): F555W ve Mavi (B): F336W). X-7'nin konumu beyaz çizgilerle işaretlenmiştir. Sağ alt, X-7'nin F555W görüntüsünü temsil eder. Kırmızı ve yeşil daireler, sırasıyla 0,6" yarıçaplı X-7'nin *Chandra* konumunu ve 0,22" yarıçaplı hata alanında X-7'nin astrometrik düzeltilmiş konumunu gösterir. Her iki panel de aynı bölgeyi gösterir. X eksenini R.A. ve y eksenini Decl.'yi göstermektedir. Her iki panelde de kuzey yukarı, doğu sol yönü gösterir

Bu çalışmada, 2019 *Chandra* verilerinin analizi sonucunda X-ışın kaynağı *CXOUJ032240.8-371224*'ün ULX X-7 (bundan sonra X-7 olarak isimlendirilecektir) yeni bir ULX olarak tanımlanmıştır. X-7'nin en yüksek ışıması, 19 Mpc uzaklığı ile 0,3–8 keV enerji aralığında $L_X = 2 \times 10^{39} \text{erg s}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, bu kaynak daha önce Kim ve Fabbiano (2003) tarafından aynı enerji aralığında $L_X = 5,7 \times 10^{38} \text{erg s}^{-1}$ enerjiye sahip X-ışın kaynağı olarak kataloglanmıştır. Bu çalışmada, X-7'nin

X-ışın tayfsal ve zamansal özellikleri yeni arşiv verileriyle daha ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ayrıca *HST* çok bantlı optik gözlemleri kullanarak hassas astrometri işlemleri ile bu kaynağın bir optik karşılığı ilk kez belirlenmiştir.

4.1.2. Gözlemler, Veri İndirgemeleri ve Analizler

NGC 1316, *Chandra ACIS-S* tarafından 2001 yılında bir kez ve 2019'da beş kez gözlemlendi. Ayrıca, bu gökada 2005 ve 2009 yılları arasında *XMM-Newton* tarafından dört kez gözlemlendi, ancak bu gözlemlerden sadece ikisi X-7'nin konumunu içermektedir. Bununla birlikte, *XMM-Newton*'un uzaysal çözünürlüğü, bu iki gözlemde X-7'nin konumunu çözmek için yeterli değildir. NGC 1316, 2006 ve 2020 yılları arasında *Swift-XRT* tarafından birçok kez gözlenmiştir ancak X-7 kaynağı bu gözlemlerde net bir şekilde çözümlenememiştir. Bu nedenle, bu çalışmada sadece *Chandra ACIS-S* gözlemleri kullanılmıştır. Gözlemlerin ayrıntılı listesi Tablo 3'de verilmiştir.

Chandra verileri, kalibrasyon dosyaları *CALDB* v4.9 ile *CIAO* v4.12 yazılımı kullanılarak analiz edildi. *CIAO* bulunan *wavdetect* fonksiyonu kullanılarak X-ışın kaynakları tespit edildi. C6 verisini kullanarak X-7' nin koordinatları R.A = 03:22:40,813 (saat: dakika: saniye) ve Decl. = -37:12:23,47 (°: ': ") olarak belirlenmiştir. Kim ve Fabbiano (2003) tarafından verilen ilk koordinatlar arasındaki farklar, R.A için 0,20" ve Decl. için 0,53" olarak belirlenmiştir. X-7, gökada merkezinden 12" uzakta bulunmaktadır ve kaynağın konumu, Şekil 34'teki *Chandra* ve *HST* görüntülerinde gösterilmektedir.

Kaynak ve ardaalan fotonları, 2,5" yarıçaplı dairelerden (bkz. Şekil 34) seçilerek *specextract* fonksiyonu kullanılarak belirlenmiş ve bu verilerinin tayfsal analizleri, *XSPEC* yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. *Chandra* 2019 gözlemlerinden foton sayıları ≤ 50 olanlar kaynaklar, tayfsal analizler için yeterli veri istatistiğine sahip olmadıkları için tayfsal modeller uygulanamamıştır. Bu yüzden sadece C5 (ObsID 20341) ve C6 (ObsID 22187) olarak etiketlenmiş gözlemler kullanılmıştır. *Güç-yasası* (*PL* ya da *power-law*), çok renkli-disk karacisim (*DISKBB*) ve karacisim (*body*) gibi birkaç tek bileşenli modeller, X-7'nin enerji tayfını temsil edebilecek en iyi modelleri bulmak için seçilmiştir. Ayrıca kaynak tayfını modellemek için *DISKBB* + *güç-yasası* gibi sık kullanılan iki bileşenli modeller de denenmiştir. Ancak, bu iki bileşenli modeller, C5 ve C6 verileri için istatistiksel ve fiziksel

parametreleri anlamlı olan sonuçlar elde edilememiş ve bu kaynak için iki bileşenli modeller dışlanmıştır.

Tablo 3

X-7'nin X-ışın ve optik gözlemlerine ait bilgiler

Detektör	Etiket/Filtre	Gözlem No.	Gözlem Zamanı	Poz süresi (ks)
X-ışın				
<i>Chandra/ACIS-S</i>	C1	2022	2001-04-17	29,85
<i>Chandra/ACIS-S</i>	C2	20340	2019-04-16	44,97
<i>Chandra/ACIS-S</i>	C3	22179	2019-04-17	38,95
<i>Chandra/ACIS-S</i>	C4	22180	2019-04-20	13,57
<i>Chandra/ACIS-S</i>	C5	20341	2019-04-22	51,39
<i>Chandra/ACIS-S</i>	C6	22187	2019-04-25	53,18
Optik				
<i>HST/ACS/WFC</i>	F555W	j6n202010	2003-03-04	6,98
<i>HST/ACS/WFC</i>	F814W	j6n201030	2003-03-07	2,20
<i>HST/ACS/WFC</i>	F475W	j90x01020	2005-02-16	0,76
<i>HST/WFC3/UVIS</i>	F336W	ib3n03040	2010-07-30	3,23
<i>HST/WFC3/IR</i>	F555W	ib3n03030	2010-07-30	0,40

İlk olarak, her model iki soğurma bileşeni (*TBABS*) kullanarak denenmiştir. Birinci bileşen, soğurmaya temsil eden $N_H = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ gibi sabit bir Galaktik değer (Dickey ve Lockman, 1990) kullanılmıştır ve NGC 1316'nın soğurma değeri için ikinci bir soğurma bileşeni, serbest parametre olarak seçilmiştir. Ancak, serbest soğurma bileşeni ihmal edilecek kadar küçük ($< 10^{-7}$) çıktığı için sadece Galaktik soğurma bileşeni kabul edilmiştir. Eşyönlü ışınım için soğurulmamış (unabsorbed) akı, *XSPEC*'te mevcut olan *cflux* fonksiyonu kullanılarak 0,3–10 keV enerji aralığında hesaplanmıştır. Bu akılara karşılık gelen Lx, 19 Mpc mesafe baz alınarak hesaplanmıştır. C5 ve C6 gözlemleri için nispeten

düşük kaynak foton sayımları nedeniyle, tayfsal modeller için *C-stat* istatistiği kullanılmış ve tayflar en az 5 foton olacak şekilde gruplandırılmıştır. X-7'nin tayfını en iyi temsil eden model ve parametreler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4

X-7'nin tayfsal model parametreleri

Parametreler	Birimler	<i>güç-yasası</i>	<i>DISKBB</i>	<i>bbody</i>
C5 verisi				
Γ	...	2,24±0,36	...	...
T_{in}/kT	keV	...	0,78 ± 0,06	0,50 ± 0,06
N_{PL}	10 ⁻⁶	8,04±1,87	...	...
N_{diskbb}	10 ⁻⁴	...	0,31 ± 0,05	...
N_{bbody}	10 ⁻⁷	...	...	2,57 ± 0,40
<i>C-stat/dof</i>	...	23,79/21	21,11/21	25,80/21
L_X	10 ³⁹ ergs ⁻¹	1,77±0,23	1,10±0,13	0,92 ± 0,07
C6 verisi				
Γ	...	1,56 ± 0,36	...	...
T_{in}/kT	keV	...	1,37 ± 0,27	0,74 ± 0,10
N_{PL}	10 ⁻⁶	5,20 ± 1,30	...	...
N_{diskbb}	10 ⁻⁴	4,80 ± 0,76	...	...
N_{bbody}	10 ⁻⁷	...	...	3,35 ± 0,58
<i>C/dof</i>	...	27,58/27	24,71/27	26,14/27
L_X	10 ³⁹ ergs ⁻¹	2,10 ± 0,26	1,47 ± 0,20	1,21 ± 0,19

Not: Γ , *güç-yasasından* elde edilen foton indisini, T_{in} ve kT ise sırasıyla *DISKBB* ve *bbody* modelinden elde edilen disk sıcaklığını temsil eder. N_{PL} , N_{diskbb} ve N_{bbody} sırasıyla *güç-yasası*, *DISKBB* ve *bbody* modellerinin normalizasyon parametrelerini temsil eder. L_X 0,3-10 keV enerji aralığında d=19 Mpc için soğurulmamış ısıtma değerini gösterir.

X-7'nin akısında periyodiklik ve pulsar benzeri sinyaller aramak için, diğerlerinden daha iyi veri istatistiklerine sahip C6 veri seti kullanıldı. X-7'nin X-ışın ışık eğrisi, *CIAO*'da

bulunan *dmextract* fonksiyonu kullanılarak 3,2 s aralıklarına bölünmüştür. *HEASOFT* v6.27'de *XRONOS* v6.0 yazılımı kullanılarak güç yoğunluğu tayfları (Power Density Spectrum, PDS) elde edildi. PDS, ilk önce tek bir zaman aralığında (tüm gözlem süresi) hesaplandı ve daha sonra farklı zaman aralıklarında elde edilmiş altı PDS üretildi. Bu aralıklar dahil olmak üzere, C6 verisinde bazı zayıf sinyaller olsa da herhangi bir güçlü sinyal ya da periyodik değişim belirlenemedi. Ancak, zayıf sinyaller için olası bir sinüzoidal değişim olasılığı düşüncesiyle üst limitler ile bu zayıf sinyallerin puls kesirleri ya da puls genlikleri (puls fraction, PF) olarak adlandırılan sinyal güvenilirlikleri test edildi. 0,001-0,1 Hz. aralığında, Esposito vd. (2015) çalışmasındaki verilen Denklem 4.1 bağıntısı kullanılarak olası bir sinüzoidal değişimin puls kesri 3σ üst limitle %26 olarak hesaplandı.

$$PF = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{max}} \quad (4.1)$$

Burada, f_{max} ve f_{min} sırasıyla kaynağın 0,3-10 keV enerji aralığında sahip olduğu en yüksek ve en düşük akı değerlerini temsil etmektedir.

Ayrıca, X-7'nin kısa ve uzun dönem foton sayım oranı değişkenliğini de araştırılmıştır. Kısa dönem değişkenliği için, kaynağın ışık eğrisi, C6 verisi kullanılarak 0,3–10 keV enerji bandında 100 s, 500 s ve 1000 s aralıklara bölünmüştür. Elde edilen, ışık eğrileri, Kolmogorov-Smirnov (K-S) testi kullanılarak kaynak sayım oranlarındaki kısa dönem değişimler için kullanılmıştır. K-S test olasılıkları $>0,3$ olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, X-7'nin önemli bir değişkenlik göstermediğini ortaya koymaktadır.

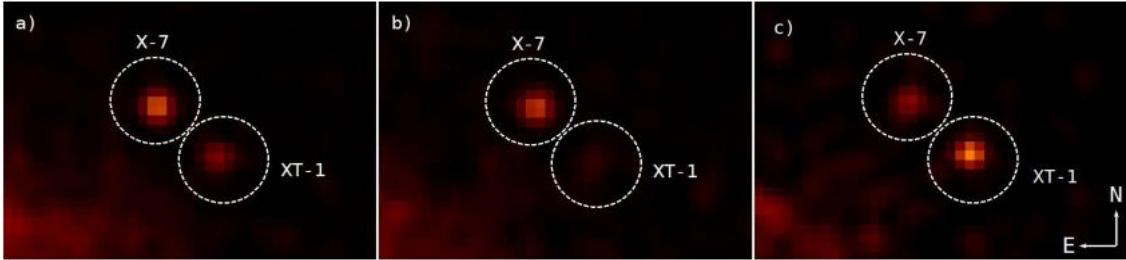
X-7'nin uzun dönem değişkenliğini de araştırmak için Denklem 4.2 'den yararlanılmıştır:

$$D = \frac{\sum_{n=1}^N \left(\frac{S_N - \bar{S}}{H_N} \right)^2}{N} \quad (4.2)$$

Burada, N gözlem sayısını, S_N ve H_N sırasıyla her bir gözlem için foton sayım oranını ve hata değerini ve son olarak \bar{S} tüm gözlemlerden elde edilen ortalama sayım oranını temsil etmektedir. $D \geq 2$ olduğu durumlarda kaynak uzun dönem değişimi gösterdiği kabul edilir.

X-7 için $D = 5$ olarak hesaplanmıştır. Nötron yıldızı içeren ULX'ler genellikle uzun dönem değişimleri çok belirgindir. Ayrıca, uzun dönem akı değişkenlikleri iki modludur (bi-modal). X-7 için bu özelliklere bakmak için daha çok gözlemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Ayrıca çalışmamızda, X-7'nin $\sim 6''$ güneybatısında, R.A= 03:22:40.55 (saat: dakika: saniye) ve Decl.= -37:12:26.45 (°: ': ") konuma sahip geçici bir ULX adayı tanımlandı (bkz. Şekil 35). Bu kaynak aynı zamanda Kim ve Fabbiano (2003) listesinde *CXOU J032240,5-371227* olarak isimlendirilmiş ve $L_X = 3,34 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada, tüm veriler kullanarak, bu geçici kaynağın foton sayım oranları hesaplandı. Bu foton sayım oranları, *CIAO* da bulunan *SRCFLUX* fonksiyonu ile aynı $N_H = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ ve foton indeksi $\Gamma = 1,7$ olan bir *güç-yasası* modeline uydurularak 0,3-10 keV enerji aralığında akılara çevrilmiştir. C2 ve C4 verilerinin akı değerleri $(0,16 \pm 0,04) \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (en düşük akı) ve $(2,31 \pm 0,56) \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (en yüksek akı) olarak bulundu. En yüksek akı $\sim 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ olarak ısıtma değerine karşılık gelir. Bu çalışmada, XT-1 olarak adlandırılan geçici ULX'in konumu Şekil 35'da gösterilmiştir.



Şekil 35. *Chandra* gözlemlerinde X-7 ve XT-1'in karşılaştırılması (C1: a, C2: b ve C4: c). X-7 ve XT-1 konumları kesikli beyaz dairelerle gösterilmektedir. C2 gözleminde XT-1'in tespit edilmediği açıkça görülmektedir. Tüm paneller aynı büyüklükte ve ölçektedir ($19'' \times 16''$)

Optik analizler için kullanılan *HST* gözlemlerinin bilgileri Tablo 3'de verilmiştir. X-7'nin optik karşılığını bulmak için *Chandra* (ObsID 22187) ve *HST/ACS* (ObsID j6n202010) görüntüleri arasında görelî astrometri gerçekleştirilmiştir. *Chandra* ve *HST/ACS* görüntülerinde kaynak tespiti için sırasıyla *wavedetect* ve *daofind* fonksiyonları kullanıldı ve bu görüntülerinin karşılaştırılmasından dokuz referans kaynak belirlendi. Referans kaynaklarının özellikleri Tablo 5'te özetlenmiştir. Referans kaynaklarının her biri arasındaki

konum belirsizlikleri %90 güven seviyesi ile hesaplanmıştır. *Chandra* ve *HST* görüntüleri arasındaki astrometrik hatalar sırasıyla R.A. ve Decl. için 0,09" ve 0,07" olarak hesaplanmıştır. Astrometrik düzeltme sonucunda X-7'nin *HST* koordinatları RA= 03:22:40,81 ve Decl.= -37:12:23,52 ve astrometrik hata yarıçapı %95 güven aralığında 0,22" olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5

Chandra görüntülerinde görel astrometri için seçilen referans kaynakların konumları ve özellikleri.

Chandra R.A.	Chandra Decl.	Foton sayısı	HST R.A	HST Decl.	Ayrıklık (")
3:22:42,719	-37:12:16,63	39,20 ± 7,00	3:22:42,728	-37:12:16,60	0,16
3:22:42,066	-37:12:18,23	36,11 ± 7,14	3:22:42,055	-37:12:18,26	0,13
3:22:42,484	-37:12:21,06	56,50 ± 9,11	3:22:42,457	-37:12:20,99	0,37
3:22:42,596	-37:12:06,32	08,92 ± 3,16	3:22:42,600	-37:12:06,24	0,11
3:22:41,153	-37:11:43,92	15,70 ± 4,58	3:22:41,172	-37:11:44,26	0,48
3:22:41,318	-37:11:17,09	22,02 ± 5,00	3:22:41,297	-37:11:17,13	0,29
3:22:39,123	-37:11:47,97	66,18 ± 8,49	3:22:39,120	-37:11:48,00	0,05
3:22:37,710	-37:12:51,05	18,11 ± 4,47	3:22:37,690	-37:12:51,13	0,28
3:22:44,729	-37:13:10,03	09,76 ± 3,32	3:22:44,713	-37:13:10,09	0,22

Kaynağın PSF fotometrisi, Tablo 3'de listelenen *HST* verileri kullanılarak *DOLPHOT* v2.0 (Dolphin, 2000) ile gerçekleştirilmiştir. *ACS*, *WFC3/UVIS* ve *WFC3/IR* için parametre seti kullanılarak Vega kadir değerleri hesaplanmıştır. *DOLPHOT* için, sırasıyla *ACS* ve *WFC3* için konumsal referans olarak j6n202010 ve ib3n03030 gözlem numaralı drizzled görüntüleri seçilerek fotometrik sonuçlar elde edilmiştir.

Arşivlenmiş *HST/ACS* ve *HST/WFC3* verilerini kullanarak X-7 için %95 güvenirlikle 0,22" hata yarıçapında bir optik aday belirlenmiştir (bkz. Şekil 35). Bu hata alanı içinde tek bir optik kaynak %95 gibi yüksek bir güvenirlilik seviyesinde belirlenmiştir.

Vega kadir değerleri ve Johnson sistemine dönüştürülmüş parlaklıklar Tablo 6'da verilmiştir. Parlaklıklar, Galaktik sönmleme $A_V = 0,058$ kadir (Schlafly ve Finkbeiner, 2011) değeri ile düzeltilmiştir. *HST/ACS*'deki F475W, F555W ve F814W filtreleri sırasıyla Johnson B, V ve I filtrelerine karşılık gelmektedir (Sirianni vd., 2005; Saha vd., 2011). X-7'nin renk değerleri $B-V=0,77$, $V-I=1,10$ kadir ve mutlak parlaklığı $M_V = -7,80$ kadir olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6

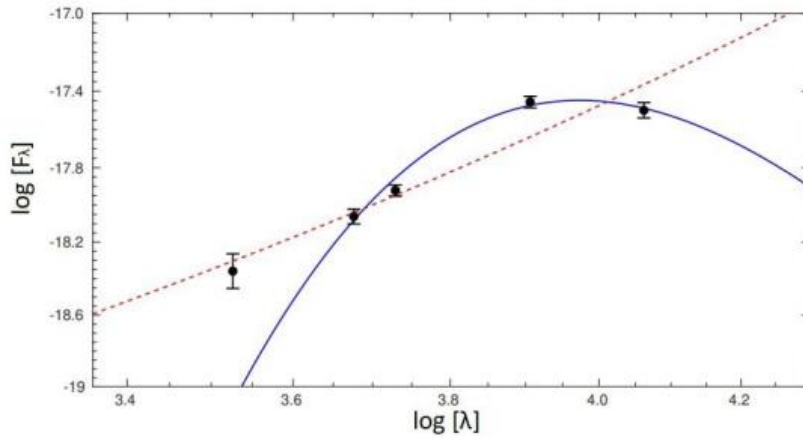
X-7'nin optik karşılığının sönmleme değeri ($A_V = 0,058$ kadir) ile düzeltilmiş kadir ve akı değerleri

Dedektör	Filtre	Dalgaboyu ($10^{-10}m$)	Vega (Kadir)	Johnson Parlaklığı (Kadir)	Akı $\times 10^{-14}$ ($erg\ cm^{-2}s^{-1}$)
<i>ACS/WFC</i>	F475W	4746,7	$24,05 \pm 0,06$	(B) $24,40 \pm 0,06$	$0,86 \pm 0,02$
<i>ACS/WFC</i>	F555W	5360,8	$23,70 \pm 0,03$	(V) $23,63 \pm 0,03$	$1,19 \pm 0,01$
<i>ACS/WFC</i>	F814W	8044,8	$22,54 \pm 0,02$	(I) $22,53 \pm 0,02$	$3,49 \pm 0,01$
<i>ACS/WFC3</i>	F336W	3354,8	$24,79 \pm 0,21$	...	$0,43 \pm 0,08$
<i>ACS/WFC3</i>	F110W	11534,5	$22,64 \pm 0,15$	...	$3,16 \pm 0,02$

Tablo 6'da verilen akı değerleri kullanılarak, optik adayın spektral enerji dağılımı (Spectral Energy Distribution, SED), X-7 çift sisteminin tayfsal özelliklerini araştırmak için oluşturulmuştur. *PYSYNPHOT* kullanarak elde edilen dalgaboyların pivot değerleri filtrelerin dalgaboyları angström (Å) olarak seçilmiştir. Optik aday için SED, (1) 3100 ± 400 Kelvin (K) sıcaklığa sahip bir karacisim tayfı veya (2) $\alpha = 1,75 \pm 0,35$ olan bir güç-yasası tayfı ($F \propto \lambda^\alpha$) ile uyum göstermiştir. X-7'nin SED'i Şekil 36'da gösterilmiştir. Karacisim tayfını elde etmek için *MATLAB*'da bulunan *optimset* ve *fminsearch* fonksiyonları kullanılmıştır. Karacisim ve güç-yasası için indirgenmiş χ^2 değerleri sırasıyla 1,34 ve 1,27'dir. Her iki model için de serbestlik derecesi sayısı 3'tür.

4.1.3. Tartışmalar

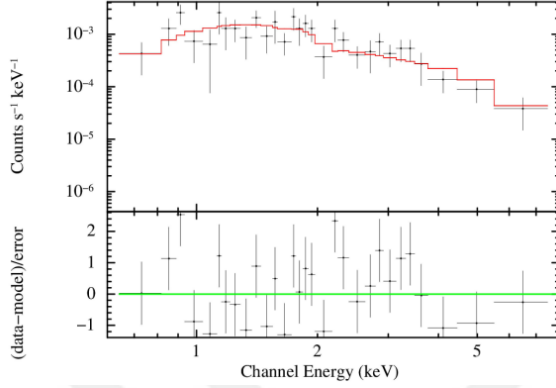
Bu çalışmada, Nisan 2019 *Chandra* gözlemleri kullanarak NGC 1316'da $L_X = 2,1 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ olan yeni bir ULX tanımlanmıştır. Bu ışıltma, Nisan 2001'de alınan *Chandra* verilerinden elde edilen değerden neredeyse ~ 4 kat daha yüksek bir değere sahiptir. X-7 'nin X-ışın tayfsal özelliklerini yorumlamak için tek bileşenli X-ışın modellerden en iyi uyan spektral parametreleri elde edilmiştir. Bu parametreler, ikinci soğurma bileşeni önemli ölçüde katkıda bulunmadığından, yalnızca Galaktik $N_H = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ ile foton indeksleri C5 için $\Gamma = 2,24$ ve C6 için 1,56 olarak *güç-yasası* modelinden elde edilmiştir. Kaynak, C5 ve C6 verilerinde sırasıyla 0,3–10 keV'de $\sim 1,8 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ ve $2,1 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ soğurulma çıkarılmış ışıltma değerlerine sahiptir. Bu değerler ayrıca Tablo 4'de listelenmiştir.



Şekil 36. X-7 optik adayının SED grafiği. Tüm veriler içi dolu siyah dairelerle ve veriler hata değerleri ile gösterilmiştir. *Karacisim* modeli mavi düz çizgi ile *güç-yasası* modeli kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmektedir. *Karacisim* $3100 \pm 400 \text{ K}$ sıcaklığa sahiptir ve *güç-yasası* modeli $\alpha = 1,75 \pm 0,35$ 'tir. y ve x eksenlerine ait değerlerin birimleri sırasıyla $\text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ve Å 'dir

Güç-yasası modeline uyan X-7'nin X-ışın enerji tayfı Şekil 37'de gösterilmektedir. Kaynak tayfları ayrıca *DISKBB* modeline $T_{in} = 0,78 \text{ keV}$ (C5) ve $1,32 \text{ keV}$ (C6) disk sıcaklıkları ile uyum göstermiştir. Uyum gösteren diğer model ise *bbody* modelidir. Tablo

4’de görüldüğü gibi benzer C -stat /dof değerleri nedeniyle bu üç model arasında ayırım yapmak zordur.



Şekil 37. C6 verisinden elde edilmiş X-7’nin enerji tayfını temsil eden *güç-yasası* modeli (üst) ve model artıkları (alt)

Chandra verilerinin tayfsal analizlerinde, C5 ve C6’daki X-7 tayflarının foton indeksleri $\Gamma \sim (2,24$ ve $1,56)$ olan *güç-yasası* modelleri ile daha iyi temsil edildiği söylenebilir. Γ değerlerinin her ikisi de Galaktik karadelik çiftleri için tanımlanan sert (hard) durumlara karşılık gelir. Düşük ışıtmaya sahip sert durumlar, *Eddington* altı (*sub-Eddington*) kütle yığılma oranlarında görülür. Öte yandan, *DISKBB* modeli de aynı veri setleri için $T_{in} \sim (0,78$ ve $1,32)$ keV sıcaklık ile kabul edilebilir uyumlar vermektedir. Bu T_{in} değerleri, termal durum sırasında yüksek kütle artış hızında Galaktik karadelik çiftleri ile uyumludur (Remillard ve McClintock, 2006). Genellikle Galaktik karadelik çiftlerinde ışıtmalar, yüksek enerjilerde sert durum düşük enerjilerde ise yumuşak durum (soft) olarak tanımlanır. Bununla birlikte, X-7 sert durumdayken yüksek L_X değerine ve yumuşak durumdayken düşük L_X değerine sahip olduğundan tam tersi bir davranış sergilediği gözlenmiştir.

Tıkız nesne kütlelerinin tahmin edilmesi için *DISKBB* modelinin normalizasyon parametresi sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun için, Makishima vd. (2000) verdiği iç disk yarıçapı ve kütle arasındaki ilişkiden (Denklem 4.3) yararlanılarak kaynağın en iyi uyum gösterdiği (C5 ve C6 veri setleri için) *DISKBB* modelinin normalizasyon değeri (Denklem 4.4) kullanılmıştır

$$R_{iç} \equiv K^2 \varepsilon r_{iç} \sqrt{\cos \theta} \quad (4.3)$$

$$N_{DISKBB} = \left(\frac{r_{iç}}{D_{10}} \right)^2 \times \cos \theta \quad (4.4)$$

Denklem 4.3’de verilen, düzeltme faktörü $\varepsilon = 0,4$, tayfsal faktör $K = 1,7$, görünür disk yarıçapı $r_{iç}$ ve θ disk görünüş açısını temsil etmektedir (Shimura ve Takahara 1995; Kubota vd., 1998). Denklem 4.4’de verilen, D_{10} kaynağın 10 kpc birimindeki uzaklığını göstermektedir. Verilen denklemlerle tıkız nesnenin kütlesi $\sim 8 M_{\odot}$ olarak hesaplanmıştır.

HST/ACS ve *HST/WFC3* arşiv verilerini kullanarak NGC 1316’deki X-7’nin optik özellikleri incelenmiştir. Astrometrik düzeltmeden sonra 0,22" hata yarıçapı içinde bir optik aday tespit edilmiş ve Tablo 6’da görüldüğü gibi, optik adayın görünür parlaklığı ($m_V > 22,5$ kadir) olarak belirlenmiştir. Bu değer diğer birçok ULX’in optik karşılığının değeri gibi sönüktür. Optik ışımının donör yıldızdan geldiğini varsayarak oluşturulan, SED’i (Şekil 39’da görüldüğü gibi) bir *karacisim* ve/veya *güç-yasası* modeline uyum göstermiştir. *Güç-yasası* modeli için en uygun parametre $\alpha = 1,75 \pm 0,35$ ’tir ve *bbody* modelinden sıcaklık 3100 ± 400 K olarak elde edilmiştir. Her iki model de benzer indirgenmiş χ^2 değeri vermesine rağmen, *güç-yasası* için α parametresi -3 ve -4 aralığında değildir. Bu aralık, birçok ULX’in optik karşılıkları için oluşturulan SED’lere uyum gösteren *güç-yasası* modelinin α parametresi aralığında değildir. (Tao vd., 2011; Vinokurov vd., 2018). Bu durumda optik ışımının disk kaynaklı olmadığı söylenebilir. Bu durumda X-7 için, *bbody* modelinin daha uygun olduğu sonucu çıkar. Straizys ve Kuriliene (1981) çalışması, X-7’nin donörün ölçülen sıcaklığı ve mutlak parlaklığı M tipi bir süperdev olabileceğini gösterir. Benzer tipte donörler Gladstone vd. (2013) çalışmalarında NGC 3034 ULX-5, NGC 253 ULX-1 ve ULX-2 kaynakları içinde tanımlanmıştır.

Optik ışımının geldiği bölgenin boyutunun, optik ışımının, X-ışınlarının yeniden üretimi (reprocessed) kaynaklandığı bir resimle tutarlı olup olmadığını kontrol etmek mümkündür (Tao vd., 2011). Tao vd. (2011) çalışmalarında verilen Denklem 4.5’de ile optik ışımının yayıldığı alanın boyutu hesaplanmıştır.

$$\eta = \frac{\sigma T^4 \times A}{L_X} \quad (4.5)$$

Burada η , X-ışın parlaklığının bir kesri olmak üzere, σ , T ve A , sırasıyla *Stefan–Boltzmann* sabiti, sıcaklık ve bölgenin alanıdır. $T=3100$ K, $A \sim 10^{27} \text{ cm}^2$ ve $L_X = 2 \times 10^{39} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-5}$ değerleri Denklem 4.5'teki kullanıldığında $\eta=0,002$ olarak türetilmiştir. Bu değer, XTE J1817–330 ve Holmberg IX X-1 gibi Galaktik karadelik çiftler için elde edilen değerle uyumlu olduğundan (Gierliński vd., 2009; Tao vd., 2011) X-7 sisteminin bir karadelik çifti olma olasılığı bulunmaktadır.

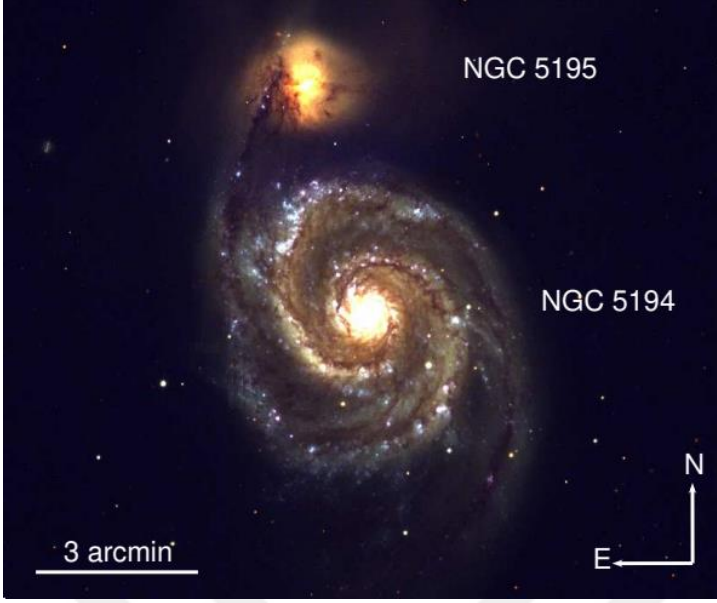
Ek olarak, Liu (2011) çalışmasında daha önce belirlenen ULX'lerin (X-3, X-4 ve X-5) optik adaylarının ve ayrıca NGC 1316'daki yeni tanımlanan geçici kaynak XT-1'in optik özellikleri de araştırılmıştır. X-5 kaynağın 0,22" hata yarıçapında tek bir optik karşılığı belirlenmiş olup V-bandında parlaklığı $23,1 \pm 0,03$ kadir olarak hesaplanmıştır. Bu aday, CDS (Centre de Données astronomiques de Strasbourg) veri tabanındaki herhangi bir kaynakla ilişkili değildir. Ayrıca, kaynak XT-1'in *HST* görüntülerinde bir optik karşılığı belirlenememiştir.

4.2. M51'de Geçici Aşırı Parlak X-ışın Kaynağı, ULX-4

Bu kısımda verilen bilgiler tez çalışmalarında üretilen Allak vd., (2022) çalışması temel alınarak yazılmıştır.

4.2.1 M51 (NGC 5194)

Girdap (whirlpool) gökadası olarak da bilinen M51(NGC 5194) ve eşlikçi gökada NGC 5195, Av Köpekleri Takımyıldızı içinde yer alan, etkileşim halindeki bir çift gökadadır (bkz. Şekil 38).



Şekil 38. NGC 5194 ve NGC 5195 gökadalalarının üç renk mozaik SDSS görüntüsü (<https://dr12.sdss.org/mosaics/>)

Görünümü tamamen bize dönük (face-on) olan sarmal gökada M51, düşük parlaklığa sahip bir Seyfert 2 çekirdeğine sahiptir ve 9 Mpc uzaklıkta yer almaktadır (Rodríguez vd., 2014; Song vd., 2020). M51'in sarmal kollarının dikkat çekici yönü, çok simetrik olmaları, sürekli ve düzenli toz şeritlerine sahip olmaları ve yaygın yıldızlararası ortamın varlığının bir sonucu olarak yıldız oluşum fabrikalarını içeren yapılar olmalarıdır (Block vd., 1997). Bu nedenle M51, ULX'ler de dahil olmak üzere noktasal X-ışın kaynaklarını incelemek için iyi bir hedef gökadadır.

Önceki çalışmalarda, M51'deki X-ışın kaynakları, *ROSAT/HRI* gözlemleri kullanılarak araştırıldı. Tespit edilen dokuz X-ışın kaynağından sadece üçünün X-ışın ışıtmaları ULX seviyesindeydi ($L_X > 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$) (Roberts ve Warwick 2000; Colbert ve Ptak 2002). Ayrıca gökada çiftinde (NGC 5194/5195) 113 X-ışın kaynağı, 2000 ve 2001 *Chandra ACIS-S* gözlemleri kullanılarak Terashima ve Wilson (2004) tarafından tespit edilmiş ve bu kaynaklardan yedisinin 0,5–8 keV enerji aralığında $L_X > 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Daha sonra, Dewangan vd., (2005) bu yedi ULX'i doğruladı ve bir *XMM-Newton EPIC* gözlemi kullanarak yeni bir ULX kaynağını belirledi. Aynı çalışmada, belirlenen tüm X-ışın kaynakların hem kısa hem de uzun dönemli değişimlerini ayrıntılı olarak incelediler.

Urquhart ve Soria (2016), *Chandra* ve *XMM-Newton* arşiv verilerini analiz ederek, M51'in aynı bölgesinde ULX-1 ve ULX-2'de X-ışın tutulmalarının keşfini sunmuşlardır. ULX-1'in ikili periyodunun ya 6,3 gün ya da 12,5-13 gün ile sınırlandırıldığını bildirdiler. Ayrıca Urquhart vd., (2018), bu ULX'lerin optik özelliklerini *HST*, *LBT* (Large Binocular Telescope) ve *VLA* (Very Large Telescope) gözlemlerini kullanarak araştırmış ve her iki ULX'in de iyonize bulutsularla ilişkili olduğunu belirlemişlerdir.

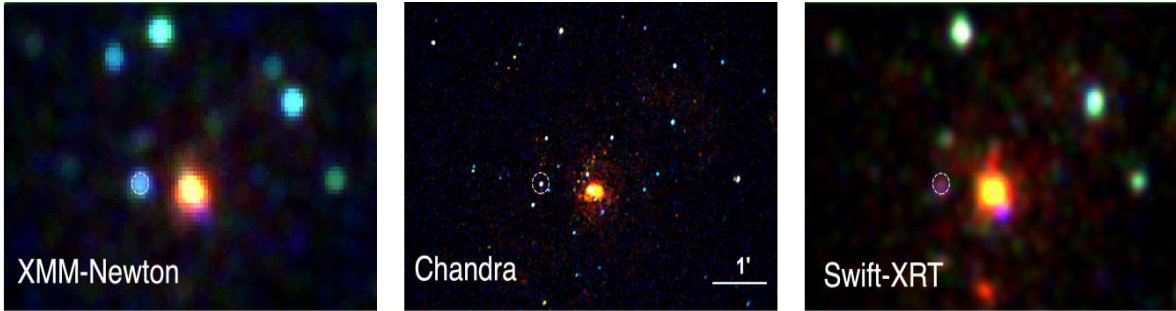
Rodriguez Castillo vd., (2020), *XMM-Newton* verilerini kullanarak M51 ULX-7'nin X-ışın bandında 2,8 s periyodunda titreşimler veya atımlar keşfettiler. Değişken kaynak ULX-7, $(10^{39} - 10^{40}) \text{ erg s}^{-1}$ arasında L_X 'e sahiptir ve gözlenen parlaklık dikkate alınarak $10^{12} G \leq B_{\text{dipol}} \leq 10^{13} G$ aralığında bir dipol alan bileşeni önerilmiştir. Genlikte büyük farklılıklar olan sinüzoidal bir sinyal (puls) varlığını bildirdiler. Bulgularına göre, sistem devasa bir OB devi veya süperdev donöra sahiptir. Ayrıca, Brightman vd., (2020), ULX-7 için 38 günlük bir süper-yörünge periyodu bulduklarını rapor ettiler ve $10^{40} \text{ erg s}^{-1}$ bir pik parlaklığına ulaşan yeni bir geçici ULX, XT-1 tanımladılar.

M51 çok sayıda geçici X-ışın kaynağına ev sahipliği yapmaktadır. Bunlardan biri ULX-4'tür. ULX-4'ün ilk tespiti Terashima ve Wilson (2004) tarafından rapor edilmiştir. ULX-4'ün akı değerinin (Tablo 2'de kaynak 37), 2000 ve 2001 *Chandra* verilerinin analizinden 0,5-8 keV enerji aralığında değiştiğini vurguladılar. Ayrıca ULX-4, Swartz vd. (2011) tarafından M51'de kataloglanan 8 ULX'ten biridir. Son zamanlarda, Earnshaw vd. (2018), Song vd. (2020) ve Brightman vd. (2020), *XMM Newton*, *Chandra* ve *Swift-XRT* gözlemlerini kullanarak ULX-4 dahil olmak üzere M51'deki bazı ULX'lerin uzun dönem akı değişkenliğini incelemişlerdir.

Bu çalışmada temel amaç, geçici ULX-4 kaynağın doğasını ve potansiyel optik karşılığını belirlemektir. Bu hedeflere yönelik olarak, *XMM-Newton*, *Chandra* ve *Swift-XRT* arşiv gözlemleri kullanılarak ULX-4'ün X-ışın gözlemlerinin kapsamlı tayfsal ve zamansal analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu gözlemlerin bir kısmı, bu kaynağın önceki çalışmalarında kullanılmamıştır. Ayrıca, ULX-4'ün olası optik karşılıklarını belirlemek amacıyla *HST* arşiv gözlemlerinden kapsamlı bir şekilde yararlanılmıştır.

4.2.2. Gözlemler, Veri İndirgemeleri ve Analizler

ULX-4 20 yıl boyunca *XMM-Newton*, *Chandra* ve *Swift-XRT* ile birçok kez gözlemlendi. Çalışmamızda kullanılan *XMM-Newton* ve *Chandra* gözlemlerinin detayları Tablo 7'de verilmiştir. Kaynağın *XMM-Newton*, *Chandra* ve *Swift-XRT*'den alınan gerçek renkli görüntüleri Şekil 39'da gösterilmiştir.



Şekil 39. ULX-4'ün üç renk X-ışın (Kırmızı: 0,3-1 keV, Yeşil: 1-2 keV ve Mavi: 2-7 keV) görüntüleri. Sol panel: *XMM-Newton* (XM5), orta panel: *Chandra* (C12) ve sağ panel: *Swift-XRT* (30083 gözlem numaralı birleştirilmiş gözlemleri). Görüntüler 3" Gauss ile düzleştirildi (smoothed). ULX-4 kaynağı kesikli beyaz dairelerle gösterilmiştir. Üç görüntünün tümü aynı bölgeyi gösterir ($4,9' \times 7,4'$). Tüm panellerde kuzey solda ve doğu yukarı yönlüdür

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. Bu gözlemler çok farklı poz sürelerine sahiptir. Örneğin, minimum poz süresi 5 s ve maksimum poz süresi 6857,3 s'dir. Ancak, çoğunlukla gözlemlerin poz süreleri 1500 s civarındadır.

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. $FLAG=0$ ile $PATTERN \leq 12$ ve $PATTERN \leq 4$ 'e karşılık gelen fonksiyonlar sırasıyla *EPIC-MOS* ve *pn* kameralar için seçilmiştir. *evselect* fonksiyonu ile 15" dairesel bir yarıçap seçilerek kaynak ve ardalan verilerini indirmek için standart adımlar izlenmiştir.

Tablo 7

ULX-4 kaynağının *XMM-Newton* ve *Chandra* X-ışın gözlem bilgileri

Gözlemevi	Etiket	Gözlem No.	Dedektör	Gözlem zamanı	Gözlem süresi (ks)
<i>XMM-Newton</i>	XM1	0212480801	EPIC	2005-07-01	49,21
<i>XMM-Newton</i>	XM2	0303420101	EPIC	2005-07-01	54,11
<i>XMM-Newton</i>	XM3	0303420201	EPIC	2006-05-24	36,81
<i>XMM-Newton</i>	XM4	0677980701	EPIC	2011-06-07	13,32
<i>XMM-Newton</i>	XM5	0677980801	EPIC	2011-06-11	13,32
<i>XMM-Newton</i>	XM6	083019150	EPIC	2018-06-13	63,00
<i>XMM-Newton</i>	XM7	0830191601	EPIC	2018-06-15	63,00
<i>XMM-Newton</i>	XM8	0852030101	EPIC	2019-07-11	77,00
<i>Chandra</i>	C1	354	ACIS-S	2000-06-20	14,86
<i>Chandra</i>	C2	1622	ACIS-S	2001-06-23	26,81
<i>Chandra</i>	C3	3932	ACIS-S	2003-08-07	47,97
<i>Chandra</i>	C4	3932	ACIS-S	2011-06-12	9,63
<i>Chandra</i>	C5	12668	ACIS-S	2011-07-03	9,99
<i>Chandra</i>	C6	13813	ACIS-S	2012-09-09	179,20
<i>Chandra</i>	C7	13812	ACIS-S	2012-09-12	157,46
<i>Chandra</i>	C8	15496	ACIS-S	2012-09-19	40,97
<i>Chandra</i>	C9	13814	ACIS-S	2012-09-20	189,85
<i>Chandra</i>	C10	13815	ACIS-S	2012-09-23	67,18
<i>Chandra</i>	C11	13816	ACIS-S	2012-09-26	73,10
<i>Chandra</i>	C12	15553	ACIS-S	2012-10-10	37,57
<i>Chandra</i>	C13	19522	ACIS-I	2017-03-17	37,76
<i>Chandra</i>	C14	20998	ACIS-S	2018-08-31	19,82

Bununla birlikte, *XMM Newton* ve *Chandra* görüntüleri karşılaştırıldığında, *Chandra* gözlemlerinin çoğunda, birçok sönük noktasal X-ışın kaynağının ULX-4'ün yakınında ve 15" yarıçapı alanı içinde yer aldığı açıkça görülmektedir. Bu, ULX-4'e ait foton sayımlarını doğrudan etkilemektedir.

Chandra ACIS-S ve *ACIS-I* gözlemleri, *CIAO* v4.12 yazılımı ve kalibrasyon dosyaları *CALDB* v4.9 kullanılarak analiz edildi. Veri dosyaları *CIAO*'da *chandra_repro* ile ön indirgeme işlemleri yapılarak analizler için hazır hale getirildi. Kaynak ve ardaalan verileri, 5" yarıçaplı dairesel alandan elde edildi. Sırasıyla *specextract* ve *dmextract* paketleri ile kaynak spektrumları ve ışık eğrileri elde edildi.

PC modunda (Photon Counting mode, Foton Sayma modu) *Swift-XRT* verileri için foton sayım oranları, web sayfasında (https://www.swift.ac.uk/user_objects/) belirtilen otomatik prosedürler (Evans vd., 2009) kullanılarak elde edildi. PC modunda, kaynak sayımları, kaynak konumunda ortalanmış 30 piksel yarıçaplı dairesel alandan elde edildi. Ardaalan sayımları, iç ve dış yarıçapları 60 piksel (142") ve 110 piksel (260") olan kaynak merkezli bir halkadan elde edildi. Evans vd. (2009) çalışmasında belirtildiği gibi, ardaalan bölgesine düşen kaynaklar olduğunda otomatik olarak ardaalan bölgesini kaynak olmayan bölgelere kaydırır. Bu prosedürleri uyguladığımızda, 0,3-10 keV enerji bandında toplam sayımları sıfırdan büyük 82 gözlem kullanılmıştır. Bununla birlikte ULX-4, 2017 ve 2019 yılları arasında *NuSTAR* ile dört kez gözlenmiş ancak bu gözlemlerde kaynak uzaysal olarak çözümlenememiştir.

ULX-4'ün tayfsal özellikleri birçok araştırmacı tarafından *XMM-Newton* ve *Chandra* verileri kullanılarak incelenmiştir (örn. Dewangan vd., 2005; Terashima vd., 2006). Bu çalışmada, spektral analiz için ilk kez C13, C14, XM6, XM7, XM8 veri setleri kullanılmıştır. Ayrıca daha önceki çalışmalarda kullanılan veri setleri detaylı olarak yeniden analiz edilmiştir.

XMM-Newton, *Chandra* ve *Swift-XRT* gözlemleri için ULX-4 tayfları *XSPEC* ile oluşturuldu. Kaynağın toplam foton sayımlarına göre, enerji tayfları, *Chandra* ve *XMM-Newton* verileri için sırasıyla en az 10 ve 30 sayım/bin ile *FTOOLS/grppha* kullanılarak gruplandırılmıştır. Birçok çalışmada tartışıldığı gibi, veri kalitesi düşük ve kısa poz süreli veriler olduğunda tek bileşenli modeller istatistiksel olarak düşünülmelidir. Ancak, bu modeller ULX tayflarının yeterince doğru tanımlarını sağlama eğiliminde olmadığından bu tayfların ışımının fiziksel kökeninin yorumlanması tartışmalıdır (Gladstone vd., 2009; Sutton vd., 2013; Kaaret vd., 2017).

ULX-4 için elimizde yüksek kalitede veri olmamasına rağmen literatürde yaygın olarak kullanılan tek ve iki bileşenli modelleri uyguladık (Gladstone vd., 2009; Koliopanos vd., 2017; Earnshawet vd., 2020; Walton vd., 2021). Kaynağın enerji tayfları, *güç-yasası*,

disk blackbody (*DISKBB*), pfree disk blackbody (*diskpbb*), eğirili güç-yasası (*bknpower*) ve komptonizasyon (*compTT*) modeli gibi tek bileşenli modellerle uyumlandırıldı. Ayrıca, *güç-yasası + DISKBB*, *güç-yasası + mekal*, *güç-yasası + diskpbb*, *DISKBB + compTT* ve *DISKBB + cutoffpl* gibi iki bileşenli modeller de denenmiştir. Bu modellere ek olarak iki soğurma bileşenli (*TBABS*) modeli kullanılmıştır. Soğurma bileşenlerden biri, $N_H = 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ Galaktik değerinde sabit parametre olarak (Dickey ve Lockman 1990) ve barınak gökadanın soğurma değerini hesaplamak için diğer soğurma bileşeni serbest parametre olarak seçildi. Serbest parametre olarak kullanılan soğurma bileşeni, tüm gözlemler için ihmal edilebilecek kadar küçük ($10^{13} - 10^{17}$) olduğundan sadece Galaktik soğurma bileşeni kullanıldı.

XMM-Newton ve *Chandra* verilerinin X-ışın tayfsal analizlerinde elde edilen tayfsal uyumlar geniş bir χ_V^2 değerleri aralığı gösterdiğinden, tek ve iki bileşenli modeller $0,8 < \chi_V^2 < 2$ aralığında ve F-test sonuçlarına göre en iyi modeller olarak seçilmiştir. *Güç-yasası* modeli uyumu, *XMM-Newton* ve *Chandra* veri kümeleri için 3σ güvenirlikle diğer tek bileşenli modellerden istatistiksel olarak daha iyidir. Öte yandan, iki bileşenli modeller kullanılarak, XM1 verisi dışında veri setlerinin uyumunda istatistiksel olarak anlamlı bir sonuç elde edilemedi.

Yalnızca XM1'in tayfi, χ_V^2 ve F-test sonuçlarına *güç-yasası+mekal* modeline uyum sağlamıştır. Ayrıca, veri kümelerinin çoğu için, iki bileşenli modellerin parametreleri, χ_V^2 aralığı açısından istatistiksel olarak kabul edilebilir uyuma sahip olmalarına rağmen, fiziksel olarak anlamlı değildir. Tablo 8, 9 ve 10'da verilen değerler ULX-4'ün en iyi model parametrelerini göstermektedir. XM1 verisi dışında, diğer veri kümelerinin çoğunluğu için iki bileşenli model parametrelerindeki büyük belirsizlikleri göz önüne alındığında anlamlı değildir, ancak χ_V^2 kabul edilebilirlik sınırındadır.

ULX-4'ün soğurulmamış akıları, *XSPEC*'te mevcut olan *cflux* fonksiyonu kullanılarak 0,3–10 keV enerji bandında hesaplandı. Bu akılar kullanılarak, 9 Mpc mesafe baz alınarak X-ışın ışıtmaları hesaplandı. *Güç-yasası* modelinde düşük enerjilerde doğal bir kesilim olmadığında soğurulma çıkarılmamış (absorbed) kaynak akı değeri olduğundan fazla bulunabilir. Bunu dikkate alarak, *Güç-yasası* modelinin uygulandığı yeterli veriye sahip gözlemler için soğurulma çıkarılmamış akılar hesapladı. Ancak, tüm veri setleri için soğurulma çıkarılmış ve çıkarılmamış akı değerleri arasında ihmal edilebilir farklılıklar

belirlendi. Bu nedenle, Tablo 8, 9 ve 10'da sadece soğurulma çıkarılmış (unabsorbed) akılar listelenmiştir.

Tablo 8, 9 ve 10'da ULX-4 için *XMM-Newton* ve *Chandra* verileriyle elde edilen ve en iyi uyum veren tayfsal model parametreleri, soğurma çıkarılmış akı değerleri ile verilmektedir. Bu çalışmada kullanılan sekiz *XMM-Newton* gözleminden üçünün (XM6, XM7 ve XM8) *MOS* verisi bulunmamaktadır. *MOS* veri kümelerinin çoğu için çok fazla gürültü olduğundan *EPIC pn + MOS* tayfların eşzamanlı uyumlandırılması sonucu XM1 hariç, anlamlı model parametreleri elde edilememiştir.

4.2.3. Kısa ve Uzun Dönem X-ışın Değişkenliği

En son yayınlanan XM6, XM7, XM8, C13 ve C14 arşiv verileriyle ULX-4'ün kısa dönem değişkenliği araştırılmıştır. ULX-4'ün ardaldan temizlenmiş X-ışın ışık eğrileri, *SAS/evselect* kullanılarak 0,3–10 keV enerji bandında 100 s, 500 s, 1000 s ve 2000 saniyelik aralıklara bölündü. Elde edilen ışık eğrileri, χ^2 testi kullanılarak kısa dönem sayım oranı değişimleri araştırıldı. Bu test, sabit foton sayım oranı hipotezine göre büyük genlik değişimlerini araştırmak için uygulandı. χ^2 testinin sonuçları, verilerin değişkenliğinin bir göstergesi olan olasılık değerleri P(var) ile birlikte incelenmiştir. P(var) limit olarak alınan %95 değerini aşarsa, veri değişkenliği olarak yorumlanabilir. Ancak, %57'lik bir P(var) değeri bulundu. Bu değer, ULX-4'ün önemli bir değişim göstermediği anlamı taşır.

Ayrıca, 0,1 s'de örneklenen ve 5 Hz. Nyquist frekansı veren ardaldan temizlenmiş X-ışın ışık eğrileri, *HEASOFT* v6.27'de *XRONOS* v6.0 programı kullanılarak güç yoğunluğu spektrumları (PDS) oluşturuldu. Başlangıçta Fast Fourier dönüşümü (FFT), genel değişkenlik özelliklerini aramak için ışık eğrilerinin tüm süresi dönüşüme dahil edildi, ancak hiçbir değişim belirlenemedi. Daha sonra toplam poz süresi sekiz zaman aralığına bölündü ve FFT prosedürü tekrarlandı. $1,5\sigma$ güvenilirliğinden daha güçlü bir sinyal tespit edilmedi.

Tablo 8

ULX-4 kaynağının en iyi *Chandra* X-ışın tayfsal model parametreleri

Gözlem etiketleri	Sayım oranı (foton $\times s^{-1}$)	N_{PL} ($10^{-5} cm^{-2} s^{-1}$)	Γ	F_X ($10^{-13} ergs^{-1} cm^{-2}$)	L_X ($10^{39} ergs^{-1}$)	χ^2 / dof
C1	<0,11	...	...	<0,04	<0,04	...
C2	23,87 \pm 0,96	2,40 \pm 0,19	1,44 \pm 0,11	2,12 \pm 0,15	2,12 \pm 0,15	54,51/53
C3	<0,06	...	...	<0,02	<0,02	...
C4	10,59 \pm 1,09	1,52 \pm 0,34	1,95 \pm 0,32	0,88 \pm 0,1	0,88 \pm 0,1	15,76/15
C5	0,35 \pm 0,02	...	...	0,05 \pm 0,02	0,05 \pm 0,02	...
C6	0,13 \pm 0,06	...	...	0,014 \pm 0,007	0,014 \pm 0,007	...
C7	0,10 \pm 0,04	...	...	0,011 \pm 0,006	0,011 \pm 0,006	...
C8	0,07 \pm 0,02	...	...	0,007 \pm 0,0004	0,007 \pm 0,0004	...
C9	0,14 \pm 0,0	...	...	0,02 \pm 0,01	0,02 \pm 0,01	...
C10	0,15 \pm 0,02	...	...	0,02 \pm 0,01	0,02 \pm 0,01	...
C11	3,24 \pm 0,23	0,44 \pm 0,07	1,63 \pm 0,22	0,32 \pm 0,04	0,32 \pm 0,04	34,65/43
C12	22,41 \pm 0,79	3,45 \pm 0,25	1,75 \pm 0,10	2,29 \pm 0,14	2,29 \pm 0,14	63,77/66
C13	0,13 \pm 0,02	...	...	0,03 \pm 0,01	0,03 \pm 0,01	...
C14	8,58 \pm 0,69	1,81 \pm 0,41	1,78 \pm 0,30	1,16 \pm 0,17	1,16 \pm 0,17	31,41/28

Not: Parametrelerin açıklamaları Tablo 4’de belirtilmiştir.

Song vd. (2020), Brightman vd. (2020) ve Earnshaw vd. (2020) çalışmalarına ek olarak bu çalışmada yeni verilerle ULX-4’ün uzun dönem X-ışın değişkenliği araştırılmıştır. Bunun için, *XMM-Newton* ve *Chandra* verileri ardalardan temizlenmiş kaynak sayım oranları, *XSPEC* kullanılarak 0,3–10 keV enerji bandındaki ışık eğrileri elde edildi. PC modunda *Swift-XRT’nin* ardalardan temizlenmiş kaynak foton sayım oranları standart analiz adımları kullanılarak elde edildi. Bu çalışmada, sadece 2005-2021 yılları arasında kaynağın tespit edildiği veya 3σ üst limitlerinin alınabildiği 82 veri seti kullanıldı. Tüm bu sayım oranları, *WebPIMMS* aracı kullanılarak güç-yasası modeli $\Gamma=1,75$ ve $N_H = 3 \times 10^{20} cm^{-2}$ değerleri verilerek akıllara dönüştürüldü.

Tablo 9

ULX-4 kaynağı için en iyi *XMM-Newton* X-ışın tayfsal model parametreleri

Gözlem etiketleri	Sayım oranı (foton \times s^{-1})	N_{PL} ($10^{-5} cm^{-2} s^{-1}$)	Γ	F_X ($10^{-13} ergs^{-1} cm^{-2}$)	L_X ($10^{39} ergs^{-1}$)	χ^2 / dof
XM1	$39,20 \pm 1,51$	$2,52 \pm 0,15$	$1,85 \pm 0,11$	$1,55 \pm 0,09$	$1,55 \pm 0,09$	126,63/83
XM2	$21,60 \pm 1,45$	$1,36 \pm 0,13$	$2,0 \pm 0,19$	$1,55 \pm 0,09$	$1,50 \pm 0,09$	59,71/69
XM3	$9,21 \pm 1,10$	...	...	$0,25 \pm 0,03$	$0,24 \pm 0,03$	...
XM4	$50,60 \pm 2,61$	$3,14 \pm 0,28$	$1,90 \pm 0,17$	$1,87 \pm 0,12$	$1,81 \pm 0,12$	23,64/15
XM5	$31,90 \pm 4,75$	$1,84 \pm 0,38$	$1,73 \pm 0,47$	$1,23 \pm 0,26$	$1,19 \pm 0,26$	24,26/29
XM6	$18,90 \pm 0,80$	$1,27 \pm 0,09$	$1,86 \pm 0,12$	$0,78 \pm 0,007$	$0,75 \pm 0,007$	51,94/38
XM7	$17,40 \pm 0,78$	$1,07 \pm 0,08$	$1,84 \pm 0,14$	$0,60 \pm 0,05$	$0,59 \pm 0,05$	19,17/20
XM8	$9,52 \pm 0,63$	...	...	$0,26 \pm 0,02$	$0,25 \pm 0,02$	...

Tablo 10

ULX-4 kaynağının *XMM-Newton* güç-yasası+*mekal* model parametreleri

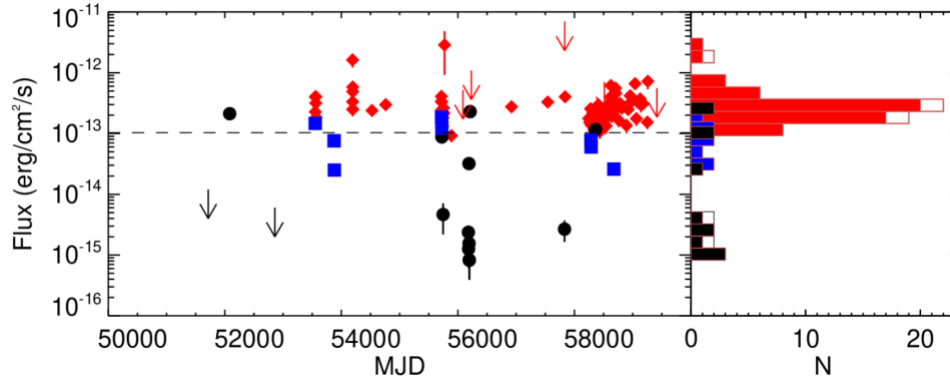
Gözlem etiketleri	N_{PL}	N_{mekal}	Γ	kT	F_X	L_X	χ^2 / dof
XM1	$1,99 \pm 0,15$	$5,17 \pm 1,06$	$1,68 \pm 0,13$	$0,59 \pm 0,17$	$1,55 \pm 0,05$	$1,50 \pm 0,09$	99,37/81
XM4	$2,43 \pm 0,56$	$8,38 \pm 4,89$	$1,57 \pm 0,32$	$0,30 \pm 0,08$	$2,08 \pm 0,08$	$2,02 \pm 0,08$	18,05/13
XM5	$1,18 \pm 0,33$	$7,63 \pm 3,77$	$1,10 \pm 0,29$	$0,25 \pm 0,10$	$1,83 \pm 0,12$	$1,77 \pm 0,10$	21,78/27

Not: kT *mekal* modelinden elde edilen keV biriminde disk sıcaklığını ve N_{mekal} 10^{-6} biriminde *mekal* modellerinin normalizasyon parametresini temsil eder. N_{PL} , F_X ve L_X birimleri Tablo 9'da verilenle aynıdır.

Ayrıca 3σ üst limit için aynı Γ ve N_H ile *CIAO*'da *srcflux* fonksiyonu kullanılarak C1 ve C3 veri setleri için foton sayım oranları elde edilmiştir. Elde edilen uzun dönem X-ışın ışık eğrisi Şekil 40'de gösterilmiştir.

XMM-Newton ve *Swift-XRT* dedektörleri, ULX-4'e çok yakın kaynakları çözmek için yeterli uzaysal çözünürlüğe sahip değildir. *XMM-Newton* verileri için küçük bir kaynak belirleme bölgesi (15" yarıçap) seçilmiş olsa da bu bölge içinde hala üç zayıf geçici X-ışın kaynağı tespit edilmiştir. Bu üç kaynağın katkılarını hesaplamak için Tablo 7'de verilen tüm

Chandra gözlemlerini kullanarak akıları hesaplanmıştır. Bunun için, $\Gamma=1,7$ ve $N_H = 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ parametreleri *CIAO*'nun *srcflux* fonksiyonu kullanıldı. Bu kaynakların akısı, ULX-4'ün toplam akısına $2,3 \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ değerinde fazladan bir katkı sağladığı ortaya çıkmıştır. Bu, potansiyel olarak, ULX-4'ün *XMM Newton* ve *Swift-XRT* akılarının, bu yakın kaynakların varlığı nedeniyle bu miktar daha fazla tahmin edildiğini gösterir. Ancak bu kaynakların geçici olduğunu ve gözlemlerin eşzamanlı olmadığını unutmamalıyız.

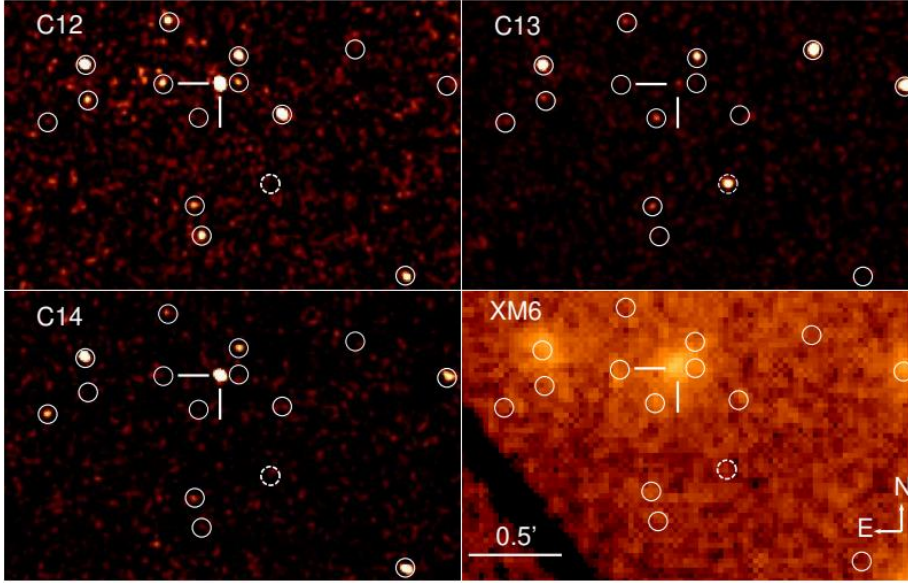


Şekil 40. ULX-4'ün uzun dönem X-ışın ışık eğrisi (solda) ve histogramı (sağda). *Chandra*, *XMM-Newton* ve *Swift-XRT* gözlemleri sırasıyla içi dolu siyah daireler, mavi kareler ve kırmızı elmaslarla temsil edilmiştir. *Chandra* ve *Swift-XRT* verileri için 3σ üst limitleri sırasıyla siyah ve kırmızı aşağı oklarla gösterilmiştir ve ayrıca histogramda açık karelerle temsil edilmiştir. Histogram için *Swift-XRT* gözlemleri 10 günlük aralıklar ile gruplanmıştır. N, gözlem sayısıdır. Kesikli siyah çizgi, ULX durumu için akı eşliğini gösterir

ULX-4 sisteminin uzun vadeli ışık eğrisinde periyodik modülasyonlarını aramak için Lomb-Scargle (L-S) periodogramları oluşturuldu. Bunun için *Python Astropy* yazılımın zamansal analiz araçları kullanıldı. Ancak, X-ışın verilerin hiçbirinde 2-3000 günlük periyot aralığında herhangi bir periyot tespit edilmedi. Ek olarak, gözlemlerin alt kümeleri üzerinde L-S analizi yeniden yapıldı. Bunun için ışık eğrisi altı zaman aralığına bölündü. Bu aralıklar, Epoch 1: 2005, Epoch 2: 2007, Epoch 3: 2011, Epoch 4: 2012, Epoch 5: 2018-2021, Epoch 6: 2011+2012 olarak tanımlandı. Ancak, bu dönemler için de önemli bir periyodik değişim belirlenemedi.

4.2.4. Yeni Geçici X-ışın Kaynağı: CXOU J132951.7+471010

2017'deki *Chandra* gözlemi analiz edilirken yeni bir geçici X-ışın kaynağı tespit edildi. Şekil 41'de C13 verisi üzerinde kesikli beyaz daire olarak gösterilen bu geçici kaynak, diğer mevcut *XMM-Newton* ve *Chandra* gözlemlerinde tespit edilemedi.



Şekil 41. Sırasıyla C12 (2012), C13 (2017), C14 (2018) ve XM6 (2018) gözlemlerinde ULX-4 (beyaz çizgiler) ve yeni geçici kaynak CXOU J132951.7+471010 (kesikli beyaz daire) karşılaştırmaları. 3" yarıçaplı beyaz daireler, Kuntz vd. (2016) tarafından kataloglanan bazı X-ışın kaynaklarını temsil eder. Tüm paneller aynı ölçekte elde edilmiş ve görüntüler 3" yarıçaplı Gauss düzleştirme işlemine tabi tutulmuştur.

wavdetect kullanarak kaynağın koordinatları R.A (J2000) = 13:29:51,7, Decl. (J2000) = +4710:10:10 olarak belirlendi. Kuntz vd. (2016) kataloğunda ve ayrıca, M51'deki geçici kaynaklar listesinde, bu kaynak daha önce belirlenmemiştir. Bu yeni geçici kaynak isimlendirmesi için CXOU (*Chandra* X-ışın Gözlemevi Kayıtsız kaynak isimleri) kısaltması kullanılmıştır ve bu kaynak CXOU J132951.7+471010 olarak adlandırılmıştır. Foton sayım oranı, 2017 *Chandra* verilerinden 0,3–10 keV enerji aralığında, foton sayısı/s ($9 \pm 3,12$) $\times 10^{-4}$ olarak hesaplanmıştır. Kaynağın tespit edilemediği gözlemler için, akının 3σ üst limitleri *srcflux* aracı kullanılarak $\Gamma=1,7$ ve $N_H = 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ olan güç-yasası

modeli varsayılarak türetilmiştir. Bu yeni kaynağın akı aralığı $(0,05-1,88) \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

4.2.5. Optik Analizler

ULX-4'ün optik özelliklerini araştırmak için Tablo 11'de verilen *HST* arşiv verileri kullanılmıştır. *Chandra* (Gözlem No. 13816) ve *HST* (Gözlem No. J97C51R4Q) görüntüleri arasındaki görelî astrometri için önceki çalışmalarımızda kullandığımızı benzer bir yöntem izlenmiştir (Allak vd., 2020; Özdoğan Ela vd., 2021). Astrometri için *HST* ve *Chandra* görüntülerinde izole ve noktasal üç referans kaynak tespit edildi. Bu referans kaynakları: (1) SN 2011dh (Horesh vd., 2013), (2) bir X-ışın çift sistemi (CXOU J133006.5+470834) (Kuntz vd. 2016) ve (3) bir arka plan radyo kaynağıdır (J133011+471041) (Rampadarath vd 2015). Bu kaynaklar hakkında detaylı bilgi Tablo 12'de verilmiştir. Bu referans kaynaklar kullanılarak, *Chandra* ve *HST* arasındaki farklar sırasıyla %90 güvenirlikle 0,21", 0,17" ve 0,18" olarak türetilmiştir. *Chandra* ve *HST* görüntüleri arasındaki astrometrik hatalar, R.A. için 0,14" ve Decl. için 0,11" olarak hesaplanmıştır. Astrometrik düzeltme, bu hataların standart sapmalarının karelerinin toplamı kullanılarak hesaplandı. Sonuç olarak, ULX-4'ün *HST* görüntüsü üzerindeki konumunu %95 (2σ) güvenirlilikte 0,18" hata yarıçapı içinde belirlenmiştir. Hata yarıçapı içinde iki optik karşılık belirlenerek A ve B olarak isimlendirildi. ULX-4'ün düzeltilmiş koordinatları Tablo 11'de verilmiştir. ULX-4 ve optik karşılıklarının (A ve B) konumunu gösteren *HST* üç renk görüntüsü (RGB) Şekil 42'de gösterilmektedir.

DOAPHOT fonksiyonu kullanılarak, optik kaynakların parlaklıklarını belirlemek için PSF fotometrisi yapıldı. *ACS/WFC* ve *WFC3* filtreleri için, Tablo 13'de verilen giriş parlaklıkları (Zero point) *pysynphot*'den elde edildi. *ACS/WFC* ve *ACS/WFC3* için 0,05" ile 0,5" arasında bir yarıçapla açıklık düzeltmeleri yapıldı (bkz. Tablo 13).

4.2.6. Tayfsal Gözlemler

Optik karşılıkların elde edilen parlaklıkları, ULX-4 bölgesinin Balmer çizgi oranları kullanılarak sönmüleme (A_V) ile düzeltildi. Bu amaçla, 16 Temmuz 2018 tarihinde RTT150 üzerine monte edilen TFOSC cihazından tayfsal veriler elde edilmiştir. Tayflar için elde edilen $H\alpha$ ve $H\beta$ akı oranları aşağıda verilmiştir. Standart veri indirgeme adımları *IRAF* kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kızarma $E(B-V)$, değerinin hesaplanması için, barınak gökadayaya ait Balmer düşme oranı $(H\alpha/H\beta)_{int}$ değeri, yıldız oluşturan gökadalara için standart 2,87 olarak alındı. Bunun için Osterbrock'un (1989) *B durumu* için $T = 10^4$ K sıcaklık ve $n_e = 10^2 \text{ cm}^{-3}$ 10 elektron yoğunluk değerleri varsayıldı.

Tablo 11

ULX-4 kaynağı için kullanılan *HST* gözlemleri

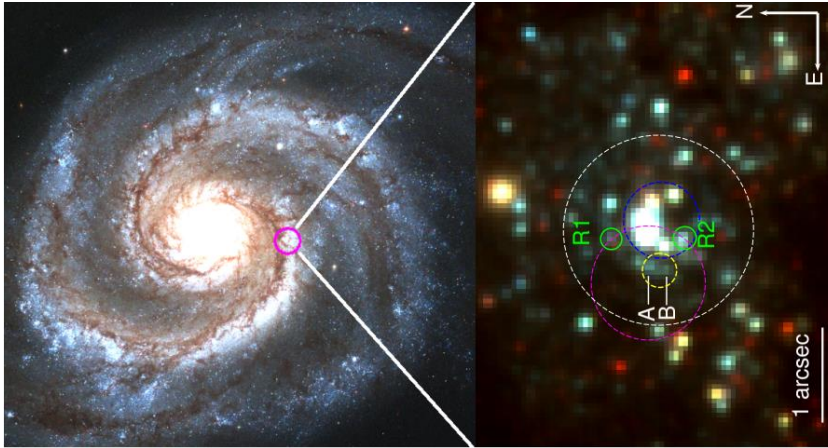
Dedektörler	Filtreler	Gözlem No.	Gözlem zamanı	Gözlem süresi
ACS/WFC	F435W	J97C51R3Q	2005-01-20	340
ACS/WFC	F555W	J97C51R4Q	2005-01-20	340
ACS/WFC	F814W	J97C51R6Q	2005-01-20	340
ACS/WFC3	F275W	ICD401010	2014-09-11	1400
ACS/WFC3	F336W	CD401020	2014-09-11	1450
ACS/WFC	F606W	JD8F01010	2016-10-05	2200

Tablo 12

Astrometri hesaplamaları için kullanılan referans kaynaklar ve ULX-4'ün *Chandra* ve optik düzeltilmiş koordinatları

Kaynaklar	<i>Chandra</i> R.A. (saat: dakika: saniye)	<i>Chandra</i> Decl. (°: ': ")	Toplam Sayım	<i>HST</i> R.A. (saat: dakika: saniye)	<i>HST</i> Decl. (°: ': ")	Fark
SN 2011dh	13:30:05,11	+47:10:11,10	79,3 ±10,6	13:30:05,10	+47:10:10,89	0,21
XOUJ133006.5 +470834	13:30:06,46	+47:08:34,86	348,7±21,7	13:30:06,45	+47:08:34,72	0,17
J133011+471041	13:30:11,02	+47:10:41,24	143,9±14,6	13:30:11,01	+47:10:41,14	0,18
Hata						
ULX-4	13:29:53,33	+47:10:42,76	...	13:29:53,32	+47:10:42,64	0,18

Hidrojen Balmer çizgilerinin oranından kızarma $E(B-V)=0,15$ kadar ve sönmüleme $A_V = R_V \times E(B-V)$ denklemi kullanılarak $A_V = 0,46$ kadar olarak hesaplandı. Burada $R_V = 3,1$ olup Gökadamız için kabul edilen tipik sönmüleme değeridir (Cardelli ve Wallerstein, 1989). Optik karşılıkların sönmüleme ile düzeltilmiş parlaklıkları Tablo 13'de verilmiştir.



Şekil 42. *HST* RGB görüntüsü (R: F814W, G: F555W ve B: F435W) üzerindeki ULX-4 ve çevresinin gösterimi. Mor renkli 0,6" yarıçaplı daire, ULX-4'ün *Chandra* konumunu temsil eder. Kesikli sarı daire, ULX-4'ün astrometrik olarak düzeltilmiş koordinatlarını temsil eder. A ve B optik karşılıkları beyaz çizgilerle gösterilmiştir. Kesikli mavi daire yıldız kümesini gösterir. Kesikli beyaz 1" yarıçaplı daire, referans kaynaklar için kullanılan bölgeyi temsil eder. Ayrıca, SED'ler için kullanılan iki alan yıldızı (R1 ve R2) yeşil dairelerle gösterilmiştir.

Tablo 13

ULX-4'ün 2 optik karşılığının fotometrik sonuçları ve akı değerleri

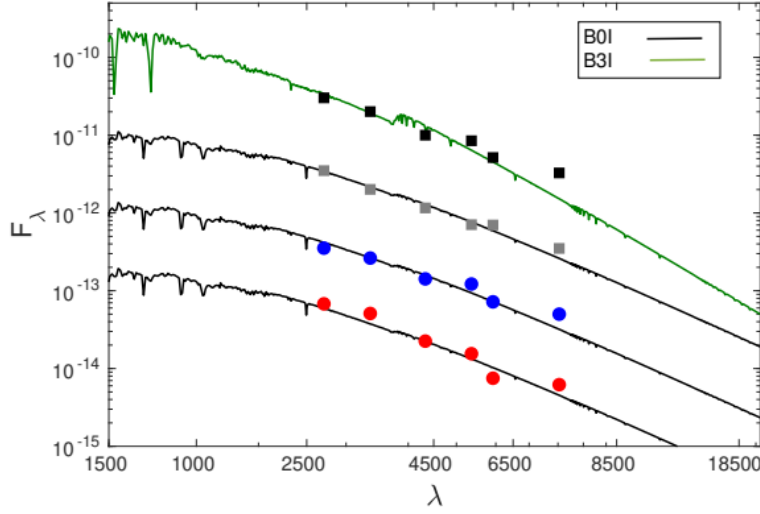
Filtreler	Dalgaboyları ($10^{-10} m$)	ZP (kadir)	Açıklık Düzeltilmeleri (kadir)	A Vega kadir	B Vega kadir	A Akı	B Akı
F275W	2710,4	22,66	0,43	21,25±0,03	21,96±0,04	6,78 ± 0,04	3,53 ± 0,05
F336W	2710,4	23,46	0,43	21,45±0,04	22,17±0,04	5,10 ± 0,04	2,63 ± 0,05
F435W	4329,8	23,46	0,35	23,17±0,04	23,67±0,05	2,25 ± 0,04	1,42 ± 0,05
F555W	4329,8	23,46	0,27	23,12±0,04	23,40±0,05	1,55 ± 0,04	1,22 ± 0,05
F606W	4329,8	23,46	0,26	23,17±0,04	23,67±0,04	0,75 ± 0,04	0,72 ± 0,05
F814W	8044,8	23,46	0,28	23,19±0,04	2335±0,05	0,62 ± 0,04	0,50 ± 0,05

Not: Son iki sütunda verilen akıların biri: $10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Ayrıca ilk kez bu tez çalışmasında belirlenen geçici X-ışın kaynağı CXOU J132951.7+471010 için %99,7 güvenirlikle hesaplanan 0,27" astrometrik hata yarıçapı içinde tek bir optik karşılık tespit edildi. CXOU J132951.7+471010'un optik karşılığı yalnızca UV bantlarında ($m_{F275W} = 22,03 \pm 0,04$ kadir ve $m_{F336W} = 22,88 \pm 0,03$ kadir) algılanmıştır.

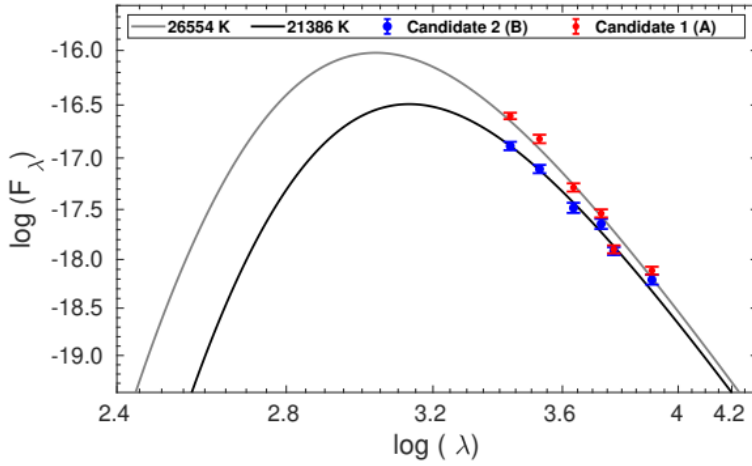
4.2.7. Spektral Enerji Dağılımları (SEDs)

Optik ışımının donör yıldızdan kaynaklandığı varsayılarak, optik karşılıkların tayf türleri, *pysynphot* kullanılarak elde edilen spektral enerji dağılımlarından (SED) tahmin edildi. Bu programda CK04 standart yıldızların sentetik tayfları kullanılmıştır (Castelli ve Kurucz, 2004). A ve B'nin karşılıklarının akı değerleri Tablo 13'de verilen parlaklıklardan elde edilmiştir. Tüm sentetik tayflar, $Z=0,015$ (Urquhart vd., 2018) metal bolluğu ve $A_V = 0,46$ kadir sönmüleme ile türetilmiştir. Ayrıca, sentetik tayflar Vega $m_V = 0$ kadir ile normalize edilmiştir. SED grafiklerinde, filtrelerin dalgaboyları için, *pysynphot*'tan elde edilen pivot dalgaboyları seçilmiştir. Ayrıca, optik karşılıklar için sistematik hataları kontrol etmek amacıyla iki alan yıldızı (Şekil 42'de R1 ve R2) seçilip SED'ler elde edilmiştir. Optik karşılıkların ve seçilen alan yıldızlarının SED'leri Şekil 43'de gösterilmektedir.



Şekil 43. Alan yıldızları R1 ve R2 ile optik karşılıklar A ve B'nin SED'leri. Kırmızı ve mavi dolu daireler, sırasıyla A ve B'nin akı değerlerini, içi dolu siyah ve gri kareler ise, sırasıyla R1 ve R2 kaynakların akı değerlerini temsil eder. Çizgiler, daha iyi görünüm için 10 kata kadar yukarı kaydırılmıştır. y ve x eksenlerinin birimleri sırasıyla $erg s^{-1} cm^{-2}$ ve Å'dir

Ayrıca, optik karşılıkların tayfsal tipini belirlemenin alternatif bir yolu olarak, bu optik karşılıkların SED'leri bir *karacisim* modeline uyduruldu. *Karacisim* tayfını elde etmek için *MATLAB*'da *optimset* ve *fminsearch* fonksiyonları ile bir kod yazılmıştır. A ve B için SED'ler, %95 güvenirlikle sırasıyla $26554 \pm 104 K$ ve $21386 \pm 173 K$ sıcaklıklara sahip *karacisim* modeli ile uyum göstermiştir (bkz. Şekil 44). İndirgenmiş χ^2 değerleri sırasıyla 0,88 ve 0,91 olarak bulunmuştur. Serbestlik derecesi dördttür. Ayrıca, R1 ve R2 kaynakların enerji dağılımları %95 güven seviyesinde sırasıyla $27200 \pm 187 K$ ve $17378 \pm 214 K$ sıcaklıklara sahip bir *karacisim* tayfına iyi uymuştur.



Şekil 44. Optik karşılıklardan A (kırmızı daireler) ve B'nin (mavi daireler) kızarma ile düzeltilmiş SED'leri. y ve x eksenlerinin birimleri sırasıyla $\text{erg s}^{-1}\text{cm}^{-2} \text{Å}^{-1}$ ve Å 'dir.

4.2.8. Uzun Dönem Optik Değişimler

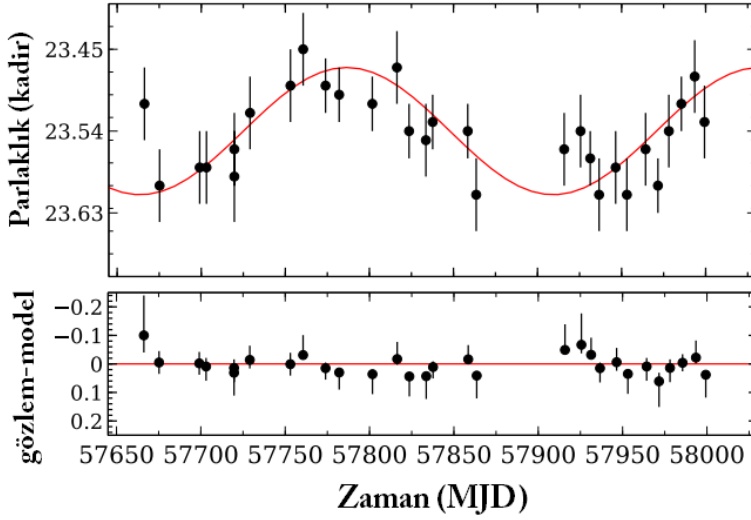
Optik periyodik modülasyonları araştırmak için uzun dönem ışık eğrileri oluşturulmuştur. 2200 s'lik poz süreli 30 *HST/ACS/WFC* F606W ve F814W gözlemleri kullanılarak PSF fotometrisi yapılmıştır.

F606W filtresinde, A için orta düzeyde bir periyodik modülasyon belirlenirken F814W filtresinde herhangi bir modülasyon gözlenmedi. B için, her iki filtrede de anlamlı genliğe sahip bir modülasyon bulunamadı. A'daki modülasyonun sistematik hatadan kaynaklanıp kaynaklanmadığını kontrol etmek için yakın çevrede 10 referans kaynağının ışık eğrileri elde edilmiştir. Bu referans kaynakları, Şekil 42'de beyaz daire içinde, A'ya yakın parlak kaynaklar olarak seçilmiştir. Referans kaynaklarda herhangi bir periyodik modülasyon bulunamadı. Ayrıca, 30 gözlemden elde edilen Vega kadir değerleri kullanılarak ortalama parlaklıklar ve daha sonra standart sapmaları hesaplandı. Daha sonra bu sapmalar Tablo 14'de verilen her gözlem için A'nın parlaklığından çıkartılarak ışık eğrisi düzeltilmiştir. Sonuç olarak, F606W görüntülerinde A'nın düzeltilmiş ışık eğrisinden belirgin olarak periyodik bir modülasyon görülmüştür (bkz. Şekil 45).

Liu vd. (2009) tarafından verilen ve bu çalışmada Denklem 4.6 olarak verilen bağıntı kullanılarak bir sinüzoidal eğri uydurulmuştur.

$$m(t) = \bar{m} + A \times \sin[2\pi(t - t_i)/P + \varphi] \quad (4.6)$$

Burada, P periyot, φ bir faz açısı, t referans süresi, A genlik ve \bar{m} ortalama parlaklığı temsil eder. Bu fit sonucunda, $P = 264,45 \pm 36,81$ gün, $A = 0,07 \pm 0,02$ kadir ve $\varphi = 96^\circ,35 \pm 0^\circ,78$ olarak elde edilmiştir. Bu parametreler, %99,7 güvenirlikle ve $\chi^2/\text{dof} = 21,06/27$ değerleriyle hesaplanmıştır.



Şekil 45. F606W gözlemlerinde A'nın optik ışık eğrisi için sinüs eğrisi uyumu (üst) ve artıklar (alt). *HST* gözlemleri ve sinüzoidal model sırasıyla içi dolu siyah daireler ve kırmızı çizgi ile temsil edilmiştir

4.2.9. ULX-4'e Yakın Olan Bir Kümenin Yaş ve Kütle Tahmini

Parlak X-ışın kaynakların yıldız kümelerinin yakınında yer aldığı ve küme ile olası ilişkinin kütle ve yaş gibi fiziksel parametrelerinin doğası hakkında bilgi sağladığı bilinmektedir (Zezas ve Fabbiano, 2002). ULX-4'ün optik karşılıkları R.A = 13:29:53,28 (saat: dakika: saniye) ve Decl. = +47:10:42,55 (°: ': ") koordinatlarına sahip bir yıldız kümesinin yakınında yer almaktadır (Chandar, 2016). Şekil 42'in sağ panelinde mavi ve sarı daireler sırasıyla kümenin konumu ve optik karşılıkları gösterilmektedir. *ACS/WFC* ve *ACS/WFC3*'ten elde edilen verileri kullanarak (bkz. Tablo 13) bu kümenin yaş ve kütle

değerleri elde edilmiştir. Bu hesaplama için, açıklık fotometrisi *IRAF* içinde bulunan *apphot* fonksiyonu kullanarak 0,4" yarıçaplı açıklık fotometrisi gerçekleştirilmiştir. F336W, F435W, F555W ve F814W filtrelerinin Vega parlaklıkları sırasıyla $17,92 \pm 0,01$, $19,04 \pm 0,01$, $18,96 \pm 0,01$ ve $18,63 \pm 0,01$ kadir olarak elde edilmiştir.

Basit yıldız popülasyonları (Simple Stellar Populations, SSP), aynı yaş ve kimyasal bileşime sahip yıldız grubu veya yıldız kümelerini tanımlar. Yıldız popülasyonlarının tayfsal evrimini belirlemek için sık kullanılan popülasyon sentezi modeli SSP'dir. (Bruzual ve Charlot, 2003). Her bir kümenin renkleri SSP'lerle karşılaştırılması, yaşlarının bir tahminini verir. Bu çalışmada, kümenin U–B, B–V ve V–I renkleri kullanıldı ve kızarma değeri olarak $E(B-V)=0,15$ kadir ve metal bolluğu $Z=0,015$ olan SSP modelleriyle karşılaştırılmıştır. SSP modellerinden küme yaşı 6,73 Myıl olarak türetilmiştir.

Bu kümenin kütlesi, sönmüleme ile düzeltilmiş V-bant parlaklığı, M51 gökadasının 29,62 kadirlik uzaklık modülü ve metal bolluğu ile SSP modeller tarafından tahmin edilen yaşa bağlı olan kütle-ışıtma oranından elde edildi. Modellerden *güç-yasası* başlangıç kütle fonksiyonu seçilerek kümenin sırasıyla yaş ve kütle değeri $6,73 \times 10^6$ yıl ve $\sim 3,2 \times 10^4 M_{\odot}$ olarak türetilmiştir. Ek olarak, optik karşılıkların yaşını ve kütlesini belirlemek için renk-kadir diyagramları (CMD) oluşturulmuştur. CMD'de Padova izokronları (PARSEC; Bressan vd., 2012) kullanıldı. A ve B'nin yaşları sırasıyla 9 Myıl ve 10 Myıl olarak tahmin edilirken (bkz. Şekil 46) kütleler A için $20 M_{\odot}$ ve B için $18 M_{\odot}$ olarak tahmin edilmiştir.

4.2.10. Tartışmalar

M51'deki ULX-4'ün X-ışın ve optik özelliklerini, 20 yılı aşan *XMM-Newton*, *Chandra*, *Swift-XRT* ve *HST* arşiv verileri kullanarak araştırılmıştır.

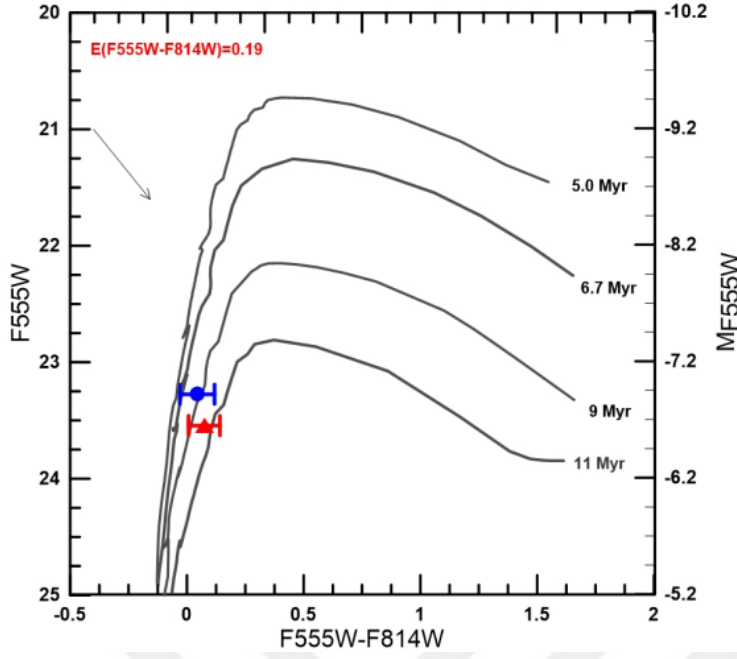
Daha önce çalışılan *XMM-Newton*, *Chandra* ve *Swift-XRT* verilerinin büyük bir çoğunluğu yeniden analiz edilmiştir. Bu verilerin bir kısmı önceki çalışmalarda X-ışın tayfsal modelleme ve zamansal analizlerde kullanılmamıştır. Uygulanan tayfsal modeller arasında, *XMM-Newton*, *Chandra* veri kümelerine, soğurulma içeren *güç-yasası* modeli ile 1,44–2,0 foton indeksi aralığında istatistiksel olarak kabul edilebilir uyum sağlamıştır. Bu aralık, kaynağın termal olmayan emisyonla karakterize edilen sert bir durum ile tutarlıdır (Remillard ve McClintock 2006b; Feng ve Kaaret 2009; Jinet vd., 2010; Swartz vd., 2011;

Koliopanos vd., 2019). *Eddington* ışırtmasında yığılma olduğu varsayıldığında, tıkız cismin kütlesi 5–15 M_{\odot} , aralığında yıldız kütleli bir karadelik olabilir. *Güç-yasası* modeli kullanılarak C12 verisinin enerji tayfı Şekil 47’de gösterilmiştir. Tayfin profili, Sutton vd. (2013) ve Fabrika vd. (2021) tarafından bir ULX’in sert aşırı-parlak (*hard ultra-luminous*) durumu tanımlamasına benzemektedir.

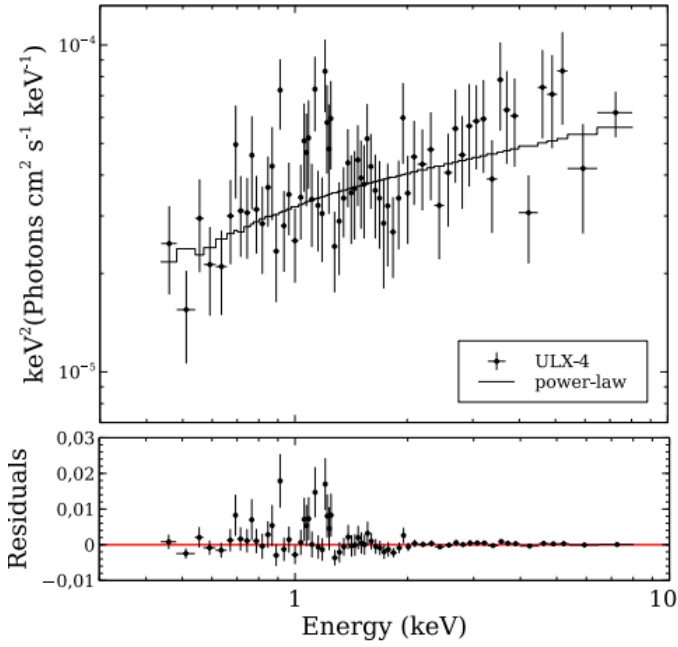
Tablo 14

M51 ULX-4’ün optik karşılılarından A’nın ACS/WFC F606W gözlemlerinden hesaplanan kadir değerleri

Zaman (MJD)	Parlaklık (Kadir)	Zaman (MJD)	Parlaklık (Kadir)
57666,23008	23,51 ± 0,04	57675,23803	23,60 ± 0,04
57699,07316	23,58 ± 0,04	57703,11242	23,58 ± 0,04
57719,68467	23,59 ± 0,05	57719,68467	23,56 ± 0,04
57729,02204	23,52 ± 0,04	57753,05545	23,49 ± 0,04
57760,60783	23,45 ± 0,04	57773,93019	23,49 ± 0,03
57782,01584	23,50 ± 0,03	57801,73972	23,51 ± 0,03
57816,38990	23,47 ± 0,04	57823,60626	23,54 ± 0,03
57833,60502	23,55 ± 0,04	57837,64349	23,53 ± 0,03
57858,50069	23,54 ± 0,03	57863,53201	23,61 ± 0,04
57915,85382	23,56 ± 0,04	57925,58697	23,54 ± 0,04
57931,34880	23,57 ± 0,03	57936,61826	23,61 ± 0,04
57946,45948	23,58 ± 0,04	57953,14623	23,61 ± 0,04
57964,26810	23,56 ± 0,04	57971,61629	23,60 ± 0,03
57978,10350	23,54 ± 0,04	57985,54818	23,51 ± 0,03
57993,48529	23,48 ± 0,04	57999,30881	23,53 ± 0,04



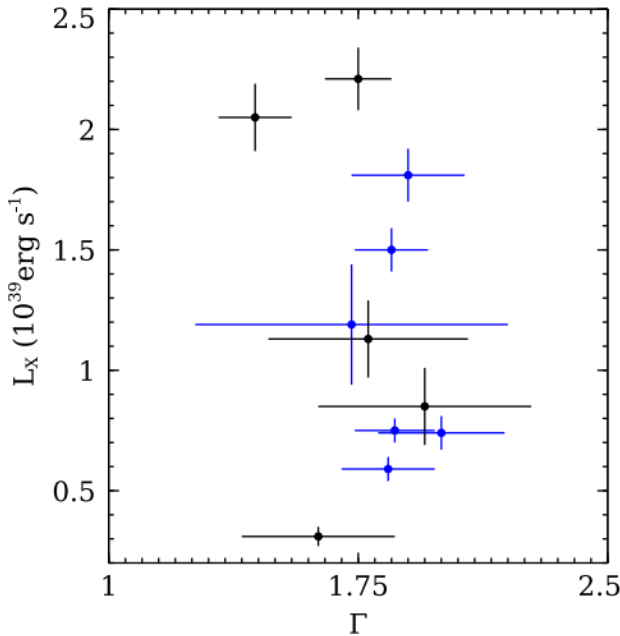
Şekil 46. ULX-4'ün optik karşılıkları için HST/ACS Renk-Kadir Diyagramı (CMD). Farklı yaşlardaki Padova izokronları siyah çizgilerle gösterilmiştir. Kırmızı üçgen ve mavi daire sırasıyla A ve B optik karşılıklarını temsil eder



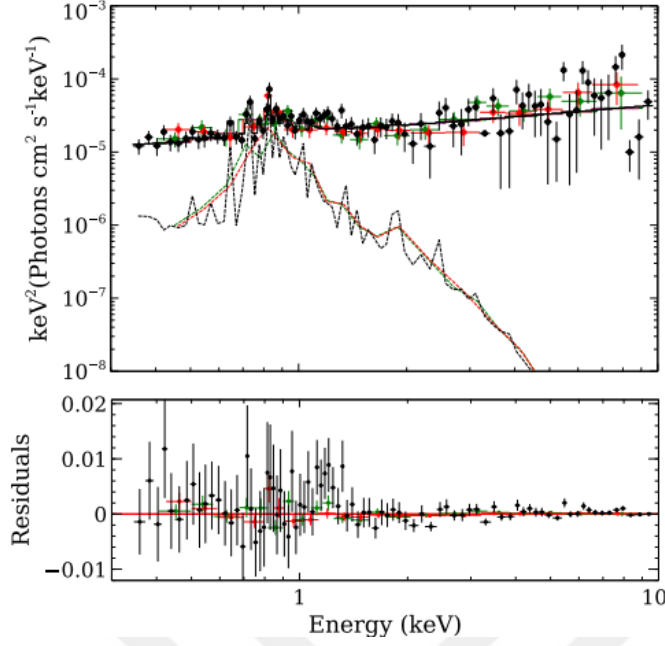
Şekil 47. Üst panel, C12 verisinden elde edilmiş ULX-4'ün güç-yasası modeline uyum gösteren X-ışın enerji tayfı. Artıklar (veri-model) alt panelde gösterilmiştir

ULX-4 için L_X 'e karşı foton indeksi Şekil 48'de gösterilmektedir. L_X ve Γ arasında bir korelasyon olasılığını araştırmak için Spearman korelasyon katsayısı (ρ) belirlenmiştir. 0,5 güvenirlilik değeri ile $\rho \sim -0,22$ değeri bulunmuştur. Katsayının '0' a yakın olması, anlamlı bir korelasyon olmadığını göstergesidir (Arsov vd., 2019). Yine de kaynak, özellikle *Chandra* veri kümeleri (siyah noktalar) sert spektrumlar için ipuçları sergilemektedir. Γ 'deki belirsizlikler nispeten büyük olmasına rağmen, diğer yandan *XMM-Newton* veri setleri biraz daha yumuşak tayflar (mavi noktalar) gösteriyor gibi görünmektedir.

Birçok *XMM-Newton* gözlemi, özellikle, XM1, XM4 ve XM5 (bkz. Tablo 9), *güç-yasası* modeline ek olarak spektral uyumlarda *mekal* bileşeninin varlığını gösterir. Bu yeni bileşenin eklenmesinin uyumlandırmada herhangi bir iyileştirmeye yol açıp açmadığını belirlemek için F-test uygulanmıştır. F-testi olasılıkları XM1, XM4 ve XM5 için sırasıyla 10^{-5} , 0,17 ve 0,23 olarak bulunmuştur. Değerler, *güç-yasası+mekal* modelinin yalnızca XM1 verileri için istatistiksel olarak anlamlı bir gelişme sağladığını göstermektedir. XM1'in *güç-yasası+mekal* modeline uyum gösteren enerji tayfı Şekil 49'da gösterilmiştir. Bu üç gözlem için *güç-yasası+mekal*'den toplam akıya mekal bileşeninin katkısının 0,3–2 keV aralığında $\sim \%10$ olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 48. L_X 'in Γ 'ya karşı diyagramı. Siyah ve mavi daireler sırasıyla *Chandra* ve *XMM-Newton* verilerini temsil eder



Şekil 49. Üst panel, XM1 verisinden elde edilmiş ULX-4'ün *güç-yasası+mekal* modeline uyan enerji tayfı. Artıklar (veri modeli) alt panelde gösterilir. Kesikli siyah, kırmızı ve yeşil çizgiler sırasıyla pn, MOS-1 ve MOS-2 verileri için *mekal* modelini temsil eder.

mekal bileşeninin varlığı, kısmen, sıcak yayımlı (diffuse) termal plazmadan kaynaklanan ışımaya bağlı olabilir (Feng ve Kaaret, 2005; Koliopanos vd., 2017). *Chandra* gözlemlerinin, ULX-4 yakınında, *XMM-Newton* verilerinde uzaysal olarak çözilemeyen nokta benzeri kaynakların varlığına işaret etmesi de dikkate değerdir (bkz. Şekil 44). Bu kaynaklar, ULX-4 spektrumlarında görülen ardalana katkıda bulunabilir. Yumuşak ışımanın ULX-4'e özgü olup olmadığını daha fazla araştırmak için, *güç-yasası+mekal* olarak modellenen 0,3–2 keV enerji bandındaki fazla akı ile çevresindeki bölgeden yayılan emisyonu karşılaştırılmıştır. ULX-4'e yakın bölgelerden yayılan emisyon tahmin edilmiştir. Bunun için kT 'nin *mekal* sıcaklığı 0,6 keV olarak (bkz. Tablo 10) *WebPIMMS* fonksiyonuna girdi parametresi olarak alınmıştır. Yumuşak ışımadaki fazlalığın yakındaki yaygın emisyonla aynı seviyede (karşılaştırılabilir) olduğu bulunmuştur. Bu fazla emisyonun ULX-4 ile ilişkilendirilmesinin olası olmadığı anlamına gelir. Bu yorum, Dewangan vd. (2005) çalışmasıyla tutarlıdır.

XMM-Newton, *Chandra* ve *Swift-XRT*'nin arşiv gözlemlerinin çoğunu kullanarak, ULX-4'ün uzun dönem X-ışın ışık eğrisini elde edilmiştir (bkz. Şekil 41). Tablo 8, 9 ve 10'da verilerin tayfsal uyumlandırma sonuçlarından görüldüğü gibi, ULX-4'ün X-ışın değişkenlik

faktörü ($V_f = F_{max}/F_{min}$) ~ 230 olarak hesaplanmıştır. Burada F_{max} ve F_{min} sırasıyla en yüksek ve en düşük akı değerlerini temsil eder. Bu faktör, bir ay içinde alınan 2012 *Chandra* gözlemleri (C6–C12) kullanılarak elde edilmiştir. Kaynak, daha önce kullanılmayan *Swift-XRT* gözlemlerinden (MJD 57003 (2015) ve MJD 59195(2021)) önemli bir değişkenlik göstermemiştir. ULX'lerde yüksek akı değişkenliğinin olası nedenlerinden biri olarak pervane etkisi tartışılmıştır (örn. Tsygankov vd., 2016; Earnshaw vd., 2018, 2020b).

Earnshaw vd. (2018) ve Song vd. (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* verilerinde böyle bir dağılım için bazı kanıtlar bulunmuştur (bkz. Şekil 40). Aynı zamanda, istatistiklerin çok düşük olduğunu ve iki modlu özelliğin ne *XMM-Newton* ne de *Swift-XRT* veri kümelerinde belirgin olmadığı görülmektedir. İki modlu özellik mevcutsa, bu bir disk/rüzgâr deviniminin göstergesi olabilir. (Vinokurov vd., 2018; Weng ve Feng, 2018). Literatürde tartışılan diğer olasılıklar arasında; nötron yıldızının çok güçlü bir manyetik alana sahip olmasını gerektiren pervane etkisi (Illarionov ve Sunyaev 1975; Tsygankov vd., 2016) nötron yıldızının tipik olarak orta derecede dış-merkezliliğe (eccentricity) sahip bir yörüngede ($e < 0,5$) olduğu çift sistemler (Stella vd., 1986) veya sistem yüksek durumdan düşük duruma geçerken, küreselleşme yoluyla yığılma hızındaki değişiklik neden olabilir (Grebenev, 2017).

Süperkritik yığılma çerçevesinde, süperkritik diskten çıkan rüzgâr, presesyon evrelerinde görünür hale gelen ve böylece parlak ve tayfsal olarak sert bir X-ışın kaynağının görünürlüğüne yol açan bir huni oluşturur. Diğer fazlarda, rüzgâr kanalla örtüştüğünde (diskin ve rüzgârın görüldüğü açı, kanalın açılma açısını aşıyor), X-ışın parlaklığı büyük ölçüde azalacaktır. Yıldız kütleli bir karadelik içeren Galaktik X-ışın çifti SS433 kaynağının ışınması böyle bir sürece örnek verilebilir (Fabrika, 2004; Poutanen vd., 2007; Weng vd., 2018).

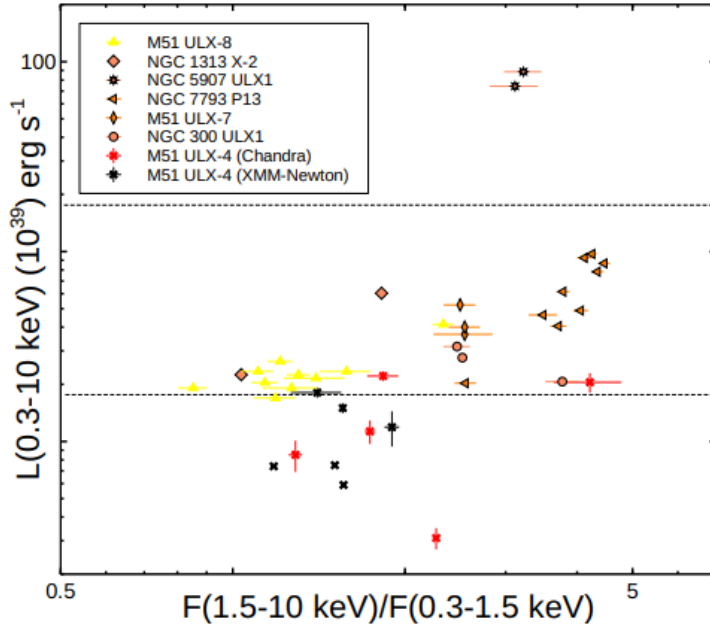
Görelî sert X-ışın tayfları ve özellikle *Chandra* veri seti tarafından belirtilen uzun dönem akı değişkenliği göz önüne alındığında (bkz. Şekil 40), ULX-4'ün aslında bir nötron yıldızı barındırıyor olması mümkündür (Vinokurov vd., 2018; Rodriguez Castillo vd., 2020). Ancak, pulsar benzeri bir sinyalin kaydedilmediği belirtmek gerekir. Ogawa vd. (2017) tarafından belirtildiği gibi, böyle bir sinyalin olmaması, çift sistem eksenine göre oldukça eğimli bir görüş hattından kaynaklanabilir. Çalışmamızda, nötron yıldızı senaryosunu biraz

daha değerlendirmek için Tsygankov vd. (2016) yaklaşımından yararlanıldı. Nötron yıldızının dönüş periyodunu (spin periyodu, P) tahmin etmek için akı değişkenliği faktörü kullanılarak, Denklem 4.7'den $P \sim 1,5$ s olarak hesaplandı.

$$\Delta L = 170 \times P^{2/3} \times M_{1,4}^{1/3} \times R_6^{-1} \quad (4.7)$$

Burada, $M_{1,4}$, $1,4 M_{\odot}$ birimlerinde nötron yıldızın kütlesidir, R_6 , 10^6 cm'lik birimlerde nötron yıldızın yarıçapıdır. Bu dönüş periyodu, bilinen bazı PULX'lerle karşılaştırılabilir (örn. M82'de X-2, NGC 5907'de X-1 ve NGC 1313'te X-2) (Townsend ve Charles, 2020).

ULX-4'ün uzun dönem X-ışın tayfsal evrimine daha fazla odaklanarak, Gúrpide vd. (2021), *Chandra*, *XMM-Newton* ve *NuSTAR*'dan alınan arşiv verileriyle 17 ULX'in (PULX'ler dahil) için bir sertlik-ışıtma diyagramlarını (Hardness Luminosity Diagram, HLD) sundukları çalışmada, ULX-4 durumu karşılaştırılmıştır. Bu diyagram, uzun yıllardır Galaktik karadelikler ve nötron yıldız çift sistemlerinin tayfsal evrimini ve yığılmanın özelliklerini araştırmak için kullanılan sertlik-yoğunluk diyagramına (Hardness Intensity Diagram, HID) (Remillard ve McClintock 2006; Belloni, 2010) eşdeğerdir. HID'nin belirli bir özelliği, karadelik geçişleri tarafından sert durumdan orta sert ve yumuşak durumlara, yumuşak duruma ve son olarak tekrar sert duruma tayfsal geçişlere maruz kaldıklarında izlenen q-eğrisi şeklindedir. Done ve Gierliński (2003) tarafından tanımlanan renk-renk diyagramı (CCD) gibi diğer diyagramların temel amacı, tayfsal geçişleri haritalamak ve mümkünse tıkHz nesnenin doğasını geçiş izlerinden yorumlamaktır. ULX-4'ün HLD (HID) üzerindeki konumunu tespit etmek için, Gúrpide ve ark. (2021)'nin üst panelinde gösterilen şeklin verileri kullanılmıştır (Şekil 50).

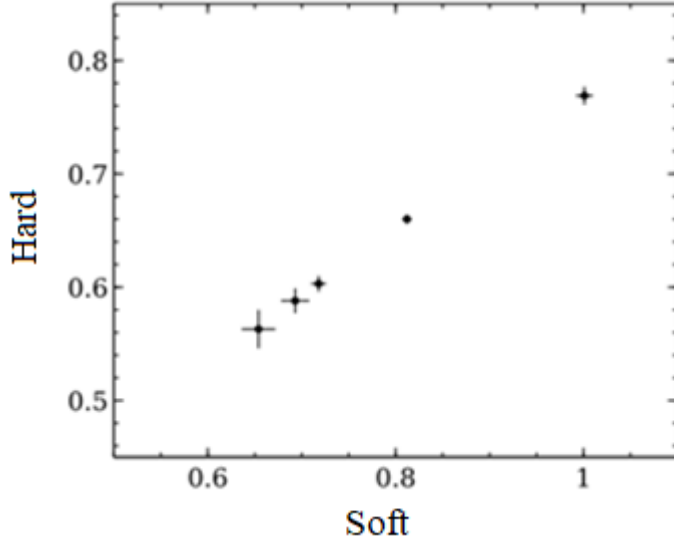


Şekil 50. Gürpide vd. (2021) çalışmasından alınmış sertlik- L_X diyagramı kullanarak ULX-4 için tekrardan çizilen HLD

Şekil 50’de ULX-4 için, *Chandra* ve *XMM-Newton* verileri sırasıyla kırmızı ve siyah yıldızlarla gösterilmiştir. Sertlik, sert (1,5 – 10 keV) bantlardaki soğurulma-çıkarılmış akıların yumuşak (0,3 – 1,5 keV) bantlara oranı olarak belirlenmiştir. Şekil 50’de görüldüğü gibi, ULX-4 parlaklık ölçeğinin alt bölümünü ve sertlik ölçeğinin orta bölgesini kaplar. Ancak, PULX’lerin çoğunluğu, daha yüksek parlaklık ve daha yüksek sertliğe karşılık gelen bölgede bulunur. Bu, ULX-4’teki tıkız nesnenin ya bir yıldız kütleli karadelik ya da düşük manyetik alana sahip bir nötron yıldızı olma olasılığını düşündürür. Ayrıca, *XMM-Newton* verileri esasen $\sim 1,7$ ortalama sertlik oranı etrafında kümelendiğini ve belirgin bir durum değişimi sergilemediği görülmüştür. Bu, *XMM-Newton* spektrumlarındaki yaygın emisyon ve ayırt edilemeyen arka plan kaynaklarının olası katkısından kaynaklanabilir. Buna karşılık, *Chandra* noktaları, $\sim 1,1-4,1$ aralığında değişen sertlik ile bir tayfsal evrim izleri gösterir ve kısmi q-eğrisi benzeri bir iz sürdüğü söylenebilir. Bu, ULX-4’teki tıkız nesne olarak normal bir yıldız kütleli karadelik olarak tartışılabilir. Açıkça, q-eğrisi tamamlanmamıştır ve kesin bir sonuca varmak için ek verilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Benzer bir şekilde, X-ışın renk-renk diyagramları elde edilerek ULX-4’ün yapısı daha fazla araştırılmıştır. Bu durumda, sert renk (5–8) ve (2–5) keV bantlarındaki akıların oranı olarak ve yumuşak renk (1–2) ve (0,3–1) keV enerji bantlarındaki akıların oranı olarak

tanımlanmıştır. Şekil 51, sert rengin yumuşak renge karşı grafiği verilmektedir. Bu sonuca ilişkin birkaç çıkarımda bulunulabilir. İlki, bu şekil tayfları bir *güç-yasası* ile iyi tanımlanmış bir geçici Galaktik karadelik kaynağı için Done ve Gierliński (2003) tarafından elde edilenle tutarlı olan çapraz bir yolu göstermektedir.



Şekil 51. ULX-4'ün *Chandra* verileri için renk-renk diyagramı

İkinci olarak, grafiğin sol alt bölgesinin, nötron yıldızı içeren çift sistemler için değil (nötron yıldızı yüzeyi ile yığılmanın iç kısmı arasındaki sınır tabakasından emisyon nedeniyle) yalnızca geçici karadelik için erişilebilir olduğuna dikkat çekiyorlar. ULX-4 sonuçları tam olarak belirtilen bölgede yer almaktadır. Bu özellik, ULX-4'ün bir nötron yıldızından daha çok geçici bir karadelik olma olasılığını düşündürür.

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) $\sim -6,6$ kadir'dir. Bu parlaklıklar bilinen diğer ULX'ler için belirlenen parlaklık aralığındadır (Tao vd., 2011; Gladstone vd., 2013; Vinokurov vd., 2018).

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. Aynı prosedürün bir parçası olarak, iki yakın alan yıldızı R1 ve R2'nin tayf türleri de belirlenmiştir; bunlarda erken dönem B-tipi süperdevler olarak tanımlanmıştır. (2) Bir *karacisim* modeli kullanarak

tayfsal uyumlandırma araştırılmıştır. SED'lere iyi uyum veren *karacisim* modelinden sırasıyla A ve B için $26554 \pm 104 K$ ve $21386 \pm 173 K$ sıcaklıkları %95 güvenilirlikte elde edilmiştir. Optik karşılıklar ve alan yıldızları için model ve SED'ler Şekil 46 ve Şekil 47'de gösterilmiştir.

Optik karşılıkların B tipi süperdev olduğu, Straizys ve Kuriliene'de (1981) sıcaklık ve parlaklık sınıfı tabloları kullanılarak tanımlanmıştır. A kaynağının periyodik modülasyonu göz önüne alındığında, ACS/WFC/F435W, F555W ve F814W filtreleriyle eşzamanlı olarak alınan veriler kullanılarak donörün tayfsal tipi de kontrol edilmiştir. Bu üç nokta ile yıldız benzeri bir enerji dağılımına sahip B tipi bir süperdev karşılık geldiğini doğrulamaktadır. Optik karşılıkların yaşı ve kütlesi sırasıyla ~ 10 Myıl ve $\sim 20 M_{\odot}$ olarak CMD'den elde edildi (bkz. Şekil 49). ULX-4'ün karşılıkları için B-tipi sınıflandırma, diğer çoğu ULX'lerin optik karşılıkların tayfsal tipi (OB-süperdev) ile uyumludur.

İlginç bir şekilde, R1 ve R2 alan kaynaklarının sınıflandırmasının da A ve B karşılıkları için belirlenen spektral tipe uyduğu gözlenmiştir. Bu da bu kaynakların Chandar vd. (2016) tarafından kataloglanan aynı yıldız kümesinin parçası olma olasılığını ortaya koyuyor. Şekil 42'de görüldüğü gibi, optik karşılıklar 18 pc kadar yakındaki bir küme içinde olduğu görülmektedir (burada 1", M51'in uzaklığı dikkatte alındığında ~ 44 pc'ye karşılık gelir). Kümenin yaşı 6,7 Myıl ve kütlesi $\sim 3,2 \times 10^4 M_{\odot}$ olarak tahmin edilmiştir. Chandar vd. (2016), sırasıyla yaş ve kütleyi $\sim 6,8$ Myıl ve $2,2 \times 10^4 M_{\odot}$ olarak tahmin etmişlerdir. Bu çalışmada hesaplanan yaşla tutarlıdır ancak kütle Chandar vd. (2016) verdiği biraz daha yüksektir. Elde edilen kütledeki küçük farkın, Chandar vd. (2016) tarafından kullanılan açıklık fotometrisi için 2,5 piksele kıyasla bu çalışmada 8 piksel kullanılması bir neden olabilir.

Bu çalışmanın ilgi çekici sonuçlarından biri, optik karşılıklardan A'nın F606W filtresinde 264 ± 37 günlük düşük genlikli periyodik bir modülasyon sergilemesidir. 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 ışınlanmayan yörüngesel hareketinden kaynaklanabilir (Zampieri vd., 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 ışımaya ile nispeten soğuk bir donörden gelen ışımının bir süperpozisyonu olarak yorumlanması gerektiği anlamına gelir. Böyle bir donör, bazı ULX sistemlerinde belirtildiği gibi kırmızı bir süperdev (RSG) olabilir (Heida vd., 2019; López vd., 2020). Heida vd. (2019), NGC 300 ULX-1 sistemindeki kırmızı bir süperdevin 0,8–2,1 yıl aralığındaki bir yörünge periyodu ile tutarlı olduğunu göstermektedir. Bu aralık, ULX-4 için bulunan periyodikliği barındırır.

İkinci senaryoda, donörün gerçekten bir B-tipi (aslında bir Be/X) yıldızı olduğunu varsaymaktır. Burada, Townsend ve 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, tıkız 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, tıkız cismin olağan yörünge hareketi yerine süper-yörünge hareketini olarak yorumlanabileceğini varsayar. Bu senaryoyu (yani, bu sınıf yüksek kütleli X-ışın çift popülasyonunun neredeyse %60'ını temsil ettiği için bir Be/X yıldızı) dikkate alarak ve Townsend ve Charles (2020) tarafından verilen bağıntıyı kullanarak, tıkız nesne için $\sim 10-15$ günlük yörünge periyodu tahmin edilebilir.

Ancak bu senaryonun ilginç bir sonucu, 100'den fazla bilinen Galaktik Be/X çiftlerinin yalnızca birinin bir karadeliğe ev sahipliği yaptığı bilindiği için, tıkız nesnenin bir nötron yıldızı olma olasılığının yüksek olmasıdır (bkz. Brown vd., 2018; Belczynski ve Ziolkowski, 2009). Ayrıca, eğer tıkız nesne gerçekten bir nötron yıldızı ise, o zaman *süper-Eddington* oranında yığılma olması büyük olasılıktır. Yukarıda özetlenen senaryoların her ikisi için de kesin bir sonuca varmak zordur. Bu, yapılan analizlerde mevcut sınırlı kalitede veriler göz önüne alındığında tamamen şaşırtıcı olmayan bir durumdur.

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, NGC 1316 ve M51’de bulunan ULX’lerin *XMM-Newton*, *Chandra*, *Swift-XRT* ve *HST* gözlemleriyle kapsamlı bir şekilde X-ışın ve optik özellikleri araştırılmıştır. Bu bölümde, her bir kaynak için araştırma sonuçları sıralanmıştır. Ayrıca, sonuçlardan yola çıkılarak bu kaynaklar için *James Webb* uzay teleskobu gibi yeni nesil gözlemevleri dahil yeni gözlemlerle yapılabilecek araştırmalar önerilmiştir.

5.1. NGC 1316 X-7 ve XT-1

Bu çalışmada, 2018 *Chandra* X-ışın verileri kullanılarak, 19 Mpc uzaklıkta bulunan NGC 1316 galaksisinde X-ışın ışıması, $L_X = 2,1 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ olan ve X-7 olarak adlandırılan yeni bir (ULX) tanımlanmıştır.

ULX X-7, 2001 *Chandra* gözleminde, ULX ($L_X = 5,7 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$) ışıma değeri ile tipik bir ULX ışıma seviyesinin altında gözlenirken, 2018 *Chandra* verileriyle elde edilen ışıma $L_X = 2,1 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ olarak hesaplanmış ve ~ 4 kat artış belirlenmiştir. Ancak, X-7’nin ışık eğrisinde, nispeten uzun dönem (~ 17 yıl) içinde akı değişimi gözlenmesine rağmen, kısa dönem (~ 9 gün) için belirgin bir değişim gözlenmemiştir. ULX’lerin genellikle üç kata kadar akı değişikliği sergiledikleri dikkate alındığında, X-7’nin orta düzeyde uzun dönem değişkenliğine sahip olduğu sonucuna varılabilir.

Bu kaynağın enerji tayfi, *DISKBB* modeline iyi uyum göstermiştir. En uygun tayfsal model parametreleri, X-7’nin görece sıcak ($kT \sim 1,32 \text{ keV}$) bir yığılma diskine sahip olduğunu gösterir. Bu sıcaklık değeri genellikle ULX’ler için beklenen disk sıcaklığından daha fazladır ancak, bu sıcaklık değerine sahip ULX kaynakları da mevcuttur. *DISKBB* modelinin normalizasyon değeri kullanılarak tıkız nesnenin kütlesi $\sim 8 M_\odot$ olarak hesaplanmış ve yıldız kütleli karadeliklerin kütle aralığında olduğu belirlenmiştir. Diğer transit ULX’lerle karşılaştırıldığında, gökada NGC 5907’de bulunan kaynağın disk sıcaklığı ile aynı ancak görece kütesinden küçüktür. Ayrıca, Galaktik karadelik X-ışın çiftlerinin tersine, ULX X-7 yüksek enerjilerde yüksek L_X değerine ve düşük enerjilerde düşük L_X değerine sahiptir.

2014 yılına kadar, ULX sistemlerinin tıkHz nesnesinin orta kütleli karadelikler olma olasılığı üzerinde çokça duruluyordu. Ancak, bu tarihten sonra ULX sistemlerinde keşfedilen nötron yıldızları ile bu aşırı parlak sistemlerin ışımaya mekanizması, güçlü manyetik alan etkisinden dolayı daha da karmaşık hale geldi. Bu keşfi takiben 6 sistemde daha nötron yıldızının keşfi, *süper-Eddington* oranında yığılma ile bu aşırı parlaklıklara ulaşılacağı üzerine tartışmaları yoğunlaştırdı. Ancak az sayıda nötron yıldızı içeren ULX sistemlerinin gözlenmesi tıkHz nesnenin yıldız kütleli karadelik olma durumunu dışlayamadı. İncelediğimiz X-7 kaynağının tıkHz bileşenin kütlesi yıldız kütleli karadeliklere örnek gösterilebilir.

X-ışın özelliklerinin yanı sıra X-7'nin optik özellikleri de çalışmamızda incelenmiştir. Bunun için öncelikle kaynağın optik karşılığı araştırılmıştır. İlk olarak, *HST/ACS* ve *HST/WFC3* arşiv verileri kullanılarak *Chandra* X-ışın gözlemleri ile hassas astrometri yapılmıştır. Astrometri sonucu, %95 güvenirlilikte 0,22" hata yarıçapında tek bir optik karşılık belirlenmiştir. Literatürde, optik karşılığı tek olan ULX sayısı oldukça azdır. Bu durum, X-7'nin optik karşılığının özelliklerinin ve optik yayınının doğasının tartışılmasında çok önemli bulgular sunmaktadır.

X-7'nin optik karşılığının mutlak parlaklığı (M_V) $-7,8$ kadir olup ULX'ler için belirlenen aralığın ($-4 < M_V < -9$) üst limitine yakındır. X-7'nin tayfsal enerji dağılımı, donör yıldızının optik ışımada daha baskın olduğu varsayılarak, 3100 K sıcaklığa sahip bir *karacisim* modeli ile iyi uyumlandığı gözlenmiştir. Bu sıcaklık ve mutlak parlaklık dikkate alındığında, ULX X-7'nin donör yıldızının M tipi bir süperdev olabileceği önerilmiştir. Çoğunlukla ULX'lerin optik karşılıkları OB türü süperdev olarak tanımlanmaktadır.

Ancak ULX sistemlerinde; optik ışımının diskten de gelebileceği düşünüldüğünde, bu ışımının tam olarak kaynağını anlamak için çok sayıda hassas ve eşzamanlı çoklu dalgaboyu gözlemlerine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, X-7'nin optik SED'i *karacisim* modeline iyi uyum göstermiştir. Bu model, tipik bir yıldız ışımalarını iyi temsil ettiğinden, belirlenen optik karşılığın sistemin donör yıldızı olabileceğine işaret etmektedir. Diğer bir olasılık, optik ışımının disk kaynaklı olabileceğidir. Ancak, X-ışın bandında değişken olan X-7 kaynağının, optik dalgaboyunda değişkenliğe belirlenemediğinden bu olasılık için yorumlarımız oldukça sınırlıdır.

Son olarak, X-7'nin X-ışın görüntüleri ile çevresi araştırılırken, X-7'nin yakınında $L_X \sim 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ olan yeni bir geçici bir ULX adayı (XT-1) belirlendi. Bu yeni aday için

yapılan *HST* analizlerinde astrometrik hata yarıçapında herhangi bir optik karşılığı belirlenemedi. Bu sistemin tipik bir LMXB olma olasılığı dikkate alındığında, bu uzaklıkta (~ 19 Mpc) barınak galaksilerde *HST* ile belirlenemeyecek kadar sönük olacaktır. Ayrıca, X-7'nin daha çok uzun dalgaboyunda (özellikle yakın kızılötede) daha parlak olduğu görülmektedir. Yeni nesil *James Webb* teleskobu ile bu sistemlerin optik ve kızılöte bölgesinde yapılacak gözlemler, bu kaynakların optik karşılıkları hakkında daha ayrıntılı bulgular elde edilecektir.

5.2. M51 ULX-4

M51'deki geçici ULX-4 için mevcut X-ışın verilerinin büyük çoğunluğu analiz edilmiştir. Veriler *Chandra*, *XMM-Newton* ve *Swift-XRT* arşivlerinden alınmıştır. Ayrıca, optik analizler için *HST* arşiv verileri kullanılmıştır. Analizlerin iki temel amacı ULX-4'ün doğasını belirlemek ve kaynağının olası optik karşılıklarını belirleyerek, optik ışınma mekanizmasını araştırmaktır.

ULX-4'ün X-ışın ve optik verileri kullanılarak oluşturulan ışık eğrileri ile tayfsal gecikmelerin araştırılması da dahil olmak üzere her iki dalgaboyunda FFT'lerden ve L-S periodogram analizlerinden yararlanılarak ayrıntılı bir şekilde zamansal analizler gerçekleştirildi.

Chandra ve *XMM-Newton* gözlemleri kullanılarak, X-ışın enerji tayfları oluşturuldu ve tayfsal özellikleri tanımlamak için *güç-yasası* modeli ile sınırlı tayfsal analizler yapıldı. X-ışın verilerinin, kaynağın olası tayfsal durum geçişlerini belirlemek ve ULX-4'ün kompakt nesnesinin yapısını öngörmek için sertlik oranları ve renk-renk diyagramları oluşturuldu. Optik veriler yardımıyla, yüzey sıcaklık değerini tanımlamak optik karşılıklar için tayfsal tipleri tahmin etmek için bir *karacisim* modeliyle temsil edilebilen SED'ler oluşturuldu. Optik karşılıklarının kütle ve yaş değerlerinin aralığı için renk-kadir diyagramları (CMD) oluşturuldu.

Bu çalışmadan elde edilen bazı önemli sonuçlar, değerlendirmeler/tartışmalar ve gelecekte yapılabilecek araştırma önerileri aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

✓ *Chandra* ve *HST* verileri arasında görelî astrometri gerçekleştirilerek ULX-4 için astrometrik hata yarıçapında olası iki optik karşılık belirlenmiştir (A ve B olarak isimlendirilmiştir). Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, tek optik karşılığı olan çok az sayıda ULX kaynağı vardır. Bunun nedeni, ULX'lerin kalabalık yıldız alanlarında veya yıldız kümelerinde yer almasıdır. ULX-4 için de benzer durum söz konusudur ve optik karşılıkları, Chandar vd. (2016) tarafından kataloglanmış bir kümeden ~ 18 pc uzaklıkta, bulanmaktadır. Çalışmamızda kümenin yaşı $\sim 6,7 \times 10^6$ yıl ve kütlesi $\sim 3,2 \times 10^4 M_{\odot}$ olarak belirlenmiştir. ULX-4 için A ve B olarak isimlendirilmiş iki optik karşılığın yaşı ve kütlesi sırasıyla 9×10^6 yıl ve $20 M_{\odot}$ ve B'nin yaş ve kütlesi ise sırasıyla 10^7 yıl ve $18 M_{\odot}$ olarak belirlenmiştir.

✓ A, F606W filtresinde 264 ± 37 günlük düşük genlikli bir periyodik değişim sergilerken B için herhangi bir periyodik değişim belirlenemedi. Ayrıca, her iki optik karşılık için F814W gözlem verilerinde bir değişkenlik gözlenmedi. ULX'lerde şimdiye kadar böyle bir değişkenlik sadece NGC 1313'de bulunan X-2 kaynağı için (6,12 gün) belirlenebilmiştir (Liu vd., 2009).

✓ X-ışın bandında değişkenlik gösteren ULX-4 aynı zamanda optik adaylarından A'nin optik dalgaboyunda sergilediği değişkenlik, optik ışımının nereden geldiği ile ilgili önemli sonuçlara işaret edebilir. Örneğin, hem X-ışın hem de optik değişkenlik belirlendiğinde optik ışıma daha çok yığılma diski ile ilişkilendirilebilir. Bunun en iyi örneği, Galaktik X-ışın çiftleridir (Charles ve Coe, 2003). Ancak, ULX-4'de bu durumu daha iyi yorumlamak için eşzamanlı optik ve X-ışın gözlemlerine ihtiyaç vardır.

✓ Optik SED'lere dayalı olarak, optik karşılıkların sıcaklıkları A için (26554 ± 104) K ve B için (21386 ± 173) K olarak hesaplandı. Bu sıcaklıklar da B0I ve B3I aralığında bir tayfsal türe karşılık gelir. Optik karşılıkları belirlenen çoğu ULX'in tipik olarak OB sınıfına ait oldukları bilinmektedir (Tao vd. 2011).

✓ Ayrıca, A'da görülen periyodikliğin donorun yörünge hareketi ile ilişkili olduğunu varsaydığımızda, uzun periyodik zaman ve Roche lobu taşmasını karşılamak için donorun RSG olması daha olasıdır.

✓ Sonuç olarak, SED'nin soğuk bir donordan ve büyük olasılıkla yığılma diski kaynaklı sıcak rüzgârdan gelen ışımaların bir toplamı (süperpozisyonu) olarak yorumlayabiliriz. Öte yandan, periyodiklik doğası gereği süper-orbital ise, yani tıkız nesnenin ve onu çevreleyen diskin etkileşimleri nedeniyle disk ortamında düzensizliklere ve/veya opaklaşmaya neden

olmasıyla ortaya çıkan yoğunluk dalgalarının bir sonucu ise sistem, tıkHz nesnesi nötron yıldızı olan bir Be/X yıldızı olabilir.

✓ Çoğu durumda, süper-yörünge periyotları, Be/X'lerin optik ışık eğrilerinden bağımsız olarak belirlenebilir. Bunun nedeni, nötron yıldızının yörünge hareketinin, hızla dönen Be/X yıldızı etrafındaki diskin merkezinden geçerken sıklıkla küçük bir optik parlamaya neden olmasıdır ve süper-yörünge periyodu, bu çevresel diskin oluşumu, bozulması veya orada dönen yoğunluk dalgalarından kaynaklı olabilir (Townsend ve Charles, 2020). Bu yüzden, bu sistemlerde süper-yörünge periyodunun belirlenebilmesi için tek kaynak optik ışıma değildir.

✓ Şimdiye kadar ~100 Galaktik Be/X'lerden yalnızca birinin karadelik içermesi (Brown vd., 2018; Belczynski ve Ziolkowski, 2009), Be/X sistemlerinin kompakt nesnelere nötron yıldızı olma olasılığının çok yüksek olduğunu gösteriyor. Be yıldızları genellikle O-A türü büyük kütleli anakol yıldızıdır ve yörünge periyotlarının aralığı 10–300 gündür (Shao ve Li, 2014).

✓ X-ışın verilerinin çoğu en iyi şekilde, 1,44-2,0 aralığında bir foton indekse sahip basit bir *güç-yasası* modeli ile tanımlanmaktadır. Çoğu transit ULX (örn. Liu vd., 2019) gibi ULX-4, 20 yıllık süreçte foton indisi bakımından hep sert durumu temsil etmektedir (tayfsal durum değişimi gözlenmiyor). Yani X-ışın ısıtmasında, genellikle disk katkısı %20 iken diskin etrafını saran koronanın katkısı %80'dir (Remillard ve McClintock, 2006). Ayrıca, çoğu geçici ULX'lerin en yüksek ısıtma değerleri neredeyse ($L_X \sim 3 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$) mertebesindedir. Ancak, NGC 5474 X-1 ve M51 XT-1 kaynakları çok yüksek ısıtma değeri ile bu durumu ihlal etmektedir ($L_X \sim 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$).

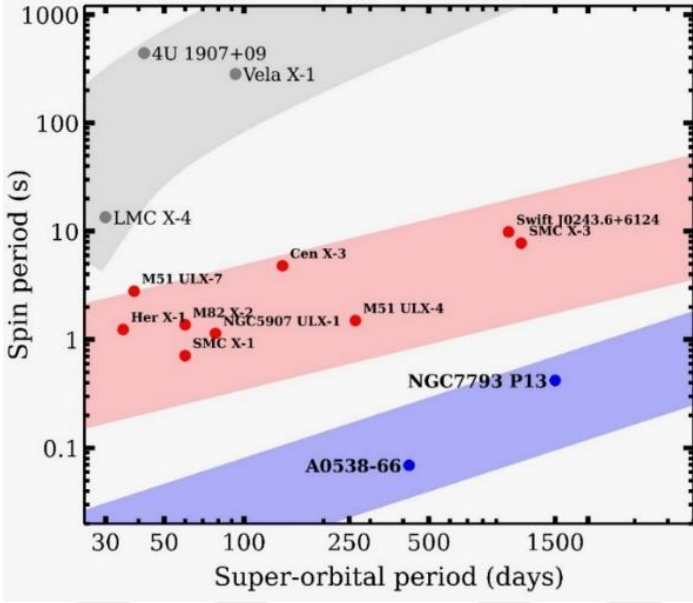
✓ Birkaç *XMM-Newton* gözlemi, en iyi şekilde yaygın (diffuse) bir ardalan kaynağından bir katkı öneren bir *mekal* bileşenin eklenmesiyle tanımlanan yumuşak bir bileşenin varlığına işaret eder. X-ışın enerji tayfları incelendiğinde *mekal* bileşeni ile tayfi temsil edilen ULX sayısı oldukça sınırlıdır (örn. 5408 X-1, Sutton vd., 2015).

✓ ULX-4'ün X-ışın akısı uzun dönemde iki modlu bir dağılımı gösteren bir yapı sunmuştur. Bu iki modlu dağılımın nedeni, PULX'lerde olduğu gibi pervane etkisi olabilir. Bu etkinin görüldüğü çoğu PULX'lerle kıyaslandığında kompakt nesnenin bir nötron yıldızı olma olasılığı güçlenmektedir.

✓Tayflar yeteri kadar veri ile oluşturulmadığında, pulsar benzeri bir sinyalin olup olmadığını belirlemek oldukça zordur. Ayrıca, sistemlerin doğası gereği sinyalin geldiği alan, gözlemci doğrultusunda olmayabilir. Bu nedenle, sinyal olsa dahi algılanamaz. ULX-4 durumu için mevcut tüm veriler kullanarak zamansal analizler gerçekleştirildi ancak, pulsar benzeri bir sinyal belirlenemedi. Özellikle, bu tür sinyalleri yakalamak için *XMM-Newton* ve *NuSTAR* gibi daha derin (uzun süreli) gözlemlere ihtiyaç vardır. ULX-4, bu gözlemleri ile gözlenmesine karşın, kaynağın yakınında bulunan birçok X-ışın kaynağını çözecek kadar uzaysal çözünürlüğe sahip değildir. Bu yüzden, bu tip gözlemlerden pulsar benzeri sinyaller elde edilse bile sonuçlar anlamlı olmayacaktır. Diğer yandan, Tsygankov vd. (2016) yaklaşımından yararlanarak, *Chandra* verileri kullanıldığında ULX-4 için 1,5 s'lik bir spin periyoduna sahip olma olasılığına da dikkat edilmelidir.

✓Son zamanlarda, ULX'ler için zamansal analizler daha çok spin ya da süper-orbital periyot bulma çalışmaları üzerine yoğunlaşmış durumdadır. Spin-orbital periyot diyagramları oluşturularak sistemin bileşenleri arasındaki ilişkiler araştırılmaktadır (Corbet ve Krimm, 2013). Benzer yaklaşım ile yörünge periyodu ile super orbital periyod arasındaki ilişkiler de araştırılmaktadır (Townsend ve Charles, 2020). ULX-4, durumu için, spin periyodu 1,5 s ve A için (ULX-4'ün optik karşılıklarından biri) belirlenen 264 günlük optik periyot, süper-orbital olarak kabul edilerek, spin-süper-orbital diyagramı oluşturuldu. Bunun için, literatürde iyi bilinen HMXB nötron yıldızları (Kretschmar, 2019) ile şimdiye kadar keşfedilen PULX'lerin spin ve süper-orbital parametreleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, ilginç bir şekilde üç ayrı bant olduğu gözlenmiştir (bkz. Şekil 52). ULX-4 dahil neredeyse tüm PULX'ler bir bantta yer aldığı görülürken Galaktik kaynaklar ise üç bantta da yer aldığı görülmektedir. Bu dağılımların nedenini ve fiziksel olarak doğasının anlaşılması için donör sınıfları ve yörünge parametreleri belli olan daha fazla örnekler ihtiyacı vardır.

✓HID ve CCD ile birlikte *Chandra* gözlemleri kullanılarak oluşturulan uzun dönem X-ışın ışık eğrisi, ULX-4'ün doğası hakkında maalesef net bir sonuca ulaşmamıza olanak sağlamadı. Verilerin sürekli gözlemlerden elde edilmemesi ve/veya gözlemlerin düşük istatistiklerine sahip olması bu durumun nedenleri arasındadır. Sonuç olarak, çalışmamızda olduğu gibi tıknaz cismin ya yıldız kütleli bir karadelik ya da düşük manyetik alana sahip bir nötron yıldızı olma olasılığı hakkında argümanlar geliştirilebilir. Ancak, veri istatistiği yüksek yeni *Chandra* gözlem verilerinin yakın zamanda yayınlanacak olma olasılığı (2023) bu tür sorunların çözümüne büyük oranda yardımcı olabilir.



Şekil 52. ULX-4 dahil, pulsar ULX'ler ve Galaktik nötron yıldızlarının spin-süper-orbital diyagramı

✓ Son olarak, bu çalışmanın başka bir çıktısı olarak, sadece 2017 *Chandra* gözleminde belirlenen ve daha önce kataloglanmamış geçici bir X-ışın kaynağı (CXOU J132951.7 +471010)'nı keşfetmiş olmamızdır. Bu yeni kaynağın X-ışın akısı $(0,05-1,88) \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Optik veriler kullanılarak yapılan analizlerde, bu geçici kaynağın $3-\sigma$ güvenilirlikte hesaplanan astrometrik hata yarıçapında bir optik karşılığına sahip ve sadece UV aralığında ışınım yaptığı tespit edilmiştir. Kaynağın doğasının tartışılabilmesi için daha fazla çoklu dalga boyu gözlem verilerine ihtiyaç vardır.

XMM-Newton, *Chandra* ve *eROSITA* gibi yeni nesil X-ışın gözlemlerinin veri kalitesi yüksek yeni gözlemler yayınlanması ile ULX'ler ya da ULX adaylarının sayısının arttıracığı gibi, önümüzdeki on-yıllarda gönderilmesi planlanan X-ışın uydularından *ATHENA* (Advanced Telescope for High Energy Astrophysics, <https://www.the-athena-x-ray-observatory.eu/>) uydusunun yapacağı gözlemlerle bu kaynakların doğasının daha iyi anlaşılacağı ve çalışmalarımızda ana hatlarıyla belirttiğimiz karmaşıklıkların çözülebileceği söylenebilir. ULX'lerin optik karşılıklarının belirlenmesi bu kaynakların doğasının anlaşılmasında önemli bir adımdır. Ayrıca, tez çalışmamızda incelediğimiz kaynakların optik karşılıklarının belirlenmesinde çok önemli olan hassas astrometri hesaplamaları, bu konuda yapılacak çalışmalara önemli katkılar sunacak potansiyeldedir. Çoğu ULX'in uzak barınak gökadalarda bulunması ve bu kaynakların kalabalık yıldız alanlarında ya da yoğun

yıldız kümelerinde konumlanması optik karşılıkların tespitinde çok önemli belirsizliklere yol açmaktadır. *HST*'nin yerini alacak olan *James Webb* teleskopu ile belirlenebilecek optik karşılıklar, bu kaynakların doğalarını anlamamız için oldukça önemli rol oynayacaktır. Bunun yanı sıra Erzurum'da kurulacak DAG (Doğu Anadolu Gözlemevi, <https://atasam.atauni.edu.tr/>) gözlemevinde konumlanacak 4-m kızılöte teleskopa takılacak yüksek kalitede görüntülemeyi sağlayacak CCD kamera ve tayf çeker ile yapılacak gözlemler yakın gökadalardaki parlak optik karşılıklar için çok daha ayrıntılı bilgiye ulaşmamıza olanak sağlayabilir.



KAYNAKÇA

- Aksaker, N. A. Z. I. M., Akyuz, A., Avdan, S., & Avdan, H. (2019). Optical counterparts of an ultraluminous X-Ray Source X-1 in NGC 2500. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 488(4), 5935-5940.
- Akyuz, A., Avdan, S., Allak, S., Aksaker, N., Akkaya Oralhan, I., & Balman, S. (2020). The ULX source X-3 in NGC 4258: a search for its X-ray ve optical properties. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 499(2), 2138-2147.
- Allak, S., Akyuz, A., Akkaya Oralhan, İ., Avdan, S., Aksaker, N., Vinokurov, A., ... & Dhuga, K. S. (2022). The transient ultraluminous X-ray source, ULX-4, in M51. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 510(3), 4355-4369.
- Allak, S., Akyuz, A., Aksaker, N. A. Z. I. M., Ozdogan Ela, M., Avdan, S., & Soydugan, F. A. R. U. K. (2020). Identification of a new ultraluminous X-ray source in NGC 1316. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 499(4), 5682-5689.
- Arsov, N., Dukovski, M., Evkoski, B. ve Cvetkovski, S. (2019). A Measure of Similarity in Textual Data Using Spearman's Rank Correlation Coefficient. *arXiv e-prints*.
- Avdan, H., Kayaci Avdan, S., Akyuz, A., & Balman, S. (2014). A search for periodicities from a ULX in the LINER galaxy NGC 4736. *Astrophysics ve Space Science*, 352(1), 123-128.
- Avdan, S., Vinokurov, A., Fabrika, S., Atapın, K., Avdan, H., Akyuz, A., ... & Valeev, A. (2015). Optical counterparts of two ULXs in NGC 5474 ve NGC 3627 (M 66). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 455(1), L91-L95.
- Avdan, H., Avdan, S., Akyuz, A., Balman, S., Aksaker, N., & Oralhan, I. A. (2016). X-ray Spectral ve Optical Properties of a ULX in NGC 4258 (M106). *The Astrophysical Journal*, 828(2), 105.
- Avdan, S., Akyuz, A., Vinokurov, A., Aksaker, N., Avdan, H., Fabrika, S., ... & Balman, Ş. (2019). Optical Counterparts of ULXs ve Their Host Environments in NGC 4490/4485. *The Astrophysical Journal*, 875(1), 68.

- Babyk, I. V., McNamara, B. R., Tamhane, P. D., Nulsen, P. E. J., Russell, H. R., & Edge, A. C. (2019). Origins of molecular clouds in early-type galaxies. *The Astrophysical Journal*, 887(2), 149.
- Bachetti, M., Rana, V., Walton, D. J., Barret, D., Harrison, F. A., Boggs, S. E., ... & Zhang, W. W. (2013). The ultraluminous X-ray sources NGC 1313 X-1 ve X-2: a broadband study with NuSTAR ve XMM-Newton. *The Astrophysical Journal*, 778(2), 163.
- Bai, J. M., & Lee, M. G. (2001). Are Centaurus A ve M 87 T [CLC] e [/CLC] V Gamma-Ray Sources? *The Astrophysical Journal*, 549(2).
- Belczynski, K. ve Ziolkowski, J., (2009). On the Apparent Lack of Be X-Ray Binaries with Black Holes, *The Astrophysical Journal*, vol. 707, no. 2, pp. 870–877. doi:10.1088/0004-637X/707/2/870.
- Belczynski, K., Bulik, T., Fryer, C. L., Ruitter, A., Valsecchi, F., Vink, J. S., & Hurley, J. R. (2010). On the maximum mass of stellar black holes. *The Astrophysical Journal*, 714(2), 1217. doi:10.1088/0004-637X/714/2/1217.
- Belfiore, A., Esposito P. ... & Zampieri, L. (2020). Diffuse X-ray emission around an ultraluminous X-ray pulsar. *Nature Astronomy* 4, 147–152. doi:10.1038/s41550-019-0903-z. 10.1038/s41550-019-0903-z.
- Belloni T. M. (2010). *States and Transitions in Black Hole Binaries*. Springer, p. 53, doi:10.1007/978-3-540-76937-8_3.
- Block, D.L., Elmegreen, B.G., Stockton, A., Sauvage, M. (1997). Macromolecules, Very Small Grains, ve Large Dust Particles in the Whirlpool Galaxy M51 ve Its Companions: A Unified View. *The Astrophysical Journal* 486, L95–L98. doi:10.1086/310855.
- Bachetti, M., Harrison, F. A., Walton, D. J., Grefenstette, B. W., Chakrabarty, D., Fürst, F., ... & Zhang, W. W. (2014). An ultraluminous X-ray source powered by an accreting neutron star. *Nature*, 514(7521), 202-204. doi:10.1038/nature13791.
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., Salasnich, B., Dal Cero, C., Rubele, S., Nanni, A. (2012). PARSEC: stellar tracks ve isochrones with the PAdova ve TRieste Stellar

- Evolution Code. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 427, 127–145. doi:10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x.
- Brightman, M., Harrison, F. A., Fürst, F., Middleton, M. J., Walton, D. J., Stern, D., ... & Bachetti, M. (2018). Magnetic field strength of a neutron-star-powered ultraluminous X-ray source. *Nature Astronomy*, 2(4), 312-316. doi:10.1038/s41550-018-0391-6.
- Brightman, M., Harrison, F. A., Bachetti, M., Xu, Y., Fürst, F., Walton, D. J., ... & Zezas, A. (2019). A ~ 60 day Super-orbital Period Originating from the Ultraluminous X-Ray Pulsar in M82. *The Astrophysical Journal*, 873(2), 115. doi:10.3847/1538-4357/ab0215.
- Brightman, M., Earnshaw, H., Fürst, F., Harrison, F. A., Heida, M., Israel, G., ... & Walton, D. J. (2020). Swift Monitoring of M51: A 38 day Superorbital Period for the Pulsar ULX7 ve a New Transient Ultraluminous X-Ray Source. *The Astrophysical Journal*, 895(2), 127. doi:10.3847/1538-4357/ab7e2a.
- Brown, R. O., Ho, W. C., Coe, M. J., & Okazaki, A. T. (2018). Simulating the X-ray luminosity of Be X-ray binaries: the case for black holes versus neutron stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477(4), 4810-4816. doi:10.1093/mnras/sty973.
- Bruzual, G. ve Charlot, S. (2003). Stellar population synthesis at the resolution of 2003. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 344, 1000–1028. doi:10.1046/j.1365-8711.2003.06897.x
- Bowyer, S., Byram, E.T., Chubb, T.A., Friedman, H. (1964). Lunar Occultation of X-ray Emission from the Crab Nebula. *Science* 146, 912–917. doi:10.1126/science.146.3646.912
- Byram, E.T., Chubb, T.A., Friedman, H. (1966). Cosmic X-ray Sources, Galactic ve Extragalactic. *Science* 152, 66–71. doi:10.1126/science.152.3718.66.
- Cantiello, M., Grado, A., Blakeslee, J. P., Raimondo, G., Di Rico, G., Limatola, L., ... & Gilmozzi, R. (2013). The distance to NGC 1316 (Fornax A): yet another curious case. *Astronomy & Astrophysics*, 552, A106. doi:10.1051/0004-6361/201220756.

- Carpano, S., Haberl, F., Maitra, C., ve Vasilopoulos, G., (2018). Discovery of pulsations from NGC 300 ULX1 ve its fast period evolution, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 476, no. 1, pp. L45–L49. doi:10.1093/mnrasl/sly030.
- Cardall, C.Y., Prakash, M., Lattimer, J.M. (2001). Effects of Strong Magnetic Fields on Neutron Star Structure. *The Astrophysical Journal* 554, 322–339. doi:10.1086/321370.
- Cardelli, J.A., Wallerstein, G. (1989). Interstellar Molecular Lines in the Direction of the Young Star TY CrA. *The Astronomical Journal* 97, 1099. doi:10.1086/115052.
- Cash, W., (1979). Parameter estimation in astronomy through application of the likelihood ratio., *The Astrophysical Journal*, vol. 228, pp. 939–947. doi:10.1086/156922.
- Castelli, F. ve Kurucz, R.L. (2004). Is missing Fe I opacity in stellar atmospheres a significant problem? *Astronomy ve Astrophysics* 419, 725–733. doi:10.1051/0004-6361:20040079.
- Chandar, R., Whitmore, B. C., Dinino, D., Kennicutt, R. C., Chien, L. H., Schinnerer, E., & Meidt, S. (2016). The age, mass, ve size distributions of star clusters in M51. *The Astrophysical Journal*, 824(2), 71. doi:10.3847/0004-637X/824/2/71.
- Charles, P.A., Coe, M.J. (2006). Optical, ultraviolet ve infrared observations of X-ray binaries. *Compact stellar X-ray sources* 215–265.
- Charles, P.A. ve Coe, M.J. (2006). Optical, ultraviolet ve infrared observations of X-ray binaries. *Compact stellar X-ray sources* 215–265.
- Chakravarti, Laha ve Roy. (1967). *Handbook of Methods of Applied Statistics. Volume I*, John Wiley ve Sons, pp. 392-394.
- Colbert, E. J. M. ve Mushotzky, R. F. (1999). The Nature of Accreting Black Holes in Nearby Galaxy Nuclei, *The Astrophysical Journal*, vol. 519, no. 1, pp. 89–107. doi:10.1086/307356.
- Colbert, E.J.M., Ptak, A.F. (2002). A Catalog of Candidate Intermediate-Luminosity X-Ray Objects. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 143, 25–45. doi:10.1086/342507.

- Corbet, R.H.D., Krimm, H.A. (2013). Superorbital Periodic Modulation in Wind-accretion High-mass X-Ray Binaries from Swift Burst Alert Telescope Observations. *The Astrophysical Journal* 778. doi:10.1088/0004-637X/778/1/45.
- Davis, P., Kunduri, H.K., Lucietti, J. (2005). Special symmetries of the charged Kerr-AdS black hole of $D = 5$ minimal gauged supergravity. *Physics Letters B* 628, 275–280. doi:10.1016/j.physletb.2005.09.062.
- Dewangan, G. C., Griffiths, R. E., Choudhury, M., Miyaji, T., & Schurch, N. J. (2005). XMM-Newton view of the ultraluminous X-ray sources in M51. *The Astrophysical Journal*, 635(1), 198. doi:10.1086/497356.
- Dickey, J. M. ve Lockman, F. J. (1990). H I in the galaxy. *Annual Review of Astronomy ve Astrophysics*, vol. 28, pp. 215–261, 1990. doi:10.1146/annurev.aa.28.090190.001243.
- Dolphin, A.E. (2000). WFPC2 Stellar Photometry with HSTPHOT. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 112, 1383–1396. doi:10.1086/31663.
- Done, C. ve Gierliński, M. (2003). Observing the effects of the event horizon in black holes, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 342, no. 4, pp. 1041–1055. doi:10.1046/j.1365-8711.2003.06614.x.
- Done, C. (2010). Observational characteristics of accretion onto black holes. arXiv e-prints.
- Done, C., Gierlinski, M., Kubota, A. (2007). Modelling the behaviour of accretion flows in X-ray binaries. Everything you always wanted to know about accretion but were afraid to ask. *Astronomy ve Astrophysics Review* 15, 1–66. doi:10.1007/s00159-007-0006-1.
- Esposito, P., Israel, G. L., Milisavljevic, D., Mapelli, M., Zampieri, L., Sidoli, L., ... & Rodríguez Castillo, G. A. (2015). Periodic signals from the Circinus region: two new cataclysmic variables ve the ultraluminous X-ray source candidate GC X-1. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452(2), 1112-1127. doi:10.1093/mnras/stv1379.
- Feldmeier, J.J., Jacoby, G.H., Phillips, M.M. (2007). Calibrating Type Ia Supernovae Using the Planetary Nebula Luminosity Function. I. Initial Results. *The Astrophysical Journal* 657, 76–94. doi:10.1086/510897.

- Forman, W., Jones, C., Cominsky, L., Julien, P., Murray, S., Peters, G., ... & Giacconi, R. (1978). The fourth Uhuru catalog of X-ray sources. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 38, 357-412. doi:10.1086/190561.
- Friedman, H. (1967). *The X-Ray Universe*. *The Earth in Space* 244.
- Earnshaw, H. P., Roberts, T. P., Sathyaprakash, R. (2018). Searching for propeller-phase ULXs in the XMM-Newton Serendipitous Source Catalogue. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 476, 4272–4277. doi:10.1093/mnras/sty501.
- Earnshaw, H. P., Grefenstette, B. W., Brightman, M., Walton, D. J., Barret, D., Fürst, F., ... & Webb, N. A. (2019). A broadband look at the old ve new ULXs of NGC 6946. *The Astrophysical Journal*, 881(1), 38. doi:10.3847/1538-4357/ab20cd.
- Earnshaw, H. P., Heida, M., Brightman, M., Fürst, F., Harrison, F. A., Jaodand, A., ... & Walton, D. J. (2020). The (re) appearance of NGC 925 ULX-3, a new transient ULX. *The Astrophysical Journal*, 891(2), 153. doi:10.3847/1538-4357/ab77b8.
- Evans, P. A., Beardmore, A. P., Page, K. L., Tyler, L. G., Osborne, J. P., Goad, M. R., ... & Romano, P. (2007). An online repository of swift/xrt light curves of-ray bursts. *Astronomy & Astrophysics*, 469(1), 379-385. doi:10.1111/j.1365-2966.2009.14913.x.
- Earnshaw, H. P., Roberts, T. P., ve Sathyaprakash, R. (2018). Searching for propeller-phase ULXs in the XMM-Newton Serendipitous Source Catalogue, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 476, no. 3, pp. 4272–4277, 2018. doi:10.1093/mnras/sty501.
- Evans, P. A. vd. (2009). Methods ve results of an automatic analysis of a complete sample of Swift-XRT observations of GRBs, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 397, no. 3, pp. 1177–1201, 2009. doi:10.1111/j.1365-2966.2009.14913.x.
- Fabbiano, G., Zezas, A., Murray, S. S. (2001). Chandra Observations of The Antennae Galaxies (NGC 4038/9). *The Astrophysical Journal* 554, 1035–1043. doi:10.1086/321397.
- Fabrika, S., (2004). The jets ve supercritical accretion disk in SS433, *Astrophysics ve Space Physics Reviews*, vol. 12, pp. 1–152.

- Fabrika, S. N., Atapin, K. E., Vinokurov, A. S., ve Sholukhova, O. N. (2021). Ultraluminous X-Ray Sources, *Astrophysical Bulletin*, vol. 76, no. 1, pp. 6–38. doi:10.1134/S1990341321010077.
- Farrell, S. A., Webb, N. A., Barret, D., Godet, O., Rodrigues, J. M. (2009). An intermediate-mass black hole of over 500 solar masses in the galaxy ESO243-49. *Nature* 460, 73–75. doi:10.1038/nature08083.
- Feng, H. ve Kaaret, P. (2005). XMM-Newton Observations of Ultraluminous X-Ray Sources in Nearby Galaxies, *The Astrophysical Journal*, vol. 633, no. 2, pp. 1052–1063. doi:10.1086/491597.
- Feng, H. ve Kaaret, P. (2009). Spectral States ve Evolution of Ultraluminous X-Ray Sources, *The Astrophysical Journal*, vol. 696, no. 2, pp. 1712–1726, 2009. doi:10.1088/0004-637X/696/2/1712.
- Feng, H. ve Soria, R. (2011). Ultraluminous X-ray sources in the Chandra ve XMM-Newton era. *New Astronomy Reviews* 55, 166–183. doi:10.1016/j.newar.2011.08.002.
- Fürst, F. (2016). Discovery of Coherent Pulsations from the Ultraluminous X-Ray Source NGC 7793 P13, *The Astrophysical Journal*, vol. 831, no. 2. doi:10.3847/2041-8205/831/2/L14.
- Fürst, F., Walton, D. J., Stern, D., Bachetti, M. ve Barret, D. (2017). Spectral Changes in the Hyperluminous Pulsar in NGC 5907 as a Function of Super-orbital Phase, *The Astrophysical Journal*, vol. 834, no. 1. doi:10.3847/1538-4357/834/1/77.
- Gao, Y., Wang, Q. D., Appleton, P. N., Lucas, R. A. (2003). Nonnuclear Hyper/Ultraluminous X-Ray Sources in the Starbursting Cartwheel Ring Galaxy. *The Astrophysical Journal* 596, L171–L174. doi:10.1086/379598.
- Geldzahler, B.J., Fomalont, E.B. (1984). Radio observations of the jet in Fornax A. *The Astronomical Journal* 89, 1650–1657. doi:10.1086/113668.
- Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F.R., Rossi, B.B. (1962). Evidence for x Rays From Sources Outside the Solar System. *Physical Review Letters* 9, 439–443. doi:10.1103/PhysRevLett.9.439.

- Giacconi, R., Kellogg, E., Gorenstein, P., Gursky, H., Tananbaum, H. (1971). An X-Ray Scan of the Galactic Plane from UHURU. *The Astrophysical Journal* 165, L27. doi:10.1086/180711.
- Giacconi, R. (1980). The Einstein X-Ray Observatory *Scientific American*, Vol. 242, No. 2 (February 1980), pp. 80-103.
- Gierlinski, M., Done, C. ve Page, K. (2009). Reprocessing of X-rays in the outer accretion disc of the black hole binary XTE J1817-330. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 392, 1106–1114. doi:10.1111/j.1365-2966.2008.14166.x.
- Gilfanov, M. (2010). *X-Ray Emission from Black-Hole Binaries*. Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag 17. doi:10.1007/978-3-540-76937-8_2.
- Grimm, H.-J., Gilfanov, M., Sunyaev, R. (2003). High-mass X-ray binaries as a star formation rate indicator in distant galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 339, 793–809. doi:10.1046/j.1365-8711.2003.06224.x.
- Gladstone, J. C., Roberts, T. P., ve Done, C., (2009). The ultraluminous state, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 397, no. 4, pp. 1836–1851. doi:10.1111/j.1365-2966.2009.15123.x.
- Gladstone, J. C. (2013). Optical Counterparts of the Nearest Ultraluminous X-Ray Sources, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 206, no. 2. doi:10.1088/0067-0049/206/2/14.
- Grebenev, S. A. (2017). The nature of the bimodal luminosity distribution of ultraluminous X-ray pulsars, *Astronomy Letters*, vol. 43, no. 7, pp. 464–471. doi:10.1134/S1063773717050012.
- Grisé, F., Pakull, M. W., Soria, R., Motch, C., Smith, I. A., Ryder, S. D., & Böttcher, M. (2008). The ultraluminous X-ray source NGC 1313 X-2-Its optical counterpart ve environment. *Astronomy & Astrophysics*, 486(1), 151-163. doi:10.1051/0004-6361:200809557.
- Grise, F., Kaaret, P., Corbel, S., Feng, H., Cseh, D., Tao, L. (2012). Optical Emission of the Ultraluminous X-Ray Source NGC 5408 X-1: Donör Star or Irradiated Accretion Disk? *The Astrophysical Journal* 745. doi:10.1088/0004-637X/745/2/123.

- Gruber, D. E., Rothschild, R. E. (1984). SMC X-1 variability observed from HEAO 1. *The Astrophysical Journal* 283, 546–551. doi:10.1086/162338.
- Gúrpide, A., Godet, O., Koliopanos, F., Webb, N., ve Olive, J.-F. (2021). Long-term X-ray spectral evolution of ultraluminous X-ray sources: implications on the accretion flow geometry ve the nature of the accretor, *Astronomy ve Astrophysics*, vol. 649, 2021. doi:10.1051/0004-6361/202039572.
- Hatt, D., Freedman, W. L., Madore, B. F., Jang, I. S., Beaton, R. L., Hoyt, T. J., ... & Seibert, M. (2018). The Carnegie–Chicago Hubble Program. V. The Distances to NGC 1448 ve NGC 1316 via the Tip of the Red Giant Branch*. *The Astrophysical Journal*, 866(2), 145. doi:10.3847/1538-4357/aadfe8
- Heida, M., Jonker, P. G., Torres, M. A. P., Kool, E., Servillat, M., Roberts, T. P., ... & Harrison, F. A. (2014). Near-infrared counterparts of ultraluminous X-ray sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442(2), 1054-1067. doi:10.1093/mnras/stu928.
- Heida, M., Jonker, P. G., Torres, M. A. P., Roberts, T. P., Walton, D. J., Moon, D. S., ... & Harrison, F. A. (2016). Keck/MOSFIRE spectroscopy of five ULX counterparts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 459(1), 771-778. doi:10.1093/mnras/stw695.
- Heida, M., Lau, R. M., Davies, B., Brightman, M., Fürst, F., Grefenstette, B. W., ... & Harrison, F. A. (2019). Discovery of a red supergiant donor star in SN2010da/NGC 300 ULX-1. *The Astrophysical Journal Letters*, 883(2), L34. doi:10.3847/2041-8213/ab4139.
- Heil, L. M. ve Vaughan, S. (2010). The linear rms-flux relation in an ultraluminous X-ray source, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* , vol. 405, no. 1, pp. L86–L89, 2010. doi:10.1111/j.1745-3933.2010.00864.x.
- Horesh, A., Stockdale, C., Fox, D. B., Frail, D. A., Carpenter, J., Kulkarni, S. R., ... & Kassim, N. (2013). An early ve comprehensive millimetre ve centimetre wave ve X-ray study of SN 2011dh: a non-equipartition blast wave expanding into a massive stellar wind. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 436(2), 1258-1267. doi:10.1093/mnras/stt1645.

- Hu, C. P., Kong, A. K., Ng, C. Y., & Li, K. L. (2018). NGC 7793 P9: An Ultraluminous X-Ray Source Evolved from a Canonical Black Hole X-Ray Binary. *The Astrophysical Journal*, 864(1), 64. doi:10.3847/1538-4357/aad5e2.
- Huppenkothen, D., Bachetti, M., Stevens, A. L., Migliari, S., Balm, P., Hammad, O., ... & Blanco, R. V. (2019). Stingray: a modern Python library for spectral timing. *The Astrophysical Journal*, 881(1), 39. doi:10.21105/joss.01393.
- Israel, G. L. (2017). An accreting pulsar with extreme properties drives an ultraluminous x-ray source in NGC 5907, *Science*, vol. 355, no. 6327, pp. 817–819. doi:10.1126/science.aai8635.
- Israel, G. L. (2017). Discovery of a 0.42-s pulsar in the ultraluminous X-ray source NGC 7793 P13, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 466, no. 1, pp. L48–L52, 2017. doi:10.1093/mnrasl/slw218.
- Illarionov, A. F., Sunyaev, R. A. (1975). Why the Number of Galactic X-ray Stars Is so Small? *Astronomy ve Astrophysics* 39, 185.
- Jensen, J. B., Tonry, J. L., Barris, B. J., Thompson, R. I., Liu, M. C., Rieke, M. J., ... & Blakeslee, J. P. (2003). Measuring distances ve probing the unresolved stellar populations of galaxies using infrared surface brightness fluctuations. *The Astrophysical Journal*, 583(2), 712. doi:10.1086/345430.
- Jonker, P. G., Heida, M., Torres, M. A. P., Miller-Jones, J. C. A., Fabian, A. C., Ratti, E. M., ... & Roberts, T. P. (2012). The nature of the bright ULX X-2 in NGC 3921: a Chandra position ve HST candidate counterpart. *The Astrophysical Journal*, 758(1), 28. doi:10.1088/0004-637X/758/1/28.
- Kaaret, P., Ward, M. J., & Zezas, A. (2004). High-resolution imaging of the He II $\lambda 4686$ emission line nebula associated with the ultraluminous X-ray source in Holmberg II. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 351(3), L83-L88. doi:10.1111/j.1365-2966.2004.08020.x.
- Kaaret, P., Feng, H., Wong, D. S., Tao, L. (2010). Direct Detection of an Ultraluminous Ultraviolet Source. *The Astrophysical Journal* 714, L167–L170. doi:10.1088/2041-8205/714/1/L167.

- Kaaret, P., Pakull, M. W., Motch, C. (2011). Optical Properties of the Ultraluminous X-Ray Source Holmberg IX X-1 ve Its Stellar Environment. *The Astrophysical Journal* 734. doi:10.1088/0004-637X/734/1/23.
- Kaaret, P., Feng, H., ve Roberts, T. P. (2017). Ultraluminous X-Ray Sources, *Annual Review of Astronomy ve Astrophysics*, vol. 55, no. 1, pp. 303–341. doi:10.1146/annurev-astro-091916-055259.
- Kajava, J.J.E., Poutanen, J. (2009). Spectral variability of ultraluminous X-ray sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 398, 1450–1460. doi:10.1111/j.1365-2966.2009.15215.x.
- Kajava, J. J. E., Poutanen, J., Farrell, S. A., Grise, F., Kaaret, P. (2012). Evolution of the spectral curvature in the ultraluminous X-ray source Holmberg II X-1. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 422, 990–996. doi:10.1111/j.1365-2966.2012.20671.x.
- Kara, E., Pinto, C. I. R. O., Walton, D. J., Alston, W. N., Bachetti, M., Barret, D., ... & Webb, N. A. (2020). Discovery of a soft X-ray lag in the ultraluminous X-ray source NGC 1313 X-1. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(4), 5172-5178. doi:10.1093/mnras/stz3318.
- Kennea, J. A., Lien, A. Y., Krimm, H. A., Cenko, S. B., ve Siegel, M. H. (2017). Swift J0243.6+6124: Swift discovery of an accreting NS transient, ATel10809.
- Kim, D.-W., Fabbiano, G. (2003). Chandra X-Ray Observations of NGC 1316 (Fornax A). *The Astrophysical Journal* 586, 826–849. doi:10.1086/367930.
- Kim, D.-W., Fabbiano, G. (2004). X-Ray Luminosity Function ve Total Luminosity of Low-Mass X-Ray Binaries in Early-Type Galaxies. *The Astrophysical Journal* 611, 846–857. doi:10.1086/422210.
- King, A. R. (2004). Ultraluminous X-ray sources ve star formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 347, L18–L20. doi:10.1111/j.1365-2966.2004.07403.x.
- King, A. ve Lasota, J.-P. (2020). Pulsing ve non-pulsing ULXs: the iceberg emerges, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 494, no. 3, pp. 3611–3615, 2020. doi:10.1093/mnras/staa930.

- Kubota, A., Tanaka, Y., Makishima, K., Ueda, Y., Dotani, T., Inoue, H., & Yamaoka, K. (1998). Evidence for a Black Hole in the X-Ray Transient GRS 1009–45. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 50(6), 667-673. doi:10.1093/pasj/50.6.667.
- Koliopanos, F., Vasilopoulos, G., Godet, O., Bachetti, M., Webb, N. A., ve Barret, D. (2017). ULX spectra revisited: Accreting, highly magnetized neutron stars as the engines of ultraluminous X-ray sources, *Astronomy ve Astrophysics*, vol. 608. doi:10.1051/0004-6361/201730922.
- Koliopanos, F., Vasilopoulos, G., Buchner, J., Maitra, C., ve Haberl, F. (2019). Investigating ULX accretion flows ve cyclotron resonance in NGC 300 ULX1, *Astronomy ve Astrophysics*, vol. 621. doi:10.1051/0004-6361/201834144.
- Komossa, S., Schulz, H. (1998). The ROSAT view of NGC 1365 ve the luminous highly variable off-nuclear X-ray source NGC 1365-X1. *Astronomy ve Astrophysics* 339, 345–354.
- Konar, S. (2017). Magnetic Fields of Neutron Stars. *Journal of Astrophysics ve Astronomy* 38. doi:10.1007/s12036-017-9467-4.
- Kosec, P., Pinto, C., Walton, D. J., Fabian, A. C., Bachetti, M., Brightman, M., ... & Grefenstette, B. W. (2018). Evidence for a variable Ultrafast Outflow in the newly discovered Ultraluminous Pulsar NGC 300 ULX-1. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 479(3), 3978-3986. doi:10.1093/mnras/sty1626.
- Kretschmar, P., Fürst, F., Sidoli, L., Bozzo, E., Alfonso-Garzón, J., Bodaghee, A., ... & Zhang, S. (2019). Advances in understanding high-mass X-ray binaries with INTEGRAL and future directions. *New Astronomy Reviews*, 86, 101546. doi:10.1016/j.newar.2020.101546.
- Kuntz, K. D., Long, K. S., ve Kilgard, R. E. (2016). A Deep Chandra ACIS Survey of M51, *The Astrophysical Journal*, vol. 827, no. 1, 2016. doi:10.3847/0004-637X/827/1/46.
- Kylafis, N.D., Contopoulos, I., Kazanas, D., Christodoulou, D.M. (2012). Formation ve destruction of jets in X-ray binaries. *Astronomy ve Astrophysics* 538. doi:10.1051/0004-6361/201117052.

- Lakhchaura, K., vd. (2018). Thermodynamic properties, multiphase gas, ve AGN feedback in a large sample of giant ellipticals, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 481, no. 4, pp. 4472–4504. doi:10.1093/mnras/sty2565.
- Lang, F. L., Levine, A. M., Bautz, M., Hauskins, S., Howe, S., Primini, F. A., ... & Petterson, J. A. (1981). Discovery of a 30.5 day periodicity in LMC X-4. *The Astrophysical Journal*, 246, L21-L25. doi:10.1086/183545
- Lewin, W.H.G., van Paradijs, J., Taam, R.E. (1993). X-Ray Bursts. *Space Science Reviews* 62, 223–389. doi:10.1007/BF00196124.
- Lira, P., Ward, M., Zezas, A., Alonso-Herrero, A., Ueno, S. (2002). Chandra observations of the luminous infrared galaxy NGC 3256. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 330, 259–278. doi:10.1046/j.1365-8711.2002.05014.x.
- Liu, J.-F., Bregman, J. N. (2005). Ultraluminous X-Ray Sources in Nearby Galaxies from ROSAT High Resolution Imager Observations I. Data Analysis. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 157, 59–125. doi:10.1086/427170.
- Liu, J., Bregman, J. N., ve McClintock, J. E. (2009). Hubble Space Telescope Monitoring Reveals a 6.1 Day Period for an Ultraluminous X-Ray Source in NGC 1313, *The Astrophysical Journal*, vol. 690, no. 1, pp. L39–L42, 2009. doi:10.1088/0004-637X/690/1/L39.
- Liu, J. (2011). Chandra ACIS Survey of X-ray Point Sources in 383 Nearby Galaxies. I. The Source Catalog, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 192, no. 1. doi:10.1088/0067-0049/192/1/10.
- Liu, J.-F., Bregman, J. N., Bai, Y., Justham, S., Crowther, P. (2013). Puzzling accretion onto a black hole in the ultraluminous X-ray source M 101 ULX-1. *Nature* 503, 500–503. doi:10.1038/nature12762.
- Lomb, N. R., (1976). Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data, *Astrophysics ve Space Science*, vol. 39, no. 2, pp. 447–462. doi:10.1007/BF00648343.
- López, K. M., Heida, M., Jonker, P. G., Torres, M. A. P., Roberts, T. P., Walton, D. J., ... & Harrison, F. A. (2020). NIR counterparts to ULXs (III): completing the photometric

- survey ve selected spectroscopic results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 497(1), 917-932. doi:10.1093/mnras/staa1920.
- Makishima, K., Kubota, A., Mizuno, T., Ohnishi, T., Tashiro, M., Aruga, Y., ... & Okada, K. (2000). The nature of ultraluminous compact X-ray sources in nearby spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, 535(2), 632. doi:10.1086/308868.
- Mezcua, M. (2017). Observational evidence for intermediate-mass black holes, *International Journal of Modern Physics D*, vol. 26, no. 11. doi:10.1142/S021827181730021X.
- Middleton, M. J., Sutton, A. D., Roberts, T. P. (2011). X-ray spectral evolution in the ultraluminous X-ray source M33 X-8. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 417, 464–471. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.19285.x.
- Middleton, M. J., Sutton, A. D., Roberts, T. P., Jackson, F. E., ve Done, C. (2012). The missing link: a low-mass X-ray binary in M31 seen as an ultraluminous X-ray source, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 420, no. 4, pp. 2969–2977. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.20145.x.
- Middleton, M. J., Miller-Jones, J. C., Markoff, S., Fender, R., Henze, M., Hurley-Walker, N., ... & Grainge, K. (2013). Bright radio emission from an ultraluminous stellar-mass microquasar in M 31. *Nature*, 493(7431), 187-190. doi:10.1038/nature11697.
- Middleton, M. J., Walton, D. J., Roberts, T. P., Heil, L. (2014). Broad absorption features in wind-dominated ultraluminous X-ray sources? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 438, L51–L55. doi:10.1093/mnras/slt157.
- Middleton, M. J., Walton, D. J., Fabian, A., Roberts, T. P., Heil, L., Pinto, C., ... & Sutton, A. (2015). Diagnosing the accretion flow in ultraluminous X-ray sources using soft X-ray atomic features. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454(3), 3134-3142. doi:10.1093/mnras/stv2214
- Miller, M. C., Lamb, F. K., ve Psaltis, D. (1998). Sonic-Point Model of KiloHertz Quasi-periodic Brightness Oscillations in Low-Mass X-Ray Binaries, *The Astrophysical Journal*, vol. 508, no. 2, pp. 791–830. doi:10.1086/306408.
- Miller, J. M., Walton, D. J., King, A. L., Reynolds, M. T., Fabian, A. C., Miller, M. C., & Reis, R. C. (2013). Revisiting Putative Cool Accretion Disks in Ultraluminous X-

- Ray Sources. *The Astrophysical Journal Letters*, 776(2), L36. doi:10.1088/2041-8205/776/2/L36.
- Mineo, S., Gilfanov, M., Sunyaev, R. (2012). X-ray emission from star-forming galaxies - I. High-mass X-ray binaries. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 419, 2095–2115. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.19862.x.
- Morton, D. C. (1964). Neutron Stars as X-Ray Sources. *The Astrophysical Journal* 140, 460. doi:10.1086/147940.
- Motch, C., Pakull, M. W., Soria, R., Grisé, F., ve Pietrzyński, G. (2014). A mass of less than 15 solar masses for the black hole in an ultraluminous X-ray source, *Nature*, vol. 514, no. 7521, pp. 198–201. doi:10.1038/nature13730.
- Mucciarelli, P., Zampieri, L., Treves, A., Turolla, R., ve Falomo, R. (2007). X-Ray ve Optical Variability of the Ultraluminous X-Ray Source NGC 1313 X-2, *The Astrophysical Journal*, vol. 658, no. 2, pp. 999–1005. doi:10.1086/512152.
- Mushtukov, A. A., Tsygankov, S. S., Suleimanov, V. F., Poutanen, J. (2018). Ultraluminous X-ray sources as neutrino pulsars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 476, 2867–2873. doi:10.1093/mnras/sty379.
- Ogawa, T., Mineshige, S., Kawashima, T., Ohsuga, K., ve Hashizume, K. (2017). Radiation hydrodynamic simulations of a super-Eddington accretor as a model for ultraluminous sources, *Publications of the Astronomical Society of Japan* , vol. 69, no. 2. doi:10.1093/pasj/psx006.
- Ohsuga, K. (2007). Two-Dimensional Radiation-Hydrodynamic Model for Supercritical Disk Accretion Flows onto Neutron Stars. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 59, 1033. doi:10.1093/pasj/59.5.1033.
- Ohsuga, K., Mineshige, S. (2011). Global Structure of Three Distinct Accretion Flows ve Outflows around Black Holes from Two-dimensional Radiation-magnetohydrodynamic Simulations. *The Astrophysical Journal* 736. doi:10.1088/0004-637X/736/1/2.
- Okada, K., Dotani, T., Makishima, K., Mitsuda, K., Mihara, T. (1998). ASCA Observation of Bright X-Ray Sources in the Nearby Spiral Galaxy IC 342. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 50, 25–30. doi:10.1093/pasj/50.1.25.

- Osherovich, V. ve Titarchuk, L., (1999). Kilohertz Quasi-periodic Oscillations in Neutron Star Binaries Modeled as Keplerian Oscillations in a Rotating Frame of Reference, *The Astrophysical Journal*, vol. 522, no. 2, pp. L113–L116. doi:10.1086/312225.
- Osterbrock D. E., (1989). *Astrophysics of gaseous nebulae ve active galactic nuclei*. University Science Books.
- Ela, M. O., Akyuz, A., Aksaker, N. A. Z. I. M., Avdan, S., Oralhan, I. A., Vinokurov, A., ... & Bizyaev, D. (2021). Optical counterparts of ULXs in two dwarf galaxies: NGC 4861 ve NGC 4449. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505(1), 771-782. doi:10.1093/mnras/stab1321.
- Patruno, A., Zampieri, L. (2010). The black hole in NGC 1313 X-2: constraints on the mass from optical observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 403, L69–L73. doi:10.1111/j.1745-3933.2010.00817.x.
- Pinto, C., Middleton, M. J., Fabian, A. C. (2016). Resolved atomic lines reveal outflows in two ultraluminous X-ray sources. *Nature* 533, 64–67. doi:10.1038/nature17417.
- Pinto, C., Alston, W., Soria, R., Middleton, M. J., Walton, D. J., Sutton, A. D., ... & Roberts, T. P. (2017). From ultraluminous X-ray sources to ultraluminous supersoft sources: NGC 55 ULX, the missing link. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 468(3), 2865-2883. doi:10.1093/mnras/stx641.
- Pintore, F., Belfiore, A., Novara, G., Salvaterra, R., Marelli, M., De Luca, A., ... & Salvaggio, C. (2018). A new ultraluminous X-ray source in the galaxy NGC 5907. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 477(1), L90-L95. doi:10.1093/mnrasl/sly048.
- Pintore, F., Marelli, M. A. R. T. I. N. O., Salvaterra, R., Israel, G. L., Castillo, G. R., Esposito, P., ... & Middleton, M. (2020). The Ultraluminous X-ray sources population of the galaxy NGC 7456. *The Astrophysical Journal*, 890(2), 166. doi:10.3847/1538-4357/ab6ffd.
- Poutanen, J., Lipunova, G., Fabrika, S., Butkevich, A. G., ve Abolmasov, P. (2007). Supercritically accreting stellar mass black holes as ultraluminous X-ray sources, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 377, no. 3, pp. 1187–1194, 2007. doi:10.1111/j.1365-2966.2007.11668.x.

- Rampadarath, H., Morgan, J. S., Soria, R., Tingay, S. J., Reynolds, C., Argo, M. K., & Dumas, G. (2015). A high-resolution wide-field radio survey of M51. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452(1), 32-53. doi:10.1093/mnras/stv1275.
- Reisenegger, A. (2001). Magnetic Fields of Neutron Stars: An Overview. *Magnetic Fields Across the Hertzsprung-Russell Diagram* 248, 469.
- Remillard, R.A., McClintock, J.E. (2006). X-Ray Properties of Black-Hole Binaries. *Annual Review of Astronomy ve Astrophysics* 44, 49–92. doi:10.1146/annurev.astro.44.051905.092532.
- Roberts, T. P. ve Warwick, R. S. (2000). A ROSAT High Resolution Imager survey of bright nearby galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 315, no. 1, pp. 98–114, 2000. doi:10.1046/j.1365-8711.2000.03384.x.
- Roberts, T.P., Warwick, R.S. (2000). A ROSAT High Resolution Imager survey of bright nearby galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 315, 98–114. doi:10.1046/j.1365-8711.2000.03384.x.
- Roberts, T. P., Levan, A. J., Goad, M. R. (2008). New Hubble Space Telescope imaging of the counterparts to six ultraluminous X-ray sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 387, 73–78. doi:10.1111/j.1365-2966.2008.13293.x.
- Castillo, G. R., Israel, G. L., Belfiore, A., Bernardini, F., Esposito, P., Pintore, F., ... & Wolter, A. (2020). Discovery of a 2.8 s pulsar in a 2 day orbit high-mass X-ray binary powering the ultraluminous X-ray source ULX-7 in M51. *The Astrophysical Journal*, 895(1), 60. doi:10.3847/1538-4357/ab8a44.
- Rodríguez, Ó., Clocchiatti, A., ve Hamuy, M. (2014). Photospheric Magnitude Diagrams for Type II Supernovae: A Promising Tool to Compute Distances, *The Astronomical Journal*, vol. 148, no. 6. doi:10.1088/0004-6256/148/6/107.
- Romanova, M. M., Kulkarni, A. K., Long, M., ve Lovelace, R. V. E. (2008). Modeling of Disk-Star Interaction: Different Regimes of Accretion ve Variability, in *A Decade of Accreting MilliSecond X-ray Pulsars*, vol. 1068, pp. 87–94. doi:10.1063/1.3031210.

- Romanova, M. M., Kulkarni, A. K., Lovelace, R. V. E. (2008). Unstable Disk Accretion onto Magnetized Stars: First Global Three-dimensional Magnetohydrodynamic Simulations. *The Astrophysical Journal* 673, L171. doi:10.1086/527298.
- Romanova, M. M., Owocki, S. P. (2016). Accretion, Outflows, ve Winds of Magnetized Stars. *The Strongest Magnetic Fields in the Universe: Space Sciences Series of ISSI* 347. doi:10.1007/978-1-4939-3550-5_11.
- Romero, G.E., Boettcher, M., Markoff, S., Tavecchio, F. (2017). Relativistic Jets in Active Galactic Nuclei ve Microquasars. *Space Science Reviews* 207, 5–61. doi:10.1007/s11214-016-0328-2.
- Saha, A., Shaw, R.A., Claver, J.A., Dolphin, A.E. (2011). Calibration of BVRI Photometry for the Wide Field Channel of the HST Advanced Camera for Surveys. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 123, 481. doi:10.1086/659751.
- Shao, Y., Li, X.-D. (2014). On the Formation of Be Stars through Binary Interaction. *The Astrophysical Journal* 796. doi:10.1088/0004-637X/796/1/37.
- Salvaggio, C., Wolter, A., Pintore, F., Pinto, C., Ambrosi, E., Israel, G. L., ... & Belfiore, A. (2022). Investigating the nature of the ultraluminous X-ray sources in the galaxy NGC 925. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 512(2), 1814-1828. doi:10.1093/mnras/stac559.
- Sathyaprakash, R., Roberts, T. P., Walton, D. J., Fuerst, F., Bachetti, M., Pinto, C. I. R. O., ... & Soria, R. (2019). The discovery of weak coherent pulsations in the ultraluminous X-ray source NGC 1313 X-2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 488(1), L35-L40. doi:10.1093/mnras/lsz086.
- Scargle, J.D. (1982). Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *The Astrophysical Journal* 263, 835–853. doi:10.1086/160554.
- Schweizer, F. (1980). An optical study of the giant radio galaxy NGC 1316 (Fornax A). *The Astrophysical Journal* 237, 303–318. doi:10.1086/157870.
- Schweizer, F. (1981). Optical properties of the central region of NGC 1316 : a small brightcore in a giant D galaxy. *The Astrophysical Journal* 246, 722–739. doi:10.1086/158968.

- Shakura, N.I., Sunyaev, R.A. (1973). Black holes in binary systems. Observational appearance. *Astronomy ve Astrophysics* 24, 337–355.
- Shimura, T., Takahara, F. (1995). On the Spectral Hardening Factor of the X-Ray Emission from Accretion Disks in Black Hole Candidates. *The Astrophysical Journal* 445, 780. doi:10.1086/175740.
- Sirianni, M., Jee, M. J., Benítez, N., Blakeslee, J. P., Martel, A. R., Meurer, G., ... & McCann, W. J. (2005). The photometric performance ve calibration of the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 117(836), 1049. doi:10.1086/444553.
- Song, X., Walton, D. J., Lansbury, G. B., Evans, P. A., Fabian, A. C., Earnshaw, H., & Roberts, T. P. (2020). The hunt for pulsating ultraluminous X-ray sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(1), 1260-1277. doi:10.1093/mnras/stz3036.
- Soria, R., Cropper, M., Pakull, M., Mushotzky, R., Wu, K. (2005). The star-forming environment of an ultraluminous X-ray source in NGC4559: an optical study. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 356, 12–28. doi:10.1111/j.1365-2966.2004.08438.x.
- Stella, L., Vietri, M. (1999). kHz Quasiperiodic Oscillations in Low-Mass X-Ray Binaries as Probes of General Relativity in the Strong-Field Regime. *Physical Review Letters* 82, 17–20. doi:10.1103/PhysRevLett.82.17.
- Stella, L., White, N.E., Rosner, R. (1986). Intermittent Stellar Wind Acceleration ve the Long-Term Activity of Population I Binary Systems Containing an X-Ray Pulsar. *The Astrophysical Journal* 308, 669. doi:10.1086/164538.
- Stetson, P.B. (1987). DAOPHOT: A Computer Program for Crowded-Field Stellar Photometry. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 99, 191. doi:10.1086/131977.
- Straizys, V., Kuriliene, G. (1981). Fundamental Stellar Parameters Derived from the Evolutionary Tracks. *Astrophysics ve Space Science* 80, 353–368. doi:10.1007/BF00652936.

- Stritzinger, M., Burns, C. R., Phillips, M. M., Folatelli, G., Krisciunas, K., Kattner, S., ... & Suntzeff, N. B. (2010). The distance to NGC 1316 (Fornax A) from observations of four type Ia supernovae. *The Astronomical Journal*, 140(6), 2036.
doi:10.1088/0004-6256/140/6/2036.
- Sutton, A. D., Roberts, T. P., ve Middleton, M. J. (2013). The ultraluminous state revisited: fractional variability ve spectral shape as diagnostics of super-Eddington accretion, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 435, no. 2, pp. 1758–1775.
doi:10.1093/mnras/stt1419.
- Sutton, A.D., Roberts, T.P., Middleton, M.J. (2015). X-Ray Spectral Residuals in NGC 5408 X-1: Diffuse Emission from Star Formation, or the Signature of a Super-Eddington Wind? *The Astrophysical Journal* 814. doi:10.1088/0004-637X/814/1/73.
- Stobbart, A.-M., Roberts, T. P., Wilms, J. (2006). XMM-Newton observations of the brightest ultraluminous X-ray sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 368, 397–413. doi:10.1111/j.1365-2966.2006.10112.x.
- Straub, O., Done, C., Middleton, M. (2013). The effect of advection at luminosities close to Eddington: The ULX in M 31. *Astronomy ve Astrophysics* 553. doi:10.1051/0004-6361/201321324.
- Swartz, D. A., Ghosh, K. K., Tennant, A. F., Wu, K. (2004). The Ultraluminous X-Ray Source Population from the Chandra Archive of Galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 154, 519–539. doi:10.1086/422842.
- Swartz, D. A., Tennant, A. F., Soria, R. (2009). Ultraluminous X-Ray Source Correlations with Star-Forming Regions. *The Astrophysical Journal* 703, 159–168.
doi:10.1088/0004-637X/703/1/159.
- Swartz, D. A., Soria, R., Tennant, A. F., ve Yukita, M. (2011). A Complete Sample of Ultraluminous X-ray Source Host Galaxies, *The Astrophysical Journal*, vol. 741, no. 1. doi:10.1088/0004-637X/741/1/49.
- Tao, L., Feng, H., Grisé, F., ve Kaaret, P. (2011). Compact Optical Counterparts of Ultraluminous X-Ray Sources, *The Astrophysical Journal*, vol. 737, no. 2, 2011.
doi:10.1088/0004-637X/737/2/81.

- Takeuchi, S., Ohsuga, K., Mineshige, S. (2013). Clumpy Outflows from Supercritical Accretion Flow. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 65. doi:10.1093/pasj/65.4.88.
- Tauris, T.M., van den Heuvel, E.P.J. (2006). Formation ve evolution of compact stellar X-ray sources. *Compact stellar X-ray sources* 623–665.
- Terashima, Y. ve Wilson, A. S. (2004). The Luminous X-Ray Source Population in M51 Observed with Chandra, *The Astrophysical Journal*, vol. 601, no. 2, pp. 735–758. doi:10.1086/380505.
- Terashima, Y., Inoue, H., ve Wilson, A. S. (2006). Hubble Space Telescope Identification of the Optical Counterparts of Ultraluminous X-Ray Sources in M51, *The Astrophysical Journal*, vol. 645, no. 1, pp. 264–270. doi:10.1086/504251.
- Titarchuk, L. ve Seifina, E. (2016). ESO 243-49 HLX-1: scaling of X-ray spectral properties ve black hole mass determination, *Astronomy ve Astrophysics*, vol. 595, 2016. doi:10.1051/0004-6361/201527840.
- Townsend, L. J. ve Charles, P. A. (2020). Orbital ve superorbital periods in ULX pulsars, disc-fed HMXBs, Be/X-ray binaries, ve double-periodic variables, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 495, no. 1, pp. 139–143. doi:10.1093/mnras/527.1.139.
- Truemper, J., Pietsch, W., Reppin, C., Voges, W., Staubert, R., Kendziorra, E. (1978). Evidence for strong cyclotron line emission in the hard X-ray spectrum of Hercules X-1. *The Astrophysical Journal* 219, L105–L110. doi:10.1086/182617.
- Tsygankov, S. S., Mushtukov, A. A., Suleimanov, V. F., ve Poutanen, J. (2016). Propeller effect in action in the ultraluminous accreting magnetar M82 X-2, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 457, no. 1, pp. 1101–1106. doi:10.1093/mnras/stw046.
- Urquhart, R. ve Soria, R., (2016). Two Eclipsing Ultraluminous X-Ray Sources in M51, *The Astrophysical Journal*, vol. 831, no. 1. doi:10.3847/0004-637X/831/1/56.
- Urquhart, R., Soria, R., Johnston, H. M., Pakull, M. W., Motch, C., Schwobe, A., ... & Anderson, G. E. (2018). Multiband counterparts of two eclipsing ultraluminous X-

- ray sources in M 51. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475(3), 3561-3576. doi:10.1093/mnras/sty014.
- Uttley, P., Cackett, E. M., Fabian, A. C., Kara, E., ve Wilkins, D. R. (2014). X-ray reverberation around accreting black holes, *Astronomy ve Astrophysics Review* , vol. 22, 2014. doi:10.1007/s00159-014-0072-0.
- VanderPlas, J. T. (2018). Understanding the Lomb-Scargle Periodogram. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 236. doi:10.3847/1538-4365/aab766.
- van Haaften, L.M., Maccarone, T.J., Rhode, K.L., Kundu, A., Zepf, S.E. (2019). Discovery of a transient ultraluminous X-ray source in the elliptical galaxy M86. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 483, 3566–3573. doi:10.1093/mnras/sty3221.
- Villar, V. A., Berger, E., Chornock, R., Margutti, R., Laskar, T., Brown, P. J., ... & Reynolds, M. T. (2016). The Intermediate Luminosity Optical Transient SN 2010da: The Progenitor, Eruption, ve Aftermath of a Peculiar Supergiant High-mass X-Ray Binary. *The Astrophysical Journal*, 830(1), 11. doi:10.3847/0004-637X/830/1/11.
- Vinokurov, A., Fabrika, S., ve Atapin, K. (2018). Optical Counterparts of Ultraluminous X-Ray Sources NGC 4559 X-10 ve NGC 4395 ULX-1, *The Astrophysical Journal*, vol. 854, no. 2. doi:10.3847/1538-4357/aaa6c.
- Vinokurov, A., Atapin, K., ve Solovyeva, Y. (2020). Optical Counterpart to the Ultraluminous X-Ray Source in the UGC 6456 Galaxy, *The Astrophysical Journal*, vol. 893, no. 2. doi:10.3847/2041-8213/ab8642.
- IX, X. (2013). X-Ray Outflows ve Super-Eddington Accretion in the Ultraluminous X-Ray Source Holmberg. *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS*, 773(L9), 5pp. doi:10.1088/2041-8205/773/1/L9.
- Walton, D. J., Fürst, F., Harrison, F. A., Stern, D., Bachetti, M., Barret, D., ... & Tao, L. (2018). Super-Eddington accretion on to the neutron star NGC 7793 P13: Broad-band X-ray spectroscopy ve ultraluminous X-ray sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473(4), 4360-4376. doi:10.1093/mnras/stx2650

- Walton, D., Furst, F., Heida, M., Bachetti, M., Brightman, M., Earnshaw, H. (2020). Chandra Constraints on the Current Low-Flux State of NGC7793 P13. *The Astronomer's Telegram* 13791.
- Walton, D. J., Heida, M., Bachetti, M., Fürst, F., Brightman, M., Earnshaw, H., ... & Stern, D. (2021). A new transient ultraluminous X-ray source in NGC 7090. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 501(1), 1002-1012. doi:10.1093/mnras/staa3666.
- Wang, C., Soria, R., Wang, J. (2019). A Sparkler in the Fireworks Galaxy: Discovery of an Ultraluminous X-Ray Transient with a Strong Oxygen Line in NGC 6946. *The Astrophysical Journal* 883. doi:10.3847/1538-4357/ab3c4d.
- Weng, S.-S., Feng, H. (2018). Evidence for Precession due to Supercritical Accretion in Ultraluminous X-Ray Sources. *The Astrophysical Journal* 853. doi:10.3847/1538-4357/aaa45c.
- Zampieri, L., Mucciarelli, P., Falomo, R., Kaaret, P., Di Stefano, R., Turolla, R., Treves, A. (2004). Optical counterpart of the ultraluminous X-ray source NGC 1313 X-2. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 132, 387-391.
- Zampieri, L., Impiombato, D., Falomo, R., Grisé, F., & Soria, R. (2012). Searching for the orbital period of the ultraluminous X-ray source NGC 1313 X-2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419(2), 1331-1337.
- Van Paradijs, J., McClintock, J. E., ve Lewin, W. H. G. (1995). *X-ray Binaries* (Vol. 1, p. 536).
- Wald, R. M. (1984). Black holes, singularities ve predictability. In *Quantum theory of gravity. Essays in honor of the 60th birthday of Bryce S. Dewitt*.
- White, N. E., Nagase, F., ve Parmar, A. N. (1995). The properties of X-ray binaries. *X-ray Binaries*, 1-57.
- Wegner, G., Da Costa, L. N., Alonso, M. V., Bernardi, M., Wilmer, C. N. A., Pellegrini, P. S., ... & Maia, M. (1999). The Nearby Early-type Galaxies Survey (ENEAR): Project Description ve Some Preliminary Results. arXiv preprint astro-ph/9908354.

Walton, D. J., Heida, M., Bachetti, M., Fürst, F., Brightman, M., Earnshaw, H., ... & Stern, D. (2021). A new transient ultraluminous X-ray source in NGC 7090. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 501(1), 1002-1012.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

İsim SOYİSİM : Sinan ALLAK

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 2013

Yüksek Lisans Öğrenimi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, 2017

Doktora Öğrenimi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 2022

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

BİLİMSEL FAALİYETLERİ

a) Yayınlar

1) SCI

Allak, S., Akyuz, A., Aksaker, N., Ozdogan Ela, M., Avdan, S., ve Soydugan, F. (2020). Identification of a new ultraluminous X-ray source in NGC 1316. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 499, no. 4, pp. 5682–5689. doi:10.1093/mnras/staa3073.

Allak S., Akyuz A., Akkaya Oralhan I., Avdan S., Aksaker N., Vinokurov A., Soydugan F., et al., (2022). The transient ultraluminous X-ray source, ULX-4, in M51. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 510, no. 3, pp. 4355–4369, 2022. doi:10.1093/mnras/stab3693.

Allak, S., Akyuz, A., Sonbas, E., & Dhuga, K. S. (2022). Optical counterparts of ULXs in NGC 1672. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 515(3), 3632-3643.

Allak, S. (2022). Detection of 125.5-day Optical Periodic Modulation of the Neutron Star M51 ULX-8. arXiv e-prints. arXiv:2205.03502 (SCI-Yayın aşaması).

Akyuz, A., Avdan, S., Allak, S., Aksaker, N., Akkaya Oralhan, I., ve Balman, S. (2020) The ULX source X-3 in NGC 4258: a search for its X-ray ve optical properties. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 499, no. 2, pp. 2138–2147, 2020. doi:10.1093/mnras/staa2823.

Avdan, S., Akyuz, A., S. Acar., Akkaya Oralhan, I., Allak, S., Aksaker, N. (2022). Investigation of the Connection Between X-ray Binaries ve Compact Star Clusters in NGC 628. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (SCI-Yayın aşaması).

Ozdogan Ela, M., Akyuz, A., Aksaker, N., Avdan, S., Akkaya Oralhan, I. Akkaya; Vinokurov, A., Allak, S., Solovyeva, Y., Atapın, K., Bizyaev, D. (2021). Optical counterparts of ULXs in two dwarf galaxies: NGC 4861 ve NGC 4449, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 505, no. 1, pp. 771–782. doi:10.1093/mnras/stab1321.

2) Diğer

Akyuz, A., Avdan, S., Aksaker, N., Allak, S., ve Oralhan, I. A. (2019). A search for optical counterparts of ULX-4 in M51 galaxy. 10th Jubilee International Conference of the Balkan Physical Union vol. 2075, no. 1. doi:10.1063/1.5091220.

Bulut, I., Kabas, A., Nehir, C., Allak, S., Neslihan, K., Yılan, E., vd. (2017). Information Bulletin on Variable Stars 6191, 1. doi:10.22444/IBVS.6191.

Solmaz, A., Aksaker, N., Akyuz, A., Kurt, Z., Allak, S., Aladag, Y., vd. (2021). Çukurova University Space Sciences ve Solar Energy Research ve Application Center (UZAYMER): I. Observing Conditions ve Ongoing Projects, Turkish Journal of Astronomy ve Astrophysics. arXiv e-prints, arXiv:2103.04855.

Bildiriler

1) Uluslararası

Allak, S., Soyduğan, F. (2018). Semi Detached Binary Star System DM Peg: Light Curve Analysis. Turkish Physical Society 36th International Physics Congress. September 5-9, 2020. Bodrum, Turkey

Allak, S., Akyuz, A., Sonbas, E., Dhuga, K. S. (2019). Luminous X-ray Source Population In Spiral Galaxy NGC 925. 10th Jubilee International Conference of the Balkan Physical Union, Aug. 26-30, 2019. Sofia, Bulgaria

Allak, S., Özdoğan, M., Akyuz, A., Avdan, Ş., Aksaker, N. (2019). Multiwavelength studies of Ultra Luminous X-ray sources in NGC 4625 ve NGC 4861. Turkish Physical Society 36th International Physics Congress. September 4-8, 2020. Bodrum, Turkey

Allak S., Akyuz A., Akkaya Oralhan I., Avdan S., Aksaker N., Vinokurov A., Soyduğan F (2021). The Transient Ultra-luminous X-ray Source, ULX-4, in M51. Timing X-ray Binaries Online Workshop October 7-8, 2021

Allak, S., Akyuz, A., Sonbas, E., Dhuga, K. S. (2022). Black Hole Accretion Under The X-Ray Microscope. European Space Astronomy Centre (ESAC) Villafranca del Castillo 14-17 June 2022. Madrid, Spain

2) Ulusal

Allak, S., (2016). Çanakkale İli ve Yakın Çevresinin Zamansal Değişiminin Uzaktan Algılama ve CBS Kullanılarak İncelenmesi. Trakya Üniversiteler Birliği Lisansüstü Öğrenci Kongresi 29-30 Nisan 2016, Çanakkale, Türkiye

Allak, S., Akyuz, A., Sonbas, E., Dhuga, K. S. (2018). İki Yakın Sarmal Galakside X-ışın Kaynak Popülasyonunun Araştırılması. 21. Ulusal Astronomi Kongresi 3-7 Eylül 2018 Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

Allak, S., Akyuz, A., Aksaker, N., Ozdoğan Ela, M., Avdan, S., ve Soyduğan, F. (2021). NGC 1316'da Yeni Bir Aşırı Parlak X-ışın Kaynağının Tanımlanması. Astrofizikte Güncel Lisansüstü Çalışmalar- 2. Ege Üniversitesi Gözlemevi Çalıştay Serisi. İzmir, Türkiye

Allak, S. (2020). M51 Gökadasındaki ULX X-4'ün Özellikleri. Çukurova Üniversitesi Uzay Bilimleri ve Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (UZAYMER). 30-31 Ocak 2020. Adana, Türkiye

c) Katıldığı Projeler

- TÜBİTAK Projesi (114F166) Tek Yıldızın Dönüşüm Yolundaki Değerli Çift Yıldızlar. 1001 Matematik Fizik Araştırma Destek Grubu
- TÜBİTAK Projesi (117F115) Aşırı Parlak X-ışın Kaynaklarının Optik ve Kırmızıöte Bölgede Yıldız Kümeleri ve Yıldız Oluşum Bölgeleri ile İlişkilerinin Araştırılması. 1001 Matematik Fizik Araştırma Destek Grubu
- TÜBİTAK Projesi (119F315) Yerel Küme Ötesi Galaksilerde Sıkı Yıldız Kümeleri ve X-ışın Çiftleri Arasındaki Etkileşimin Doğası. 1001 Matematik Fizik Araştırma Destek Grubu
- TÜBİTAK Projesi (117B180) Balıkesir Astronomi Senliği, Bilim ve Toplum Başkanlığı Programlar Müdürlüğü
- TÜBİTAK Projesi (118B487) Yıldızların Pesinden Çizgi Film Atölyesi. Bilim ve Toplum Başkanlığı Programlar Müdürlüğü.
- TÜBİTAK Projesi (118B737) Yüregir Bilim Senliği: Havacılık ve Uzay. Bilim ve Toplum Başkanlığı Programlar Müdürlüğü
- TÜBİTAK Projesi (118B633) Adana Bilim Senliği ve Fuarı. Bilim ve Toplum Bakanlığı Programlar Müdürlüğü

İLETİŞİM

E-posta Adresi :

ORCID :