

T.C.
ADİYAMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

DÜŞÜK KÜTLELİ X – IŞIN ÇİFTLERİNİN TAYF
ANALİZLERİ İLE SINIFLANDIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKUP GENÇ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Eda SONBAŞ

ADİYAMAN, 2023

**T.C.
ADYAMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DÜŞÜK KÜTLELİ X – IŞIN ÇİFTLERİNİN TAYF
ANALİZLERİ İLE SINIFLANDIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKUP GENÇ

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Eda SONBAŞ**

ADYAMAN, 2023

ÖZET

DÜŞÜK KÜTLELİ X – IŞIN ÇİFTLERİNİN TAYF ANALİZLERİ İLE SINIFLANDIRILMASI

Yakup GENÇ

Fizik Anabilim Dalı

Adıyaman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 01/2023

Danışman: Prof. Dr. Eda SONBAŞ

X – ışın çiftleri üzerine yapılan birçok çalışma termal ve termal olmayan yayının bileşenlerinin varlığına işaret etmektedir. Yığılma diskinin iç kısımları ile ilişkili olduğu düşünülen termal birleşen genellikle tek veya çok-renkli kara cisim modeli ile temsil edilebilirken termal olmayan bileşen tayfın sert veya yumuşak olup olmadığı konusunda bilgi edinilmesini mümkün kılan güç yasası (powerlaw; PL) ile ifade edilmektedir. Düşük kütleli X – ışın çiftlerinin (Low Mass X-Ray Binaries; LMXBs) bir alt grubu için ışıma gücü değeri $\sim 10^{34} - 10^{37}$ erg/s aralığında nötron yıldızı (NY) çiftleri için sistem durgun haldeki ışıma gücü seviyesine ($\sim 10^{34}$ erg/s) azalırken tayflarında bir yumuşama, buna karşın kara delik (KD) sistemlerinin tayflarında ise aynı ışıma gücü seviyelerinde bir sertleşme olduğunu öngörülmektedir. Bu yumuşama, 0,5–10 keV aralığında tayfsal indis (Γ) ve gözlenen X – ışın ışıma gücü (L_x) arasında olan zıt bağımlılık (anticorrelation) temel alınarak açıklanmıştır. Bu tez çalışmasında Γ ve L_x arasında görülen ilişki iki KD ve iki NY LMXB sistemi için NICER, SWIFT, ve XMM-Newton uydu verileri kullanılarak $L_x \sim 10^{34} - 10^{37}$ erg/s aralığında incelenmiştir. NY ve KD sistemleri için genel olarak gözlenen ilişkinin kaynak özelliklerini uzun dönemli gözlemler için temsil ettiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Güç yasası; Kara delik; Nötron yıldızı; LMXB

ABSTRACT

CLASSIFICATION OF LOW MASS X – RAY BINARIES WITH SPECTRAL ANALYSIS

Yakup GENÇ

Department of Physics

Adıyaman University, Graduate Education School, 01/2023

Supervisor: Prof. Dr. Eda SONBAŞ

Studies of X-ray binaries indicate the presence of thermal and non-thermal emission components in their spectra. The thermal component, thought to be associated with the inner parts of the accretion disk, is typically modeled by a single- or multi-color blackbody model. The non-thermal component on the other hand is usually represented as a power-law (PL) to characterize whether the spectrum is soft or hard. Recent studies of a small subset of low-mass X-ray binaries (LMXBs) in the luminosity range of $\sim 10^{34} - 10^{37}$ erg/s showed that the spectra of neutron-star X-ray binaries (NSXBs) soften with decreasing luminosity while the black-hole X-ray binaries (BHXBs) in the same low-luminosity range have significantly harder spectra. This softening is characterized in terms of an anti-correlation between the spectral index (Γ) and the observed X-ray luminosity (L_x) in the 0.5 – 10 keV energy range. In this thesis, we study the behavior of four such systems in the low-luminosity region ($\sim 10^{30} - 10^{37}$ erg/s). In particular, we investigate the relationship between the spectral index and the X-ray luminosity of the following sources: 2 BHXBs (2S 0921-63, 4U 1957+11), and 2 NSXBs (4U 1608-52, MAXI J1807+132). We deploy data from the NICER, SWIFT, and XMM – Newton archives. Our analysis suggests that the generic correlation survives for these individual sources in their long-term behavior.

Key Words: Power Law; Black hole; Neutron star; LMXB

DESTEKLER

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, TÜBİTAK tarafından 117F334 numaralı proje ile desteklenmiştir.



TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, iki yıl boyunca değerli bilgilerini benimle paylaşan, desteğini esirgemeyen ve tüm bu süreç boyunca göstermiş olduğu anlayış, sabır ve hoşgörölü tavırlarından dolayı danışman hocam; Prof. Dr. Eda SONBAŞ' a, çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Abdullah YAVUZ' a ve çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli eşim Sebahat GENÇ' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Adıyaman Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
(İmza)

Yakup GENÇ

İÇİNDEKİLER

BAŞLIK SAYFASI.....	ii
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
DESTEKLER.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
TABLOLAR DİZİNİ.....	xi
DENKLEMLER	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1. X-Işın Çiftleri	13
3.1.1. Büyük kütleli x-ışın çiftleri (HMXBs).....	14
3.1.2. Düşük kütleli x-ışın çiftleri (LMXBs)	14
3.1.3. Nötron yıldızı içeren düşük kütleli x-ışın çiftleri (NY-LMXB)	16
3.1.4. Nötron yıldızı – LMXB’lerin enerji tayfları.....	17
3.1.5. Kara delik içeren düşük kütleli x-ışın çiftleri (KD-LMXB)	19
3.1.6. NY ve KD sistemleri arasındaki benzerlik ve farklılıklar	22
3.1.6.1. X-ışın patlamaları.....	22
3.1.6.2. Enerji tayfları.....	22
3.1.6.3. Zaman değişkenliği.....	23
3.1.6.4. Sessiz evredeki yayılım.....	24
3.1.7. LMXB’lerin düşük ışıma bölgesindeki davranışları	24
3.2. Veri Analiz Yöntemleri ve Kullanılan Modeller	26
3.2.1. Power law (güç yasası modeli).....	27
3.2.2. Bbody (kara cisim modeli)	28
3.2.3. Diskbb (disk kara cisim modeli).....	29
3.2.4. Bbodyrad (alanla normalize kara cisim modeli)	29
3.2.5. Nthcomp (termal olarak komptonize sürekli ışıyım)	29

3.2.6. compPS (komptonizasyon).....	30
3.3. NICER X-ışın Zamanlama Uydusu.....	30
3.4. SWIFT (Neil Gehrels Swift Gözlemevi):.....	31
3.5. XMM-Newton Teleskobu	32
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	45
KAYNAKÇA.....	47
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1. Analizleri yapılan kaynakların model fitlerinden elde edilen parametreler..... 42

Tablo 4.2. Düşük Parlaklık aralığındaki LMXB seti için kullanılan parametreler..... 46



DENKLEMLER

	Sayfa
Denklem 2.1. Yüksek enerjili fotonların güç yasası dağılımı.....	9
Denklem 2.2. Düşük enerjili fotonların güç yasası dağılımı.....	9
Denklem 3.1. Kara cisim ışıması.....	29



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Düşük Kütleli X-Işını Çift Sisteminin şematik gösterimi	5
Şekil 2.2. NY ve KD çiftleri için X – ışın ışıma gücünün foton indisine karşı grafiği.....	7
Şekil 2.3. KD ve NY çiftleri için 0.5–10 keV'de tayfsal indis ve X-ışın ışıması.....	10
Şekil 2.4. KD ve NY çiftleri için tayfsal indis ve compton-y parametresi	10
Şekil 2.5. 0.5–10 keV'deki ışıma gücünün bir fonksiyonu olarak tayfsal indis.....	12
Şekil 3.1. X-ışını çiftlerini oluşturan tüm farklı alt sistemlerin yer aldığı diyagram.....	13
Şekil 3.2. Nötron yıldızlarının tayfsal değişimleri.....	16
Şekil 3.3. NY ve KD'lerin sergilediği parlaklık değişimleri	17
Şekil 3.4. RMS-ışıma gücü diyagramı.....	18
Şekil 3.5. Patlamaların sertlik-şiddet diyagramlarının şematik gösterimi	21
Şekil 3.6. GX339-4 kaynağının Sertlik-Şiddet diyagramı (HID)	22
Şekil 3.7. NY tayfında gözlenen yumuşamayı açıklayan iki olası senaryo.	26
Şekil 3.8. Farklı sıcaklıklar için kara cisim ışıma modeli	28
Şekil 3.9. ISS üzerinde görevini gerçekleştiren NICER uydusu.....	31
Şekil 3.10. XRT dedektörünün bir gösterimi.....	32
Şekil 3.11. XMM-Newton uydu sistemi	33
Şekil 4.1. Kaynakların uzun dönemli MAXI ışık eğrileri.....	36
Şekil 4.2. Kaynaklarının farklı modeller kullanılarak elde edilen tayfları verilmektedir. ...	37
Şekil 4.3. KD ve NY çiftleri için tayfsal indekse karşı 0.5-10 keV'de X-ışını parlaklığı. .	38
Şekil 4.4. KD ve NY çiftleri için tayfsal indekse karşı compton-y parametresi.....	40
Şekil 4.5. KD ve NY çiftleri için compton-y parametresine karşı kTe.....	40

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$M_{\odot}$	: Güneş kütlesi
Γ	: Tayfsal indis
L_x	: Işıma gücü
LMXB	: Low Mass X-Ray Binaries
HMXB	: High Mass X-Ray Binaries
LHS	: Low Hard State
HIMS	: Hard Intermediate State
SIMS	: Soft Intermediate State
HSS	: High Soft State
HID	: Hardness-Intensity Diagram
RID	: RMS-Intensity Diagram
IVD	: Intensity-Variability Diagram
HRD	: Hardness-RMS Diagram
RMS	: Root Mean Square
MTS	: Minimum Time scale
PSD	: Power Spectral Density
RXTE	: Rossi X-Ray Timing Explorer
NICER	: Neutron Star Interior Composition Explorer
XSPEC	: X-Ray Spectral Fitting Package
QPO	: Quasi-Periodic Oscillation
ASM	: All Sky Monitor
PCA	: Proportional Counter Array
SSC	: Scanning Shadow Cameras
CPU	: Proportional Counter Unit

1. GİRİŞ

X-ışın çiftleri, ya bir nötron yıldızı (NY) ya da bir kara delik (KD) içeren ve bir yoldaş yıldızdan madde transferi yapan sistemlerdir. X-ışın çiftleri, tıkHz nesnenin doğasına bakılmaksızın, eşlik eden yıldızın kütlesine göre iki farklı sınıfa ayrılabilir: Büyük Kütleli X-ışın Çiftleri (HMXB) ve Düşük Kütleli X-ışın Çiftleri (LMXB). LMXB'lerde ikincil bileşen, madde transferini Roche lop taşması ile aktaran düşük kütleli (genel olarak $M^* \leq 1M_{\odot}$) bir yıldızdır. LMXB'lerden gelen sürekli optik ışıma genel olarak X-ışınlarının bir bölümünün diskteki optik fotonların yeniden etkileşime girmesi ile tıkHz yıldızın etrafındaki yığılma diskinden gelen yayını kaynağıdır (Van Paradijs ve McClintock, 1995:58).

LMXB'lerin keşfedilmesinin ardından günümüze kadar X-ışın bölgesi başta olmak üzere bütün ışıma bantlarında oldukça yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Özellikle $L_x > 10^{36}$ erg s⁻¹ ışıma güçlerinde sergiledikleri gözlemsel özellikleri mevcut tüm X-ışın uydularından elde edilen veriler kullanılarak karakterize edilmiştir (Lin vd., 2007:1073; Remillard ve McClintock, 2006:49). Teknolojinin gelişmesi ile birlikte dedektörlerin düşük ışıma gücünde daha hassas ölçümler yapabilmesi ve buna bağlı olarak elde edilen veri miktarının artmasına rağmen $10^{34} - 10^{36}$ erg s⁻¹ ışıma güçlerindeki davranışları henüz tam anlamıyla anlaşılmış değildir (Wijnands vd., 2015:1371).

LMXB'ler ile ilgili yapılan birçok çalışma 0.5 – 10 keV enerji aralığında tayflarında hem termal hem de termal olmayan bileşenlerin bir arada bulunduğunu göstermektedir. Termal bileşenin yığılma diskinin iç kısımları ile ilişkili olduğu ve kara cisim modeli ile temsil edilebileceği önerilirken, termal olmayan bileşen için tayfin sert veya yumuşak olup olmadığı konusunda bir gösterge olan güç kanunu (powerlaw, PL, $N(E) \propto E^{-\Gamma}$) ile ifade edilmektedir. Yaygın olarak kullanılan bu model (Liu vd., 2002:173; Meyer vd., 2000:175), düşük enerjili fotonların ters Compton saçılması ile yüksek enerjilere taşınması şeklinde yorumlanır. Sistemde koronanın doğası ve yığılma diskinin geometrik yapısı hakkında bilinenler yeterli olmadığından LMXB'ler ile ilgili araştırmalar yapmak yüksek enerji astrofiziği alanında geniş ilgi uyandırmaktadır (Remillard ve McClintock, 2006:49).

Yapılan gözlemler (Qiao ve Liu, 2020:2704; Sonbas vd., 2018:150; Wijnands vd., 2015:1371), LMXB'lerin 0.5 ile 10 keV enerji aralığında X-ışını foton indisi (Γ) ile X-ışını enerji tayfı ($L_{0.5-10}$ keV) arasında bir antikorelasyon olduğunu göstermektedir. Sistem durgun haldeki (quiescent) ışıma gücü seviyesine ($\sim 10^{34}$ erg/s) azaldığında NY-LMXB'lerin tayflarında bir yumuşama gözlenirken çoğu KD-LMXB'lerin tayflarında ise sertleşme

olduğu yapılan çalışmalarda birçok kez görülmüştür.

Bu tez çalışmasında Γ ve $L_{0.5-10}$ keV arasında $\sim 10^{30} - 10^{37}$ erg/s' lik ışıma gücü bölgesinde görülen ilişki seçilen toplam dört (iki KD ve iki NY-LMXB) sistem için ağırlıklı olarak NICER, SWIFT ve ek olarak XMM-Newton uydu verileri kullanılarak incelenmiştir. Ortaya konulan bu ilişkinin kapsamlı bir veri seti için geçerliliğini koruduğu görülmüştür. Ek olarak seçilen dört sistem optik olarak ince bir sıcak korona ile optik olarak kalın düşük enerjili foton kaynağı arasında bir geri bildirim mekanizması olduğunu varsayan Komptonizasyon modeli ile korona sıcaklıkları, compton-y parametreleri karşılaştırarak da incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar uzun vadede düşük enerjilerde bu sistemlerin farklılaşma nedenlerinin tanımlanmasını sağlayacak önemli bir gösterge niteliğinde olacaktır. Ayrıca, her bir kaynak için Γ ve L_x arasındaki ilişki incelenen kaynaklar için elde edilerek NY ve KD sistemleri için genel olarak gözlenen ilişkinin bireysel kaynak özelliklerini de temsil ettiğinin belirlenmesini sağlamıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çift yıldız sistemleri, ortak kütle merkezleri etrafında dönen iki yıldız içerir. Çift yıldızların özel bir sınıfı olan X-ışını çiftleri, Galaksimizdeki en parlak X-ışını kaynakları arasındadır. X-ışını çiftleri, normal bir yıldız ve evriminin son aşamasına gelmiş olan tıkız bir yıldızdan (beyaz cüce, NY veya KD) oluşur. Bu sistemlerde, yıldızlar birbirine yeterince yakınsa, yoğun olan tıkız yıldızın kütle çekimi veya normal yıldızın yıldız rüzgârları ile madde transferi gerçekleşir ve X-ışınları üretilir. Normal yıldızdan toplanan madde bir yığılma diski vasıtasıyla tıkız yıldızın etrafına birikir. Yığılma diskinin tıkız yıldızın üzerine düştüğü iç bölgesinden yoğun X-ışını yayılımı salınır. X-ışınları, biriken maddenin çok yüksek sıcaklıklara ($>10^6$ K) ulaştığı tıkız yıldızın çevresindeki alandan gelir¹.

1962 yılındaki keşiflerinden bu yana (Giacconi vd., 1962:439) Galaksimizdeki yığılma gösteren tıkız nesneleri gözlemlemek, yıldız evriminin son aşamalarının ve olağanüstü fiziksel koşullarda maddenin fiziksel durumlarının anlaşılması için benzersiz bir bakış açısı sunmuştur. Keşiflerinden sonraki ilk otuz yıl boyunca, dönen nötron yıldızlarının X-ışını ışık eğrisindeki periyodik salınımlar (Giacconi vd., 1971:67) ve NY yüzeyinden gelen termonükleer atımların güçlü X-ışını parlamaları olarak tespit edilmesi gibi yeni birçok olay keşfedilmiş ve araştırılmıştır (Grindlay vd., 1976:127). Ayrıca, çoğu sistemdeki tıkız nesnelerin kütlelerinin ölçülmesi çift sistemlerde KD varlığına ilişkin çok güçlü kanıtlar sağlamıştır (McClintock & Remillard, 1986:110).

Geçtiğimiz 25 yıl boyunca, RXTE, BeppoSAX, Chandra X-ışını Gözlemevi, XMM-Newton, NICER ve SWIFT (Neil Gehrels Swift Gözlemevi) gibi benzeri görülmemiş yeteneklere sahip X-ışını teleskopları ile yapılan çalışmalar, yığılma yapan tıkız nesnelerin özelliklerinin anlaşılmasına katkılar sağlamıştır. Bu çalışmalara verilebilecek ilk örnekler, NY yüzeyinin ve KD olay ufkunun hemen dışındaki dinamik zaman ölçeklerinde meydana gelen hızlı değişkenlik olaylarını içerir (Strohmayer vd., 1996:9; van der Klis vd., 1996:1). Bunların yanı sıra, tıkız nesnelerin civarındaki genel görelilik etkileriyle kırmızıya ve maviye kaymış atomik çizgilerin tespit edilmesi de örnekler arasında gösterilebilir (Cottam vd., 2001:277; Miller, 2007:441). Yığılma yapan NY ve KD'ler, radyo ışımasından gama ışınlarına kadar geniş bantlarda gözlemler yapan araçlarla incelenmiş ve neticesinde yüksek

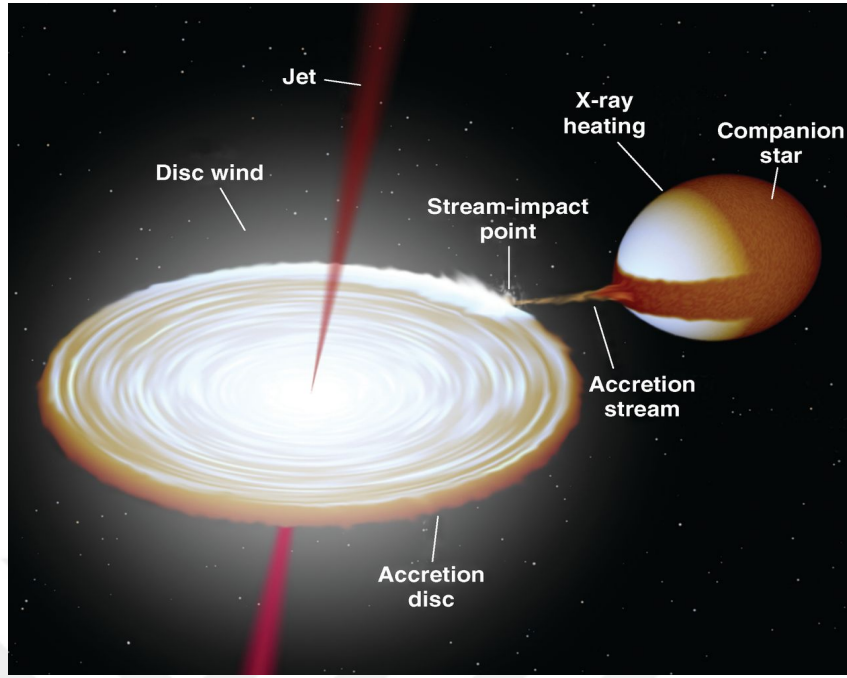
¹ <https://www.cosmos.esa.int/web/cesar/x-ray-binaries-monitoring>

oranda rölativistik özellik gösteren jetlerin keşfedilmesini (Mirabel ve Rodríguez, 1994:46), yığılma akışının dolaylı gözlemlerini (Horne, 1985:129), ve kütleleri genel göreliliğin izin verdiği maksimum değere yakın olan NY'lerin tanımlanmasını (Barziv vd., 2001:925) sağlamıştır. Son olarak, yığılma akışının teorik olarak modellenmesi ile geometrik olarak ince disklerin yığılma akışları için standart modelin ötesinde kararlı çözümler (Narayan ve Yi, 1994:13) ve yığılma akışlarında açısal momentumun oldukça verimli olarak taşınmasını açıklamaya yönelik çalışmalara (Balbus ve Hawley, 1991: 214) öncülük edebilecek önemli ilerlemeler kaydedilmiştir (Psaltis, 2006:1).

X-ışın çiftleri, temelinde yatan fiziği daha iyi yansıtması amacıyla birbirleriyle de örtüşebilen özellik gösteren birkaç alt sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma tıkız X-ışını kaynağından ziyade, optik bölgede görünür olan bileşenin kütlesine göre (yüksek, orta, düşük) yapılmaktadır. Tıkız nesneye (KD ya da NY) eşlik eden nesnenin kütlesi $\leq 1 M_{\odot}$ ise LMXB, $>10 M_{\odot}$ ise HMXB olarak adlandırılır².

HMXB'lerde, kütle transferi, genç bir yıldız popülasyonu içinde olan O veya B tipi kütleli bir yıldızdan ($>10 M_{\odot}$) gelen güçlü bir yıldız rüzgarı tarafından sağlanır. LMXB'lerde, Güneş benzeri bir yıldızdan düşük manyetik alanlı bir NY veya bir KD madde aktarımı, Roche lop taşması ile gerçekleşmektedir. LMXB'lerde eş yıldız, düşük kütleli A veya daha geç tip bir yıldızdır ve gözlemlenen X-ışın yayılımını oluşturmaya yetecek kadar güçlü yıldız rüzgârları oluşturmazlar. Bunun yerine LMXB'lerdeki madde aktarımı, düşük kütleli yıldızın Roche lopunu doldurması ve tıkız nesne etrafında bir yığılma diski oluşturması ile gerçekleşir. Yığılma, maddenin X-ışını bölgesinde yayılım yapabilmesi için yeterince yüksek sıcaklıklara ($\sim 10^7$ K) kadar ısıtıldığı bir yığılma diski aracılığıyla gerçekleşir (Shakura ve Sunyaev, 1973:33). Yığılma mekanizması, aynı zamanda jetler olarak bilinen rölativistik hızlarda zıt yönde madde atımı yapan yapıların oluşmasını da sağlamaktadır. LMXB'lerin farklı bölgeleri, farklı dalga boylarında yapılan gözlemler ile incelenebilir. Tıkız nesnenin yüzeyini de içeren iç bölgeler ve tıkız nesne ile diskin iç kısımları ve korona arasındaki sınır tabakasını içeren bölgeler hem yumuşak (düşük enerjili) hem de sert (yüksek enerjili) X-ışınlarında gözlemlenebilir (Şekil 2.1).

² <https://www.cosmos.esa.int/web/cesar/x-ray-binaries-monitoring>



Şekil 2.1. Düşük Kütleli X-Işını Çift Sisteminin şematik gösterimi (Landaluce, 2015:1)

LMXB’lerde farklı tayfsal durumlar ve bu durumlar ile ilgili geçişler sertlik-yoğunluk diyagramında (HID; (Belloni, 2010:53) ve buradaki referanslar) görülmektedir ve literatürde yoğun bir şekilde tartışılmaktadır (Belloni, 2010:53; Remillard ve McClintock, 2006:49). Genel olarak kabul edilen en belirgin iki durum, düşük/sert (LHS) ve yüksek/yumuşak durumlardır (HSS). Yanı sıra, sert/orta durum (HIMS), yumuşak/orta durum (SIMS) gibi diğer durumlar da bulunmaktadır (Homan & Belloni, 2005). Ek olarak LHS ile ilişkili sessiz (quiescent) olarak tanımlanan bir başka durum da bulunmaktadır (Belloni, 2010:53; Done vd. 2007:1; Dunn vd. 2010:61). Son olarak, Remillard ve McClintock (2006:49) tarafından sert, termal ve dik güç yasası (SPL) evreleri de XRB’ler ile ilişkili olarak tanımlanmaktadır. HID diyagramı, yığılma hızı, yığılma diskinin fiziksel boyutu ile gözlemlenen evreleri ve bu evreler arasındaki geçişlerin altında yatan ana itici güçler olduğu düşünülen birincil yayılım süreçleri gibi önemli küresel özellikleri ilişkilendirmektedir. Ek olarak, Sonbas vd. (2020:2513,2022:2535) tarafından yapılan çalışmalarda ‘minimal zaman ölçeği: MTS’ olarak adlandırılan yeni bir zaman ölçeği kullanılarak karadelik çiftlerinde görülen tayfsal durum geçişlerini tanımlamak için Şiddet-Değişkenlik (IVD) diyagramları oluşturmuş ve gözlemlenen değişimlerin HID’deki q-benzeri yapıya oldukça duyarlı olduğu gösterilmiştir.

Tayfsal ve zamansal özelliklerine dayalı olarak, sert ve termal durumlar sırasıyla LHS

ve HSS ile kolayca tanımlanır. Ancak, SPL durumu o kadar kolay açıklanamaz; ilk bakışta iki ara durum olan HIMS ve SIMS ile örtüşür. Bu, özellikle yalnızca bir parlaklık ölçeğine dayalı olarak bir LMXB örneğinin tayfsal özelliklerini karşılaştırırken potansiyel olarak bir karışıklık ve belirsizlik yaratmaktadır.

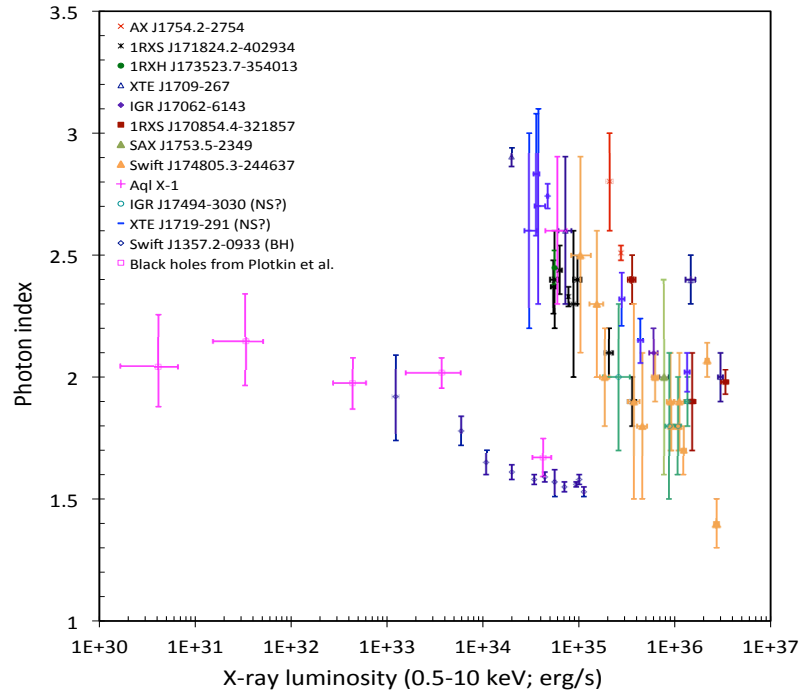
Geçici X-ışın kaynağı olan çoğu NY-LMXB uzun yıllar boyunca (bazıları 10 yılı aşkın sürelerde) herhangi bir aktivite göstermeden sessiz kalabilirler. Bu kaynakların bazıları $L_x \sim 10^{36} - 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ değerlerine ulaştığında yani patlamaya girdiklerinde keşfedilirler. Patlama haftalardan aylara kadar sürer ve ardından kaynaklar yavaşlayarak tekrar sessiz evreye geçerler (bkz. Campana vd., 1998: 279; Wijnands vd., 2006:1117). LMXB'ler 1960'ların sonlarında keşfedildiğinden bu yana özellikle $L_x > 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ için gözlemsel özellikleri mevcut tüm X-ışını uydularından elde edilen veriler kullanılarak çalışılmış ve özellikleri karakterize edilmiştir (Lin vd., 2007:1073; Remillard ve McClintock, 2006:49). Son yıllarda detektörlerin daha düşük ışıma güçlerindeki hassasiyetlerinin artması ve buna bağlı olarak artan veri miktarına rağmen LMXB'lerin $10^{34-36} \text{ erg s}^{-1}$ ışıma güçlerindeki davranışları henüz tam anlamıyla anlaşılmamıştır (Wijnands vd., 2015:1371).

Son yıllarda yapılan çalışmalar LMXB'lerin 0.5–10 keV enerji aralığında tayflarında termal ve termal olmayan bileşenlerin bir arada bulunduğunu ortaya koymuştur. Yığılma diskinin iç kısımları ile ilişkili olduğu düşünülen termal bileşen genellikle tek veya farklı sıcaklık içeren kara cisim modeli ile temsil edilir. Termal olmayan bileşen tayfın sert ($\Gamma < 2$) veya yumuşak ($\Gamma > 2$) olup olmadığı konusunda bilgi edinilmesini mümkün kılan ve $N(E) \propto E^{-\Gamma}$ şeklinde tanımlanabilen güç kanunu ile ifade edilmektedir (Lin vd., 2009:1275). Literatürde yaygın olarak kullanılan bu model (Liu vd., 2002:173; Meyer vd., 2000:175), merkezden saçılan düşük enerjili fotonların yoğun cismin etrafındaki sıcak korona elektronları tarafından ters kompton saçılması ile yüksek enerjilere taşınması ile oluşan ışımayı tanımlar. Koronanın doğası ve kompton saçılmasının kritik bileşeni olan düşük enerjili fotonların temelini oluşturan geometrik yapısı hakkında bilinenler yeterli değildir. Bu nedenle KD ve NY sistemlerinin düşük-sert ve durgun durumlarının farklı yöntemlerle araştırılması yüksek enerji astrofiziği camiasında geniş ilgi uyandırmaktadır (Remillard ve McClintock, 2006:49).

LMXB'lerin bir alt grubu için $L_x \sim 10^{34} - 10^{37} \text{ erg/s}$ aralığında yapılan çalışmalar NY çiftleri için sistem durgun haldeki ışıma gücü seviyesine ($\sim 10^{34} \text{ erg/s}$) azalırken tayflarında bir yumuşama, KD sistemlerinin tayflarında ise aynı ışıma gücü seviyelerinde bir sertleşme

olduğunu öngörmektedir. Bu yumuşama, 0.5 – 10 keV enerji aralığında Γ ve gözlenen L_x arasında olan ters-korelasyon temel alınarak açıklanmıştır (Qiao ve Liu, 2020:2704).

Genel olarak, $L_{0.5-10\text{keV}} \sim 10^{34} - 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ X-ışını parlaklık aralığında NY-LMXB'lerin 0.5 ve 10 keV arasındaki X-ışını tayfı, tek bir güç yasası kullanılarak tanımlanabilir. Ancak, $L_{0.5-10\text{keV}} \sim 10^{34} - 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ aralığında, yeterince iyi veriye sahip kaynaklar için düşük enerjilerde ek bir termal X-ışını bileşeni eklenerek daha iyi betimlenebilir (Armas Padilla vd., 2013:3083). Fakat tayfa hangi modelin uyduğuna bakılmaksızın hem KD hem de NY sistemleri azalan parlaklık ile daha yumuşak hale gelirler (Armas Padilla vd., 2011: 659, 2013:3083; Plotkin vd., 2013:59; Reynolds vd., 2014:3656; Yang vd., 2015:1692). Wijnands vd. (2015:1371), 0.5-10 keV arasında $L_{(0.5-10\text{keV})} \sim 10^{34} - 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ parlaklığına sahip X-ışını tayflarını içeren bir dizi NY-LMXB örneğini çalışmıştır. Örneklemdaki tüm kaynaklar atım (puls) yapmayan, yani manyetik alanın X-ışını tayfı üzerindeki etkisinin çok az olduğu sistemler olarak belirlenmiştir. Seçilen tüm kaynakların X-ışını tayfları, literatürlerde ilk defa tek bir güç yasası modeliyle betimlenmiştir. Çalışılan sistemler için, ısıma güçleri $10^{34} - 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ aralığında Γ ile L_x arasında belirgin bir ters-korelasyon olduğu bulunmuştur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. NY ve KD çiftleri için 0.5 – 10 keV enerji aralığında hesaplanan X – ışın ısıma

gücünün foton indisine karşı grafiği (Wijnands vd., 2015:1371).

Γ ve L_X arasındaki böyle bir ters-korelasyon, sert evredeki geçici KD X-ışın kaynakları için çalışılmıştır (Homan vd., 2013:9; Liu vd., 2019:5335; Plotkin vd., 2013:59; Wu ve Gu, 2008:212). Wijnands vd., (2015:1371) yaptıkları çalışmada, NY-LMXB ve geçici KD X-ışın kaynaklarını karşılaştırmalı olarak incelemiş ve NY-LMXB' ler için Γ ile L_X arasında görülen ters-korelasyonun NY kaynaklarının KD kaynaklarına göre düşük ışıma güçlerinde daha yumuşak tayfsal bir davranış sergilediği sonucuna varmıştır. Ek olarak, Γ ' nın NY-LMXB'ler ve geçici KD kaynakları arasındaki ayrımı, $\sim 10^{35}$ erg s⁻¹'nin altındaki X-ışını parlaklığı için $\sim 10^{35}$ erg s⁻¹ eşiğinin üzerindeki daha belirgin olduğu görülmüştür.

KD sistemleri için, bu yumuşama tipik olarak ışıınım yapacak yeterlilikte olmayan yığılma akışı ile açıklanır (Plotkin vd., 2013:59; Reynolds vd., 2014:3656). Bu durumun NY sistemleri için de benzer olduğu önerilmiştir (Armas Padilla vd., 2011: 659, 2013b:1586; Degenaar, vd., 2013:37). NY sistemlerinden yüksek kaliteli veriler elde edildiğinde, tayf artık basit bir güç yasası modeliyle kolayca tanımlanamaz ve düşük enerjilerde ek bir bileşen gerekir (Armas Padilla vd., 2013b:1586, 2013c:89; Degenaar, vd., 2013:37; Degenaar, vd., 2013c:31). Düşük enerjilerde gözlenen bu yayılım büyük olasılıkla NY yüzeyinden kaynaklanmaktadır ve yüzeyde bu tür enerji tayfları üretebilecek düşük miktarda madde birikimi gereklidir (Deufel vd., 2001: 955; Zampieri vd. 1995:849). Bu ek tayfsal bileşen ile yumuşamanın nedeninin anlaşılması daha karmaşık hal alır. NY sistemlerinde görülen yumuşamanın, güç yasası bileşeninde hiçbir değişiklik olmaksızın yumuşak termal bileşenin baskın hale gelmesinden ya da güç yasası bileşeninin azalan parlaklıkta evrimleşmesinden kaynaklanıp kaynaklanmadığı hala belirsizliğini korumaktadır (Armas Padilla vd., 2013b:1586,c:89).

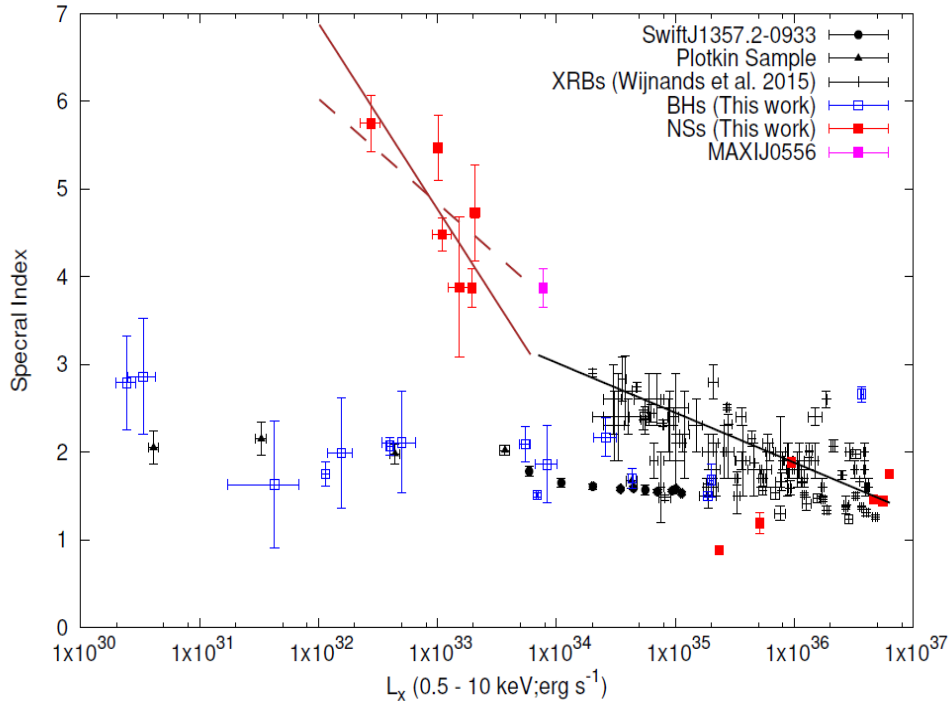
Sonbas vd. (2018:150), Wijnands vd. (2015:1371)' den farklı olarak daha düşük ışıma güçlerine (yani, birkaç $\times 10^{30}$ erg s⁻¹) uzanan daha geniş bir LMXB seti için benzer bir çalışma yürütmüş ve $10^{32} - 10^{33}$ erg s⁻¹ ışıma gücü aralığında NY çiftleri için elde edilen tayfsal indis ve ışıma gücü arasında görülen ters-korelasyon $\Gamma = a \log L_X + b$ fonksiyonu ile fit edildiğinde tayfsal indisin -2.12 ± 0.63 eğim değerinde olduğu görülmüştür (Şekil 2.3). Çalışmada ayrıca NY ve KD çiftleri arasındaki bu farklılık optik olarak ince bir sıcak korona ile optik olarak kalın düşük enerjili foton kaynağı arasında bir geri bildirim mekanizması olduğunu varsayan Komptonizasyon modeli ile de incelenmiştir. NY-KD arasında olası farklılık, korona sıcaklıkları, compton-y parametreleri ve Komptonizasyon büyütme

faktörleri karşılaştırarak da ölçülmüştür. Sonuçta, NY'ler için elde edilen ortalama sıcaklığın, KD' ler için elde edilen eşdeğer sıcaklıktan önemli ölçüde daha düşük olduğu bulunmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında elde edilen compton-y parametresinin Γ ile teorik olarak öngörülen ilişkiyi takip ettiği bulunmuştur (Şekil 2.4). Bu teorik ilişki Şekil 2.4' de kesikli çizgi ile gösterilmektedir ve Kompaneets denkleminin bir çözümüne dayanır (bkz. Rybicki & Lightman, 1985:451; Shapiro ve Lightman, 1976:187). Modele göre komptonizasyon, foton enerjilerinin bir güç yasası dağılımını oluşturur. Γ ' nın iki çözümü önerilmektedir;

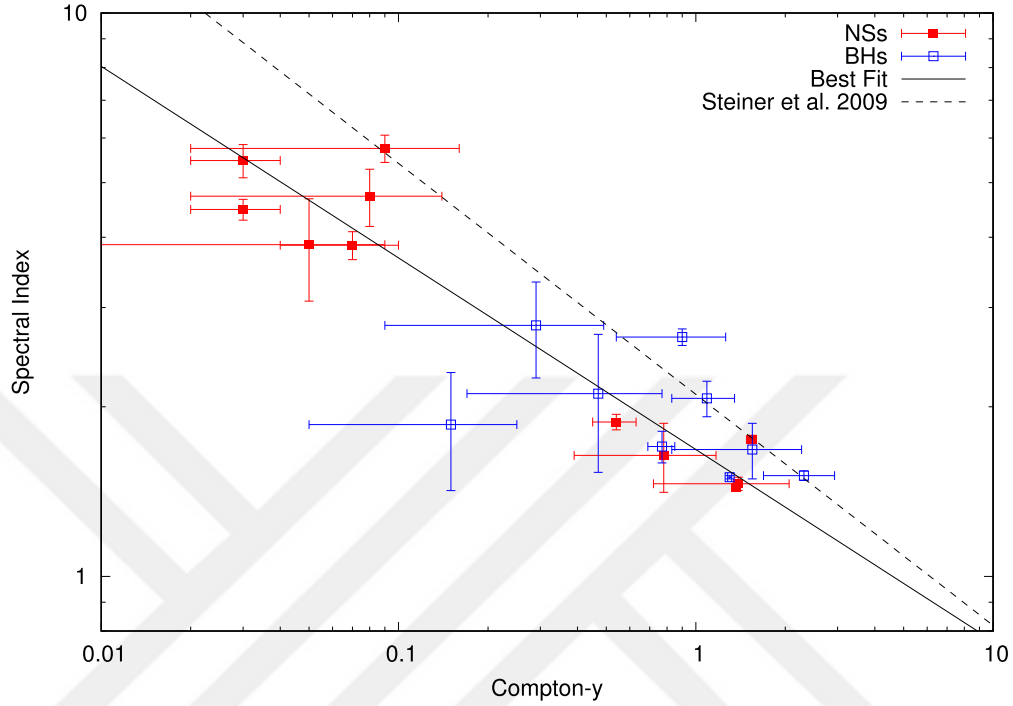
$$\Gamma_1 = -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{9}{4} + \frac{4}{y'}} \quad (2.1)$$

$$\Gamma_1 = -\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{9}{4} + \frac{4}{y'}} \quad (2.2)$$

Burada tanımlanan y , compton-y parametresidir ve $y = 4kT_e/m_e c^2 \text{Max}(\tau_{es}, \tau_{es}^2)$ ile hesaplanır. kT_e elektron sıcaklığıdır ve τ_{es} saçılan elektronların optik derinliğidir. Yüksek enerjilere saçılan fotonlar, indisi Γ_1 olan bir güç yasası dağılımına sahiptir ve düşük enerjilere saçılan fotonlar, indisi Γ_2 olan farklı bir güç yasası dağılımına sahiptir (Steiner vd., 2009:1279).



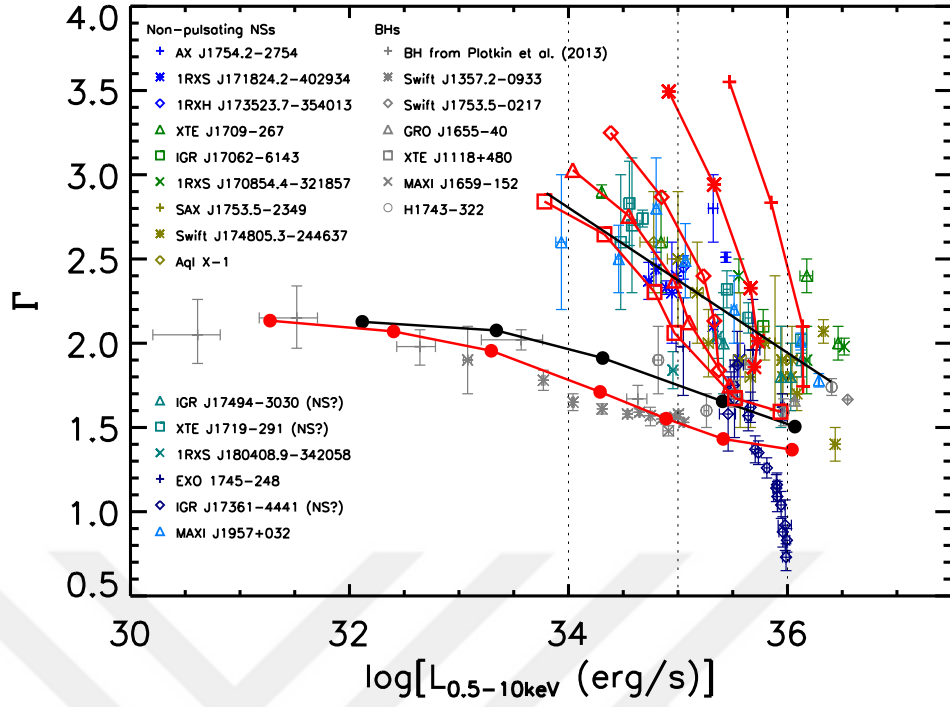
Şekil 2.3. KD çiftleri (mavi) ve NY çiftleri (kırmızı) için 0.5–10 keV'de tayfsal indis ve X-ışın ışıması. Wijnands vd. (2015:1371) çalışmasında ele alınan kaynaklar siyah renkte gösterilmiştir. Siyah çizgi, yüksek ışıma gücündeki verilere uygundur. Kırmızı düz çizgi, düşük ışıma gücündeki NY verilerine uygundur (Sonbas vd., 2018:150)



Şekil 2.4. KD (mavi) ve NY (kırmızı) x-ışını çiftleri için tayfsal indis ve Compton-y parametresi (Sonbas vd., 2018:150). Düz çizgi verilere en uygun olanıdır ve kesikli çizgi Kompaneets denkleminin çözümü ile elde edilmiştir (Steiner vd., 2009:1279)

Daha önce de belirtildiği gibi, NY-LMXB'lerde Wijnands vd. (2015:1371) tarafından önerilen $\Gamma - L_x$ arasındaki ters-korelasyonu açıklamak için gerekli fiziksel mekanizma çok net değildir. NY-LMXB'lerdeki görülen bu ters-korelasyonunun geçici KD X-ışını kaynakları ile karşılaştırıldığında büyük olasılıkla NY'nin sert yüzeyinin bir etkisi olduğu düşünülmektedir. Qiao ve Liu (2020:2704) tarafından yapılan çalışmada 0.5–10 keV ışıma gücü ve Γ arasında görülen ters-korelasyon manyetik alanı zayıf olan NY etrafındaki baskın madde akış durumu (Advection-dominated accretion flow; ADAF) için çözümlenmiştir (Şekil 2.5). ADAF, bir tür geometrik olarak kalın, optik olarak ince, sıcak yığılma akışıdır (Abramowicz vd., 1995:37; Ichimaru, 1977:840; Manmoto vd., 1997:791; Narayan & Yi, 1994:13, 1995:710; Rees vd., 1982:17; Yuan & Narayan, 2014:529) ki bu da geometrik olarak ince, optik olarak kalın, soğuk yığılma diskinden farklıdır (Shakura ve Sunyaev, 1973:33). Bir KD etrafındaki ADAF için, elektron sıcaklığı T_e , kütle yığılma oranı, $\dot{m} = \dot{M} / \dot{M}_{\text{Edd}}$ 'ın azalması ile az miktarda bir artış gösterir, diğer bir taraftan kompton saçılmasının

optik derinliği τ_{es} , $\dot{m}$ ile aynı oranda azalır. Dolayısıyla compton-y parametresi ($y = 4kT_e/m_e c^2 \tau_{es}$ ile $\tau_{es} < 1$ olarak tanımlanır) azaldıkça $\dot{m}$ de azalır ve daha yumuşak X-ışını tayfinin elde edilmesine neden olur. Yukarıda tanımlanan $\dot{M}_{Edd}$ değeri $L_{Edd}/0.1c^2 = 1.39 \times 10^{18} M/M_\odot \text{ g s}^{-1}$ ile elde edilir. Burada L_{Edd} , bir yıldızın dışa doğru etki eden radyasyon kuvveti ile içe doğru etki eden yerçekimi kuvveti arasında denge olduğunda ulaşabileceği maksimum parlaklık olan Eddington ışıma gücüdür. ADAF çözümlenirken ele alınan L_X (veya L_X/L_{Edd}) değeri $\dot{m}$ azaldıkça azalır, bu nedenle azalan L_X ile daha yumuşak bir X-ışını tayfı, yani Γ ve L_X arasında bir ters-korelasyon olması beklenir. ADAF modelinde anahtar parametre olan f_{th} , NY yüzeyindeki enerji salınımının bir kesrinin ADAF' da saçılan termal yayınım olduğunu tanımlar. Qiao ve Liu (2020:2704) çalışmalarında f_{th} parametresinin ışıma gücü ve Γ arasında görülen ters-korelasyon üzerine etkisini araştırmışlar ve bu parametrenin söz konusu ters-korelasyon üzerine büyük etkisi olduğunu bulmuşlardır. Qiao ve Liu (2018:938, 2020, 2021) çalışmalarındaki kilit noktalardan biri, daha önceki çalışmalarda da önerildiği gibi (Narayan ve Yi, 1995:710), NY'nin sert yüzeyi ile ADAF arasındaki ışımsal geri beslemenin dikkate alınmasıdır. Genel anlamda açıklamak gerekirse, NY yüzeyinden gelen geri besleme (termal yayınım), ADAF'ın kendisini soğutacak, bu da ADAF'ın NY'ler etrafındaki elektron sıcaklığını KD'lere kıyasla daha düşük hale getirecek ve sonuç olarak NY'lerde daha yumuşak ($\sim 2 \text{ keV}$ ' den büyük bant) bir X-ışını tayfı elde edilebilecektir. Spesifik olarak, Qiao ve Liu (2020:2704)' de, NY'nin yüzeyine aktarılan ADAF enerjisinin (iç enerji, radyal kinetik enerji ve dönme enerjisi dahil) bir kesri olan, f_{th} 'ın ADAF'da dağılacak termal yayınım olarak NY'nin yüzeyinde termalize edildiği varsayılmaktadır. Qiao ve Liu (2020:2704), NY ve ADAF arasındaki ışımsal geri beslemeyi dikkate alarak ADAF'ın yapısını ve karşılık gelen tayfı hesaplamış ve f_{th} değerinin belirsiz olduğunu böylece ADAF'ın yapısını ve elde edilen tayfı önemli ölçüde etkileyebileceği sonucuna varmışlardır (Şekil 2.5).

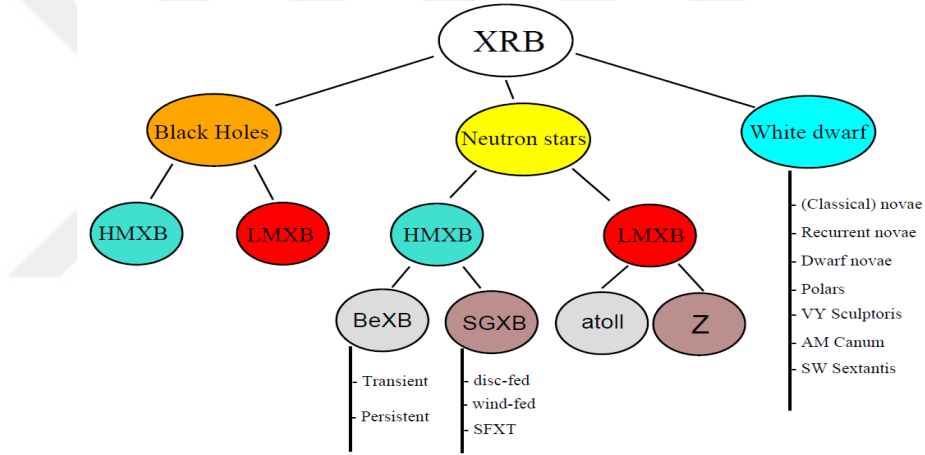


Şekil 2.5. $0.5\text{--}10\text{ keV}$ 'deki ışıma gücünün bir fonksiyonu olarak tayfsal indis. Kırmızı '+', '*', 'o', 'Δ', '□' noktaları ve dolu daireler, sırasıyla $f_{th} = 0.1, 0.03, 0.01, 0.005, 0.003$ ve 0 değerleri için teorik sonuçlardır. Hesaplamada, sırasıyla $m = 1.4M_{\odot}$, $R^* = 10\text{ km}$, $\alpha = 1$ ve $\beta = 0.95$ değerleri kullanılmıştır. Gri noktalar karadelik çiftlerini göstermektedir (Qiao ve Liu, 2020:2704).

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

3.1. X-Işın Çiftleri

X-ışın kaynaklarının 1960’larda keşfedilmesi ile o zamana kadar bilinen hiçbir fiziksel sürecin gözlemlenen X-ışını parlaklığını üreten mekanizmayı açıklayamaması zorlu bir astrofiziksel problemin başlangıcı olmuştur. Bu kaynakların doğasının anlaşılması 1971’de Uhuru uydusunun uzun zaman aralıklarında yapılan gözlemlerinden tipik olarak etkileşen çift sistemlerdeki Doppler kaymalarını ve tutulmalarını göstermesi ile başlamıştır. Gözlemlerden elde edilen kısa periyodlar ancak iki bileşenden biri tıkHz bir nesne (Beyaz cüce, NY veya KD) ise mümkün olabilirdi. Bununla birlikte, bir yoldaş yıldızdan tıkHz nesneye olan kütle aktarım mekanizmaları nedeniyle, büyük miktarlarda kütle çekimi enerjisinin salındığı anlaşılmıştır (Landaluce, 2015:1).



Şekil 3.1. X-ışını çiftlerini oluşturan tüm farklı alt sistemlerin yer aldığı diyagram (Reig, 2011:1)

Galaksimizdeki en parlak X-ışını kaynakları olan X-ışın çiftleri normal bir yıldız ve evriminin son aşamasına gelmiş olan tıkHz bir yıldızdan oluşur. Bu sistemlerde, yıldızlar birbirine yeterince yakınsa, yoğun olan tıkHz yıldızın kütle çekimi ile veya normal yıldızın yıldız rüzgârları ile madde transferi gerçekleşir. Normal yıldızdan akan madde bir yığılma diski ile tıkHz yıldızın etrafına birikir. Biriken maddenin çok yüksek sıcaklıklara ulaştığı diskin tıkHz yıldızın üzerine düştüğü iç bölgesinden yoğun X-ışını yayılımı salınır (ESA, 2021). Yoldaş yıldızın kütlesine ve kütle aktarım mekanizmasına bağlı olarak X-ışın çift sistemleri HMXB'ler ve LMXB'ler olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 3.1).

3.1.1. Büyük kütleli x-ışın çiftleri (HMXBs)

Büyük Kütleli X-Işın Çiftleri (HMXB'ler) erken tip (O veya B) yoldaş yıldız içermektedir. HMXB'lerde, kütle transferi maddenin optik yoldaştan yıldız rüzgârları yoluyla NY üzerine birikmesi ile gerçekleşir ve yüksek enerjili ışıma yayımlayabilirler. Yığılmanın gerçekleştiği nesne bir NY (veya KD) ise, madde oldukça yüksek bir kütle çekim potansiyeli kuyusuna düşer ve aşırı yüksek hızlara hızlandırılır. Madde NY'nin yüzeyine ulaştığında, hızla yavaşlar ve serbest düşmeden kaynaklanan kinetik enerjinin yaydığı ısı X-ışını kaynağının enerjisinin artmasına neden olur.

HMXB'ler sahip olduğu farklı ışımagüçlerine göre Be/X-ışın çifti (BeXB; optik yıldız bir cüce, altdev veya dev OBe yıldızı (parlaklık sınıfı III, IV veya V)) veya süperdev X-ışını çiftleri (SGXB'ler; parlaklık sınıfı I-II yıldız içeriyorlarsa) olarak iki farklı sınıfta ayrılabilir.

SGXB'lerde, optik bileşen, 10^{-6} – $10^{-8} M_{\odot} \text{ yıl}^{-1}$ kütle kaybı ve 2000 km s^{-1} 'e kadar bir hızla önemli miktarda yıldız rüzgarları yayar. Nispeten yakın bir yörüngedeki NY, bu rüzgarların bir kısmını yakalayarak X-ışını kaynağının parlaklığının artmasını sağlayacaktır. Roche lop taşması yoluyla kütle aktarımının gerçekleşmesi durumunda, NY'nin etrafında bir yığılma diski oluşur ve X-ışın yayılımı oldukça artar. Bu konuda yapılan araştırmalar, Galaksi'de disk beslemeli bir SGXB (Cen X-3) ve toplamda üç (SMC X-1 ve LMC X-4) olduğunu ancak, rüzgarla beslenen oldukça fazla sayıda SGXB bulunduğunu bildirmektedir. Parlaklıkları ve kalıcı X-ışını yayınımları nedeniyle HMXB'lerin SGXB sınıfında yer alan çok sayıda kaynak keşfedilmiştir. Bu sınıfın önceleri HMXB'lerin büyük bir popülasyonunu temsil ettikleri düşünülmüş ve BeXB'ler olağandışı olarak kabul edilmiştir (Reig, 2011:1).

BeXB'lerin optik yoldaşı bir Be yıldızıdır. Be yıldızları, yaşamlarının bir döneminde tayflarında yayılım çizgileri gösteren, süperdev olmayan, hızlı dönen ve parlaklık sınıfı III-V olan B-tipi yıldızlardır. Bu nedenle tayf türlerinde “e” niteleyicisi vardır (Balona, 2000:1; Porter ve Rivinius, 2003:1153; Slettebak, 1988:770). Bu kaynakların tayflarında en çok çalışılan çizgiler hidrojen çizgileri (Balmer ve Paschen serileri) olmasına rağmen tayflarında He, Fe yayılım çizgileri gözlenebilir (Hanuschik, 1996:170). Aynı tayf tipindeki soğurma gösteren B yıldızından beklenenden daha büyük miktarda kızılötesi yayılımı da gösterirler. Gözlenen bu yayılım kızılötesi fazlalık olarak bilinir.

3.1.2. Düşük kütleli x-ışın çiftleri (LMXBs)

Düşük kütleli X-ışın çiftleri (LMXB'ler), Güneş benzeri bir yıldızdan düşük manyetik

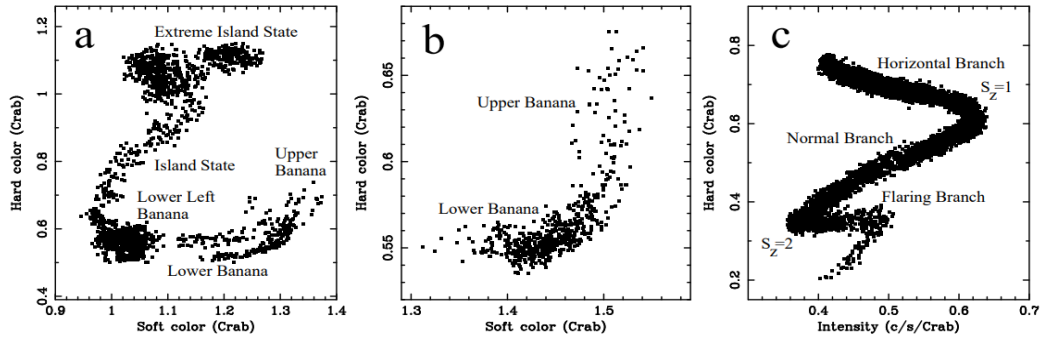
alanlı bir NY veya bir KD madde aktarımının gerçekleştiği sistemlerdir. Kaynakların X-ışını bölgesinde yayılım yapabilmesi için madde yeterince yüksek sıcaklıklara ($\sim 10^7$ K) kadar ısıtıldığı bir yığılma diski aracılığıyla gerçekleşir (Shakura ve Sunyaev, 1973:33). LMXB'ler, uzun dönemli değişimlerine göre iki sınıfa ayrılabilir. Kalıcı LMXB'ler, $L_x \sim 10^{36}$ erg s⁻¹'in üzerinde olan X-ışını parlaklıklarıyla her zaman aktiftirler. Buna karşılık, geçici sistemler çoğunlukla sönük olup ($L_x \sim 10^{30}-10^{34}$ erg s⁻¹), sessiz evrede bulunur ve zaman zaman ışıma güçlerinin onlarca kat artış sergilediği aylar ila yıllar arasında tekrarlayan patlamalar gösterir. Birkaç istisna dışında, KD-LMXB'ler genel olarak ikinci grupta yer almaktadır.

Son yıllardaki çalışmalar, bu kaynakların parlama evreleri boyunca KD farklı yığılma bölgelerine bağlı olarak değişen X-ışını evreleri sergilediklerini ve her bir parlama profili için benzer bir evrim döngüsü izlediklerini ortaya koymuştur (örn. Miyamoto vd., 1992:21, 1993; Belloni vd., 2011:409; Munoz-Darias vd., 2014:3270; Stiele vd., 2011:1746). Enerji tayfında komptonizasyonun hakim olduğu ve yüksek seviyelerde hızlı değişkenlik gözlemlendiği dönem sert durum olarak tanımlanır ve ilk olarak kaynak akısının yükselmeye başladığı zaman gözlemlenir. Daha sonra termal yığılma diski bileşeni baskın hale gelir ve hızlı değişkenlik ortadan kalkar. Kaynağın parlaklığı, yumuşak durum sırasında yavaş yavaş (haftalar-aylar arası) Eddington ışıma gücünün yüzde birkaçı değerine düşer ve bundan sonra yine sabit bir akıda sert durumun tersi bir geçiş meydana gelir. Bu davranış ilk olarak Miyamoto vd. (1992:21) tarafından tanımlanan histerezis benzeri davranıştır. Her bir döngü boyunca sergilenen tayfsal durumlar ve bunlarla ilişkili olan geçişlerin genel olarak sertlik-şiddet diyagramında (Hardness-Intensity Diagram, HID, (Belloni, 2010:53; Homan vd., 2001:377 ve referansları) bir yol takip ettiği literatürde çokça tartışılmaktadır (Belloni, 2010:53; Remillard ve McClintock, 2006:49). En belirgin iki durum, düşük/sert (LHS) ve yüksek/yumuşak durumlar (HSS) iken Sert/orta durum (HIMS) ve yumuşak/orta durum (SIMS) gibi diğer durumların kesin olarak varlığı tartışmalıdır (Done vd., 2007:1; Dunn vd., 2010:61; Homan ve Belloni, 2005:1). Bu durumlara ek olarak LHS ile ilişkili olan bir diğer durum sessiz durum olarak tanımlanmaktadır (Belloni, 2010:53). Kaynakların sergiledikleri histerezis döngüsü ile ilişkili fiziksel mekanizma hakkında literatürde yığılma diskinin manyetik alanı (Balbus ve Henri, 2008:408; Begelman ve Armitage, 2014:18; Petrucci vd., 2008:88) veya Lense-thirring etkisi (Nixon ve Salvesen, 2014:3994) önerilmekle birlikte hala tam olarak anlaşılmamıştır.

Histerezis döngüleri, HID diyagramında takip ettikleri geçişlere bakıldığında geçici KD kaynaklarının çoğunda (KDT; örneğin (Dunn vd., 2010:61)) görülür. Son yıllarda yapılan çalışmalar tipik olarak KD-LMXB'lerinde gözlemlenen kompton baskın ve termal baskın durumlar arasındaki histerezis döngülerinin NY sistemlerinde de yaygın olduğunu göstermişlerdir (Munoz-Darias vd., 2016:75).

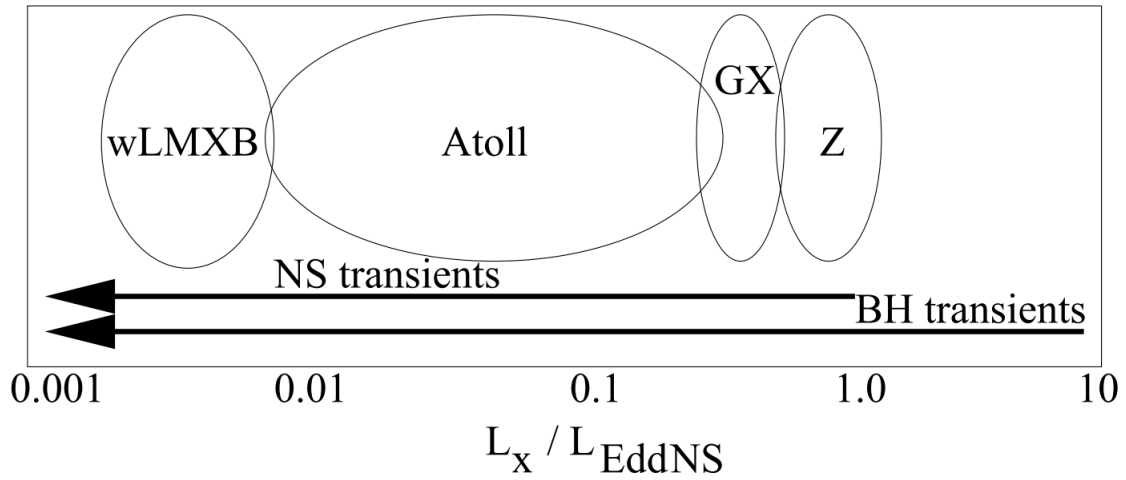
3.1.3. Nötron yıldızı içeren düşük kütleli x-ışın çiftleri (NY-LMXB)

NY içeren LMXB'ler, düşük kütleli bir eş yıldızdan bir nötron yıldızına madde biriken sistemlerdir. NY-LMXB'lerin büyük çoğunluğu düşük manyetik alana sahip ($\sim \leq 10^8$ G) NY'leri içerir ve bu sistemler genel olarak tayfsal ve zamansal özelliklerine göre Z- ve Atol kaynakları olmak üzere iki ana alt sınıfa ayrılır (van der Klis, 2006:2675). Kaynaklar isimlerini X-ışın renk-renk (CCD) ve sertlik-şiddet (HID) diyagramlarında izlediği yolların şekillerinden alırlar (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Nötron yıldızlarının tayfsal değişimleri. (a) atol kaynağı 4U 1608–52'nin renk-renk diyagramı, (b) 'GX' atol kaynağı GX 9 + 1 renk-renk diyagramı ve (c) Z kaynağı GX 340 + 0'ın sertlik-şiddet diyagramı (van der Klis, 2006:2675)

Z kaynakları en parlak olanlardır (Şekil 3.3) ve Eddington limitinin $\sim 0.5-1 L_{\text{Edd}}$ 'luk bir kesrinde yayılım yaparlar. Çoğunlukla X-ışınlarında parlama gösteren atoll kaynakları çok daha geniş bir aralık olan $0.001 L_{\text{Edd}}$ ile Z kaynaklarının ışıma gücü limitine kadar olan bir aralıkta yayılım yaparlar. Tipik atol kaynakları genellikle $0.01-0.2 L_{\text{Edd}}$ aralığındayken, galaksinin şişkin bölgelerinde bulunan 'GX' kaynakları genellikle daha yüksek olan $0.2-0.5 L_{\text{Edd}}$ aralığında ve son olarak sönük LMXB'ler $< 0.01 L_{\text{Edd}}$ ışımagüçlerinde yayılım yaparlar (van der Klis, 2006:2675).



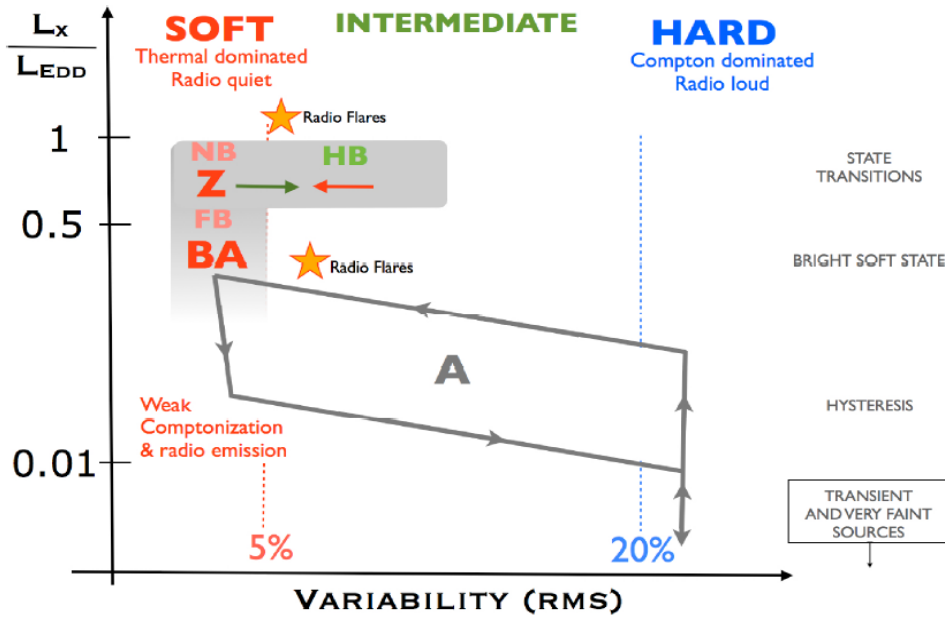
Şekil 3.3. Sırasıyla Z kaynakları, GX atol kaynakları, atol kaynakları, düşük enerjili LMXB'lerin yanı sıra nötron yıldızı ve KDlerin sergilediği parlaklık değişimleri. Bu kaynak türleri arasındaki L_x örtüşmelerinin sınırları belirsizdir (van der Klis, 2006:2675).

NY sistemlerinin büyük çoğunluğu kalıcı X-ışın kaynağı olarak bilinmekle beraber geçici özellik gösteren NY sistemleri de bulunmaktadır. NY-LMXB'lerin sergilediği X-ışını fenomenolojisi, muhtemelen sert bir yüzeyin ve eşlik eden bir manyetik alanın varlığından dolayı, KD sistemlerinden daha karmaşıktır. Ancak bazı NY sistemleri KD'lerdekine benzer X-ışını evresi de gösterirler (van der Klis, 2006:2675). Yüksek yığılma hızında ($L_x \geq 0.5 L_{\text{Edd}}$), NY sistemleri hem HID'de hem de renk-renk diyagramında (Color-Color Diagram; CCD) Z-benzeri yapılar gösterir ve Z kaynakları adı verilir. Daha düşük yığılma yapan sistemler ($0.01 L_{\text{Edd}} \leq L_x \leq 0.5 L_{\text{Edd}}$) farklı bir fenomenolojiye sahiptir ve CCD' de gözlenen yapılaraya bağlı kalınarak atol kaynakları olarak sınıflandırılır (Hasinger ve Van Der Klis, 1989:79). NY-LMXB sistemleri KD'lerde görülen sert, orta ve yumuşak durumlar ile tanımlanabilen üç ana X-ışını durum gösterirler (van der Klis, 2006:2675). Bu sınıflandırmaların bir kanıtı niteliğinde olan bir çalışma, parlaması ile tekrar sönmelenmesine kadar olan zaman boyunca hem Z hem de atol fazlarını gösteren geçici NY kaynağı XTE J1701-462' den gelmiştir (Homan vd., 2010:201; Lin vd., 2009:1275). Histerezis yapısı özellikle geçici sistem Aql X-1 başta olmak üzere birçok atoll kaynağında görülmüştür ve geçici KD kaynaklarına olan benzerlikleri çokça çalışılmıştır (Maccarone ve Coppi, 2003:189; Munoz-Darias vd., 2014:3270).

3.1.4. Nötron yıldızı – LMXB'lerin enerji tayfları

NY'nin sert yüzeyi yığılmadan kaynaklanan yayılım ile aynı (veya benzer) enerji

aralığında ekstra bir bileşen sunduğu için NY-LMXB'lerin enerji tayfları oldukça karmaşıktır. Bu karmaşık tayf yapısını açıklayabilmek için 1980'lerin sonunda çoğunlukla RXTE uydusu ile farklı tayfsal durumların yer aldığı oldukça fazla sayıda tayf ele alınarak iki farklı tayfsal model önerilmiştir. Şekil 3.4'den de görüldüğü gibi elde edilen sonuçlar ortak bir çerçeve içinde ele alınması gereken iki ana durumun (sert ve yumuşak) varlığını göstermektedir. Bu iki durumu birbirine bağlayan ara durumlar da ayrıca gözlenmektedir. Sert durum, yüksek elektron sıcaklığına sahip sert bir bileşen ile 1 keV' den düşük sıcaklığa sahip kara cisim (blackbody; BB) veya çok renkli bir kara cisim ile modellenen daha yumuşak bir termal bileşenden oluşur (Gierlinski ve Done, 2002). Bu tayflar, sert durumdaki KD-LMXB'lere benzerdir. Yumuşak durum, çok renkli bir kara cisim ve zayıf bir şekilde komptonize olmuş tek renkli kara cisim içermektedir.



Şekil 3.4. Atoll (A), parlak atoll (A) ve Z (Z) - kaynaklarının konumunu ve davranışını açıklayan RMS-ışınma gücü diyagramı (Munoz-Darias vd., 2014:3270).

Lin vd. (2007:1073), iki atoll sisteminin tayfsal değişimlerini inceleyebildikleri çok sayıda RXTE gözleminin analizleri sonucu termal ve termal olmayan bileşenlerin dejenere olduğunun yanı sıra bütün durumları açıklamadığı sonucuna erişmişlerdir. Bu nedenle, sert durumda üçüncü bir model önermişlerdir. Bu modele göre, sert durum için tayf daha önceki modelde olduğu gibi bir kara cisim ve komptonize bir bileşenden oluşur. Yumuşak durumda, ışıma çok renkli bir disk, bir kara cisim ve zayıf bir komptonize bileşenden oluşan üç

bileşenli bir model ile betimlenir. Yüksek yığılma hızına sahip geçici bir sistem olan XTE J1701-462 (Lin vd., 2009:1275) ve kalıcı Z kaynağı GX17+2 (Lin vd., 2012:34) için benzer modellemeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yığılma hızının Z diyagramının şeklindeki değişiklikleri yönlendirdiği yönündedir (Shahbaz vd., 2018:97).

3.1.5. Kara delik içeren düşük kütleli x-ışın çiftleri (KD-LMXB)

Birincil (yani tıkız) bileşen olarak bir KD adayı barındıran LMXB'ler, KD düşük kütleli X-ışını çiftleri olarak bilinirler. LMXB'lerin enerji tayfı, ani bir parlama sırasında iki ana bileşenle tanımlanabilir: yumuşak bir termal bileşen ve sert bir güç yasası bileşeni (bkz. Belloni, 2010:53; Remillard ve McClintock, 2006:49). Yumuşak termal bileşen, tayfsal duruma bağlı olarak genellikle 0.1–1 keV'de zirve yapan çok renkli bir disk kara cisim modeli (Mitsuda vd., 1984:741) ile tanımlanır (bkz. Done vd., 2007:1)). Bunun geometrik olarak ince ve optik olarak kalın bir yığılma diski tarafından üretildiği düşünülmektedir (Shakura ve Sunyaev, 1973:33). Sert güç yasası bileşeninin, bazı senaryolarda, tıkız nesneyi ve muhtemelen yığılma diskini çevreleyen onlarca ila yüzlerce keV sıcaklıklara sahip sıcak elektron plazmasından oluşan bir bölge olan koronada üretildiği düşünülmektedir (Sunyaev ve Trümper, 1979:506; Sunyaev ve Titarchuk, 1980:121). Bu bileşenden kaynaklanan yayılım, düşük enerjili fotonların koronadaki elektronlar tarafından saçılan ters kompton saçılması ile oluşmuş olan termal komptonizasyondan kaynaklanmaktadır (Burke vd., 2017: 194; Done vd., 2007:1; Sunyaev ve Titarchuk, 1980:121; Titarchuk, 1994:570; Zdziarski vd., 2004:99).

Bir parlama esnasında, KD-LMXB'ler farklı tayfsal ve zamansal özellikler gösterir (bkz., Hasinger vd., 1989:79; Homan ve Belloni, 2005:1; Méndez ve van der Klis 1997:37; Motta, 2016:398; van de Klis, 2000; Belloni, 2010:53; Belloni vd., 2011:409; Plant vd., 2014:1767). Bu özelliklerden yola çıkarak kaynaklara özgü farklı durumlar tanımlanmaktadır. Literatürde farklı sınıflandırmalar önerilmiş olsa da genel olarak dört temel tayfsal evrenin tanımlandığı Homan ve Belloni (2005:1) tarafından verilen sınıflandırma kullanılmaktadır. Kaynak LHS durumunda bulunduğu zaman X-ışını tayfına termal bir komptonizasyon bileşeni hakimdir ve bu da yüksek enerjilerde (yaklaşık 100 keV) kesilim gösteren 1.5-1.8 foton indisine sahip sert bir kuvvet yasası ile tanımlanır (Alabarta vd., 2022:2839; Done vd., 2007:1). Yüksek enerjilerde görülen kesilimin keşfinden önce böylesi bir sert bileşenin varlığı, tıkız nesnenin (KD) doğasının doğrudan bir kanıtı olarak önerilmiş ancak daha sonraları bu sert bileşen düşük parlaklığa sahip NY çiftlerinde de

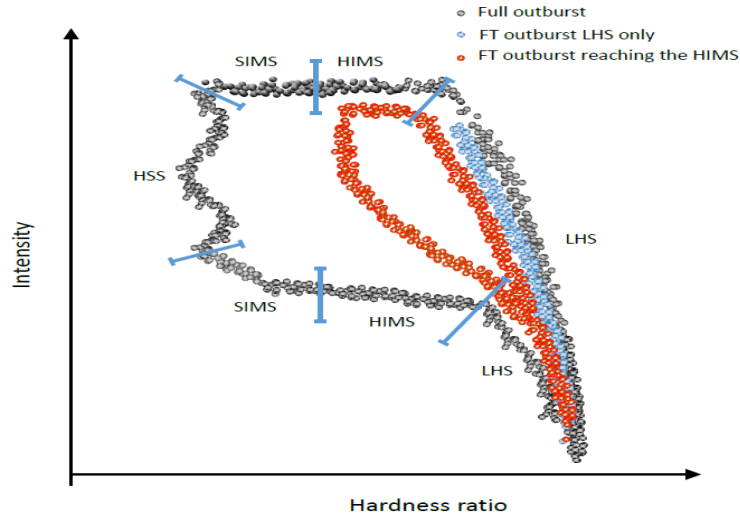
gözlenmiştir. Çoğu model, bu bileşenin optik olarak kalın bir yığılma diskinden gelen düşük enerjili fotonların koronadaki termal veya termal olmayan elektronlar ile komptonizasyonundan kaynaklandığını belirtmektedir (Gilfanov, 2010:1). Alternatif olarak disk fotonlarının hızla yaklaşan bir akışla ters-kompton etkileşimi ile enerji kazandığı ters-komptonizasyon (bkz., Turolla vd., 2002:349 ve buradaki referanslar) ve jetin gözlemlenen yayınıma direk katkısının ele alındığı (bkz. Markoff, 2010:143) modeller de tartışılmaktadır. Kaynaklar bu durumdayken enerji tayflarında zayıf bir disk-kara cisim bileşeni de tespit edilebilir (bkz., Alabarta vd., 2020: 3896; Capitanio vd., 2009: 1194; McConnell vd., 2002:984; Zdziarski vd., 2002:357). LHS durumunda 0.01-30 Hz arasındaki frekanslarda yarı periyodik salınımlar (Quasi periodic oscillations; QPO' lar) da gözlemlenebilir (bkz., Belloni vd., 2005:207; Casella vd., 2004:587).

HSS durumu, optik olarak kalın, geometrik olarak ince bir yığılma diski kaynaklı yumuşak termal bileşenin hakim olduğu bir enerji tayfı ile karakterize edilir (Shakura ve Sunyaev, 1973:33). Bununla birlikte, yüksek istatistiğe sahip tayfların tüm yayınımlarının özelliklerinin hesaba katıldığı daha karmaşık bir yığılma diski modeline uydurularak iç yarıçap için nispeten daha kesin bir değer tahmini yapılabilmesini mümkün kılar (Davis vd., 2005:372). Bu durumda çok zayıf bir sert güç yasası bileşeni de tespit edilebilir (bkz., Alabarta vd., 2020:3896; Capitanio vd., 2009:1194).

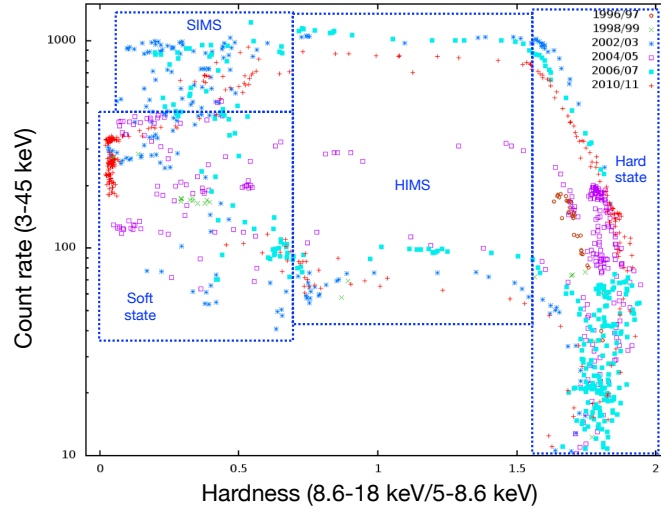
LHS ve HSS arasında, X-ışını değişkenliği göz önünde bulundurularak, HIMS ve SIMS (bkz., Belloni, 2010:53; Homan ve Belloni, 2005:1) olmak üzere iki ara durum tanımlanır. SIMS evresinde B tipi QPO'lar (1-7 Hz frekans aralığında) da bulunabilir (Alabarta vd., 2022:2839 ve buradaki referanslar).

Kaynakların parlamaları sırasında, bir sistem aşağıdaki sırayla tüm farklı tayfsal durumlar boyunca değişim gösterir: $LHS \rightarrow HIMS \rightarrow SIMS \rightarrow HSS \rightarrow SIMS \rightarrow HIMS \rightarrow LHS$. Bu değişim, HID (Şekil 3.5, 3.6); (Homan vd., 2001:377; Remillard vd., 2006:49), sertlik-rms diyagramı (HRD; (Belloni vd. 2005), ve şiddet-değişkenlik diyagramı (IVD; (Sonbas vd., 2020:2513, 2022:2535) kullanılarak takip edilebilir. Şekil 3.5' de bir KD-LMXB' nin parlama boyunca izlediği yolun şematik bir temsili gösterilmektedir (Alabarta vd., 2022:2839). HID' deki bu yapı q-tipi yapı olarak bilinir. Kaynak başlangıçta, HID'nin sağ alt kısmında LHS'dedir. Patlamanın bu aşamasında, HID'nin sağındaki dikey bir çizgiyi izleyerek sertlikte büyük oranda bir değişiklik olmadan kaynağın ışıma şiddetinde artış gözlenir. Belirli bir ışıma-gücü değerine ulaştığında bu sefer kaynağın ışıma şiddetinde

büyük değişiklikler görülmeden kaynak, yatay bir şekilde değişim ile HID'nin soluna hareket ederek HSS'ye geçişi başlatır. Bu yatay değişim ile kaynak HIMS ve SIMS evrelerine girer. Kaynak, HID'nin sol üst kısmında HSS durumuna ulaştığında, yoğunluğu yaklaşık olarak sabit bir sertlik değerinde azalır. O andan itibaren, kaynağın değişimi tersine döner ve kaynak, HID'nin bir alt yatay yolu izleyerek ara durumlara geri döner. Son olarak, parlamamanın sonunda kaynak tekrar LHS'den geçer. Bu parlama yapısı birçok KD-LMXB' de (XTE 1550–564, GX 339–4 (bkz. Şekil 3.6), H1743–322 ve GRO J1655–40) gözlenmektedir (Homan vd. 2001:377; Belloni vd. 2005:207; Fender vd. 2009:1370; Dunn vd. 2010:61; Uttley ve Klein-Wolt 2015:475; Alabarta vd. 2022:2839; De Marco vd. 2022:1).



Şekil 3.5. Tam (gri) ve başarısız geçiş (failed transition; FT) (kırmızı ve mavi) gösteren patlamaların sertlik-şiddet diyagramlarının şematik gösterimi. Kırmızı ile LHS'den ayrılan ancak HSS'ye ulaşmayan kaynaklar, mavi ile LHS'den başka evreye geçemeyen kaynaklar şematize edilmiştir (Alabarta vd., 2021:5507).



Şekil 3.6. *GX339-4* kaynağının *RXTE* ile gözlemlenen altı patlaması için Sertlik-Şiddet diyagramı (*HID*) (De Marco vd., 2022:1)

Birçok KD-LMXB'de q-benzeri yapı gözlenmesine rağmen, bazı kaynaklar tam olarak tayfsal evrim göstermeyen parlamalar oluşur. Bu tür parlamalar literatürde “sert durum” parlamaları (Tetarenko vd., 2016:15), “düşük/sert durum” parlamaları (Belloni vd., 2002:199), “başarısız parlamalar” (bkz., Capitanio vd., 2009:1194; Curran ve Chaty, 2013:45) veya “başarısız evre geçişi gösteren parlamalar” (Bassi vd., 2019:1587) olarak bilinmektedir. *HID*’de izledikleri yola göre başarısız parlamalar iki gruba ayrılabilir (Şekil 3.5).

3.1.6. NY ve KD sistemleri arasındaki benzerlik ve farklılıklar

3.1.6.1. X-ışın patlamaları

Termonükleer X-ışını patlamaları, bir NY'nin yüzeyinden kaynaklanan X-ışın yayılımı olarak bilinir ve bu nedenle yüzeyin varlığının doğrudan bir kanıtıdır. Şimdiye kadar KD-LMXB'lerin hiçbirinin bir termonükleer X-ışını patlaması göstermediği bilinmektedir. Bunun nedeni, kaynakların doğası gereği bir yüzeyinin olmamasının göstergesi olarak ön görülmektedir (Narayan ve Heyl, 2002:139). *RXTE* verilerinin istatistiksel analizi ile patlama modellerinin ilişkilendirilmesi sonucu bu öngörü doğrulanmıştır (Remillard vd., 2006b:407).

3.1.6.2. Enerji tayfları

Bir X-ışını çiftinde bir KD'nin varlığını tanımlamak için birkaç tayfsal "iz" önerilmiştir. Zayıf manyetik alana sahip NY çiftleri de, KD'ler ile benzer şekilde yaklaşık

aynı iç yarıçapa uzanan yığılma disklerine sahip olabildikleri için yumuşak durumda yığılma diskinden geldiği düşünülen çok düşük enerjili termal bileşen bir iz olarak düşünülemez. Yüksek çözünürlüklü tayfsal ölçümler ile iç disk yarıçaplarının hesaplanması da kesin bir tanımlama yapılmasını mümkün kılamayabilir.

Geçmişte sadece akı veya güç yasası indisi açısından karşılaştırılan sert bileşen, şimdi daha karmaşık fiziksel modeller ile de analiz edilebilmektedir. Yakın zamanda Wijns vd. (2015:1371), tarafından $10^{34} - 10^{35} \text{ erg/s}^{-1}$ aralığında daha düşük parlaklıklarda, KD sistemlerinin NY'den sistematik olarak daha sert tayflara sahip olduğu önerilmiştir. Kaynak sınıfları arasında net bir ayrım Burke vd. (2017: 194) tarafından yapılan çalışmada da gösterilmiştir. Sert durumdaki sistemlerin RXTE verilerine komptonizasyon modellerinin uydurulması ile elde edilen parametreler KD ve NY sistemlerinin farklılık gösterdiğini doğrulamıştır.

Hem geçici hem de kalıcı sistemlerin HID'deki izledikleri yollar karşılaştırıldığında, bu sistemler arasında çok büyük bir fark olmadığı yani temelde yatan fiziksel mekanizmanın aynı olduğu görülmüştür (bkz., Munoz-Darias vd., 2014:3270).

3.1.6.3. Zaman değişkenliği

KD ve NY kaynaklarının zamansal özelliklerinin karşılaştırılması oldukça karmaşık olmasına rağmen elde edilen sonuçlar bu kaynakların doğasını açıklamak için oldukça önemli ipuçları sunmaktadır. LMXB'lerin fiziksel süreçlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak için, tayfsal analiz yöntemlerinin zamanlama analizi ile birleştirilmesi gerekir. Bu iki özelliğin birleştirilmesi ile elde edilen güç yoğunluğu ve enerji tayflarının özellikleri, kaynakların sınıflandırılmasına ve durumlarının tanımlanmasına olanak sağlar ve HID'de (ve CCD'de) kaynağın sergilediği durum değişimi kaynak özelindeki doğası hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlar (Landaluce, 2015:1).

X-ışını yayınımlarında gözlemlenen hızlı değişkenlik analizi, güçlü kütle çekiminin hakim olduğu bölgelerde iç yığılma diskinde yörüngede dönen maddenin özelliklerini belirleyebilir. Zaman serisi analizi için ana araç, Fourier güç yasası tayfidir. X-ışını akısı zaman serisine bir Fourier dönüşümü uygulanarak zaman ölçeği yerine frekans ölçeğinde kaynak davranışını incelemek mümkündür. Örneğin, yarı periyodik salınımlar (QPO'lar) ve frekans alanında bulunan tek frekans artışları, sırasıyla, yığılma akışındaki değişiklikleri ve atımların varlığını ortaya çıkarır. Uzun vadeli X ışını değişkenliği bağlamında, LMXB'ler kalıcı ve geçici kaynaklar olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Kalıcı kaynaklar, kaynağın tespit

edilmesinden günümüze kadar aktiftirler ve ışımaları sürekli'dir. Geçici kaynakların ışımalarında düzensizlikler vardır ve ışıma yapmadığı (sessiz) durumlar çoğunluktadır ($\sim 10^{-9}$ - $10^{-8} L_{\text{Edd}}$), ancak bazen sayım oranı geçici olarak birkaç on kat mertebesinde (0.1 - $1 L_{\text{Edd}}$) artış gösterebilir. Bilinen NY çifti sistemlerinin çoğu kalıcıdır, KD çifti sistemleri tipik olarak geçicidir (Landaluce, 2015:1).

3.1.6.4. Sessiz evredeki yayınım

Sessiz evredeki geçici KD çiftleri yığılma diskinin göreceli optik parlaklığı ile tezat oluşturacak bir şekilde çok düşük bir X-ışın yayınımlı yaparlar. Bu tutarsızlık yığılmanın yetersiz bir yayınımlı yaptığı adveksiyon baskın bir yığılma akışının varsayımı ile açıklanabilir (bkz. Narayan vd., 1996:821). Bununla birlikte bir NY için, ADAF ısısında depolanan adveksiyon enerjisi olay ufkı boyunca kaybolmaz ve yıldızın yüzeyinde serbest kalır. Bu nedenle sessiz evredeki geçici bir NY sisteminin ışıma gücünün aynı yığılma oranında KD' den daha düşük olması beklenir. Yığılma hızı, çiftin yörüngesine bağlıdır (yani daha sıkı sistemler daha sönüktür (bkz. Menou vd., 1999:276), ancak sistemlerin farklı sınıfları için bir farklılık göstermesi beklenmemektedir. Yapılan derin gözlemler her iki ifadeyi de doğrular ancak teorik daha karmaşıktır ve bu sonucun olay ufkunun varlığının bir göstergesi olduğu Abramowicz vd. (2002:31) tarafından tartışılmıştır.

3.1.7. LMXB'lerin düşük ışıma bölgesindeki davranışları

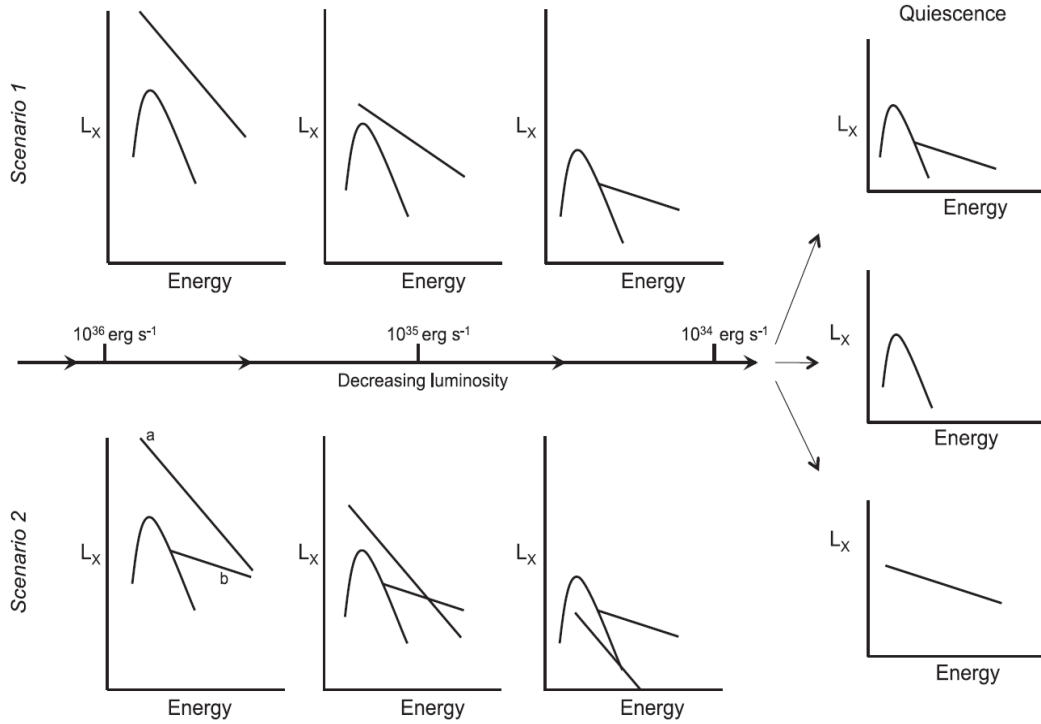
NY ve KD içeren çok sayıda LMXB'nin tayflarının bir kuvvet yasası ile betimlenmesi ile elde edilen Γ 'nın, bir dizi NY-LMXB'nin 10^{32} - 10^{35} erg s⁻¹ aralığında azalan parlaklık ile belirgin bir şekilde artış gösterdiği son yıllarda yapılan çalışmalarda görülmüştür (Qiao & Liu, 2020:2704, 2021:3870; Sonbas vd., 2018:150; Wijnands vd., 2015:1371). Çoğunlukla bireysel kaynaklar için daha önce de gözlemlenen bu davranış (Armas Padilla vd., 2011:659; Bahramian vd., 2014: 127; Linares vd., 2014:251; Plotkin vd., 2013:59). Wijnands vd. (2015:1371) tarafından çok sayıda NY ve KD-LMXB kaynağı için incelenmiş ve evrensel bir davranış gösterdiği sonucuna varılmıştır.

NY-LMXB'lerde görülen Γ - L_x ilişkiliği düşük parlaklık aralığındaki KD-LMXB'lerde incelendiğinde KD'lerin daha sert tayfa sahip olduğu ve dolayısıyla bu farklı davranışın KD ve NY çiftleri arasında bir ayırım yapılmasına olanak sağlayabileceği öngörülmüştür. $L_x \sim 10^{32}$ - 10^{35} erg s⁻¹ aralığında olan NY sistemlerinin yüksek kaliteli verileri ele alındığında, elde edilen tayfların modellenenebilmesi için güç yasası modeline yumuşak bir

bileşenin eklenmesi gerekebilir (bkz. Armas Padilla vd., 2013b:1586; Degenaar, vd., 2013:37). Bazı kaynaklar için L_x azaldıkça bu yumuşak bileşenin sıcaklığının düştüğü gözlemlenmiştir. NY-LMXB'lerin tayflarında görülen bu ek bileşen ve sıcaklıktaki düşüş, düşük ışıma güçlerinde nötron yıldızı yüzeyinin net bir şekilde görünür hale gelmesi olarak yorumlanmıştır (Armas Padilla vd., 2013c:89; Bahramian vd., 2014: 127; Degenaar vd., 2013:37). Burada ışıma gücündeki azalma, yüzey üzerine yığılma hızındaki bir azalmadan kaynaklanır ve bu da yüzey sıcaklığının düşmesine neden olur.

Tayfsal modele yumuşak bir bileşen eklendiğinde güç yasası bileşeni, 2'nin çok altında bir foton indisi (nispeten büyük hata değerleri ölçülmesine rağmen) ile önemli ölçüde sertleştiği görülmüştür (bkz., Armas Padilla vd., 2013b:1586; Degenaar vd., 2012d:148; Degenaar vd., 2013:37). Tayfin genel anlamda yumuşama gösterdiği bu durumun nötron yıldızı yüzeyinin X-ışını tayfında giderek daha baskın hale gelmesinden kaynaklandığını gösterebilmektedir. Burada vurgulanması gereken bir başka husus, $>10^{35}$ erg s^{-1} parlaklıklarda, tayfların modellenmesi için her zaman yumuşak bir bileşen gerekli değildir (Armas Padilla vd., 2013b:1586). Çünkü foton indisleri, tayfı modellemek için yumuşak bir bileşenin dahil edilip edilmediğinden bağımsız olarak yüksektir.

Bütün bu sonuçlar dikkate alınarak $L_x < 10^{36}$ erg s^{-1} 'de NY tayflarının yumuşamasını açıklayabilecek iki olası fenomenolojik senaryo Wijnands vd. (2015:1371) tarafından önerilmiştir (Şekil 3.7). İlk senaryoya göre; kütle birikiminden kaynaklanan güç yasası bileşeni 10^{36} erg s^{-1} ' den daha büyük ışıma güçleri için kaynakların sert evrelerine karşılık gelir ve $\Gamma < 2$ ile nispeten sert bir indeks değerine sahip olur. Parlaklık $\sim 10^{35}$ erg s^{-1} 'ye düştüğünde, foton indeksi artar ($\Gamma > 2$ değerine yükselir; Şekil 3.7'deki senaryo 1'in sol paneli) bu da tayfin genel olarak yumuşamasına neden olur. Termal bileşen X-ışını tayfında ya hala yoktur ya da zayıf bir şekilde görülür ve tayfin genel olarak yumuşamasına bir katkı sağlamaz. 10^{35} erg s^{-1} ' nin altındaki parlaklıklarda, güç yasası bileşeni tekrar sertleşir ($\Gamma < 2$; Şekil 3.7 senaryo 1'in iki sağ paneli). Bu aşamada termal bileşen, X-ışını tayfinin önemli bir bileşen haline gelir ve sıcaklık azalan parlaklık ile düştüğü için sonuçta elde edilen tayf daha da yumuşar.



Şekil 3.7. $L_x \sim 10^{36} - 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ de NY tayfında gözlenen yumuşamayı açıklayan iki olası senaryo. Sessiz evrede (sağ taraftaki paneller) üç farklı tür tayf gözlemlenir: tayfa tamamen güç yasası bileşeni hakimdir (altta), tayfa tamamen termal bileşen hakimdir (ortada) veya her bileşen de tayfa açıkça görünür (üstte) (Wijnands vd., 2015:1371)

İkinci senaryoda kaynak, $L_x \sim 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ sert güç yasası bileşeniyle birinci senaryoya benzerdir. Ayrıca bu senaryoda, şekilde 'a' ile gösterilen güç yasası bileşeni, $L_x \sim 10^{35} \text{ erg/s}$ ye düştüğünde yumuşar, ancak bu ışıma gücü aralığında yumuşak bileşenin belirgin olması ile tayf daha sert bir güç yasası bileşeniyle ($\Gamma < 2$; Şekil 3.7 sol panelde 'b' ile gösterilmiştir) betimlenebilir. Şimdiye kadar çalışılan verilerin genellikle düşük kalitesi nedeniyle, bileşenlerin tipik olarak birbirinden ayrılması zordur ve veriler tek bir güç yasası modeli ile betimlenir böylece tayfın genel olarak yüksek bir foton indeksi ($\Gamma > 2$) ile yumuşama gösterdiği sonucu elde edilir. Bu nedenle bu sistemlerin anlaşılması için yüksek çözünürlüklü verilere ihtiyaç duyulmaktadır.

3.2. Veri Analiz Yöntemleri ve Kullanılan Modeller

Çalışma kapsamında incelenen kaynaklar NICER X-ışın Zamanlama Uydusu (X-ray Timing Instrument; XTI, Gendreau vd. (2016:1)) verilerinin analizleri HEASOFT v6.30 altında çalışan NICERDAS ve ilgili NICER kalibrasyon dosyaları kullanılarak analiz

edilmiştir. Kalibre edilmiş, filtrelenmemiş, tüm Ölçüm/Güç Birimi (Measurement/Power Unit; MPU) birleştirilmiş dosyalar (ufa) NICERL2 komutu kullanılarak oluşturulmuştur. Sonuçta oluşan event (olay) dosyalarından XSELECT kullanılarak tüm enerji aralığında her bir gözlem için kaynağın tayfı elde edilmiştir. Dedektörün yanıt (response) dosyaları (Redistribution matrix files; RMFs ve Ancillary response files; ARFs) NICERARF ve NICERRMF komutları kullanılarak oluşturulmuştur. Kaynağın ardalan dosyası NIBKGESTIMATOR komutu kullanılarak elde edilmiştir.

XMM verileri, XMM-Newton Science Analysis System' in standart prosedürleri kullanılarak analiz edilmiştir. Her gözlem için, ilgilenilen X-ışını kaynağına civarında kaynağın boyutuna bağlı olarak farklı dairesel bölgeler kullanılarak tayflar elde edilmiştir. Ardalan elde etmek için, kaynağın yakınında veya çevresinde bulunan kaynaksız bölgeler seçilmiştir.

Çalışma kapsamında incelenen kaynakların SWIFT/XRT (Neil Gehrels SWIFT Uydusu/X-ışın Teleskopu) verileri HEASOFT v6.30 altında çalışan XRTPIPELINE komutu kullanılarak işlenmiştir. Tayf analizleri için gerekli dosyalar XRTPRODUCTS komutu kullanılarak elde edilmiştir. Kaynak tayfı ilgilenilen X-ışını kaynağına civarında kaynağın boyutuna bağlı olarak ve ardalan tayfı farklı kaynağın yakınında veya çevresinde bulunan kaynaksız dairesel bölgeler kullanılarak elde edilmiştir. Dedektörün yanıt dosyaları kalibrasyon veri tabanının (CALDB) en son sürümü kullanılarak oluşturulmuştur.

Elde edilen tayflar GRPPHA komutu kullanılarak kanal başına minimum 20 sayı ile binlenmiştir. Tüm tayfsal modellemeler XSPEC' in en son versiyonu kullanılarak PL, DISKBB, BBODY, BBODYRAD, NTHCOMP, COMPPS ve galaktik ve kaynağa özgü sönümlemeleri hesaplamak için uygun modeller kullanılarak betimlenmiştir.

3.2.1. Power law (güç yasası modeli)

Parçacıklar birbirlerine enerji aktarımını iki yolla yaparlar.

Bunlar;

- Çarpışmalar
- Fotonların aktarımı (yayınım ve soğurum; saçılma)

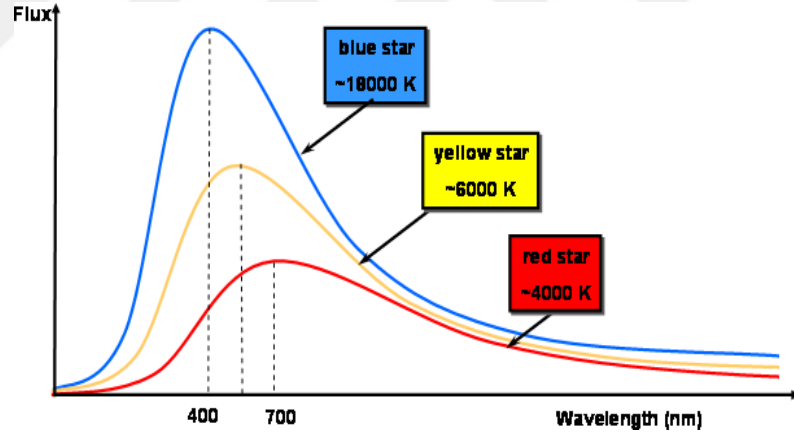
Çarpışmalar ne kadar fazlaysa, enerji değişimi o kadar hızlı olur ve termal denge daha çabuk sağlanır. Yoğun olmayan, sıcak plazmalarda, enerji dengesini sağlamak ve parçacıklar arasında yeterli enerji olması için gereken süre, ivmelenme, soğuma ve kaçış gibi diğer süreçler için gerekli tipik zaman ölçeklerine kıyasla daha uzundur. Sonuçta elde edilen

yayınımından sorumlu parçacık dağılımı daha sonra bunun gibi verimi yüksek süreçler ile şekillenir. Bu süreçlerden ısısal olmayan parçacık dağılımı güç yasası ile ifade edilir:

$A(E) = KE^{-\alpha}$ burada α foton indeksi ve K' da normalizasyon olarak verilmektedir. Güç yasası dağılımına neden olan temel (ama tek değil) ivmelenme süreci şokların neden olduğu ivmelenmedir (Ghisellini, 2013:1).

3.2.2. Bbody (kara cisim modeli)

Mutlak sıfırın (0K, -273,15 ° C) üzerinde bir sıcaklığa sahip tüm nesneler elektromanyetik radyasyon şeklinde enerji yayarlar. Kara cisim, üzerine düşen tüm yayınımı soğuran, hiçbirini yansıtmayan veya iletmeyen teorik model veya cisimdir. Tüm dalga boylarında kusursuz bir soğurum ve yayılım kaynağı olan kuramsal bir nesnedir. Kara cisim tarafından yayılan termal enerjinin tayfsal dağılımı (yani radyasyonun bir dalgaboyu veya frekans aralığı üzerindeki yoğunluk modeli) yalnızca sıcaklığına bağlıdır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Farklı sıcaklıklar için kara cisim ışıma modeli (Cosmos, 2021).

Karakteristik kara cisim yayınımı Planck, Wien Kayma ve Stefan-Boltzmann yasaları ile açıklanır. Şekil 3.8' e göre;

- Kara cisim yayılım eğrileri oldukça karmaşık bir şekle sahiptir (Planck Yasası ile tanımlanmıştır).
- Belirgin bir sıcaklıktaki tayfsal profil belirgin bir tepe dalga boyuna karşılık gelir ve bunun tersi de geçerlidir.
- Karacismin sıcaklığı arttıkça tepe dalga boyu azalır (Wien Yasası).

- Kara cismin sıcaklığı arttıkça tüm dalga boylarındaki şiddet (veya akı) artar.
- Yayılan toplam enerji (alan eğrisi altında) sıcaklık arttıkça (Stefan-Boltzmann Yasası) hızla artar.
- Çok kısa veya uzun dalga boylarında yoğunluk çok düşük olsa da, mutlak sıfırın üzerindeki herhangi bir sıcaklıkta tüm dalga boylarında teorik olarak yayılır (kara cisim ışıma eğrileri asla sıfıra ulaşmaz).

Astronomide her zaman iyi bir yaklaşım olmasa da çoğunlukla yıldızlar kara cisim ile modellenmiştir. Bir yıldızın sıcaklığı yayınım eğrisinin tepe noktasının dalga boyundan elde edilir (Cosmos, 2021).

3.2.3. diskbb (Disk kara cisim modeli)

Yığılma diskinin tayfı birden fazla kara cisim bileşeninden oluşmaktadır. Makishima vd., (1986:635), yaptıkları çalışmalarda KD adayı GX 3339-4'ten aynı anda salınan optik yayınının, hem yumuşak X-ışınları ve hem de sert X-ışınları gözlemlemişlerdir. Ara disk bölgesi optik olarak kalın ve geometrik olarak incedir. Bir 'disk kara cisim' tayfına sahip gözlenen yumuşak X-ışını bileşeni bu bölgeden gelir. En içteki disk bölgesi, genel göreliliğin etkisinden ve muhtemelen radyasyon basıncından dolayı dinamik olarak kararsızdır (Makishima vd., 1986:635; Mitsuda vd., 1984:741).

3.2.4. Bbodyrad (alanla normalize kara cisim modeli)

Bu model, bir kara cisim ışıma tayfını temsil eder. Ayrıca, ışıma yapan kara cismin radyal olarak genişleyebileceği gerçeğini de hesaba katar. Modelin parametreleri, kara cisim sıcaklığı (T_{bb}) ve kara cismin yayma alanını (A) temsil eden kara cisim normalizasyonudur (N_{bb}). Yüzey alanıyla orantılı normalizasyona sahip bir kara cisim tayfı

$$A(E) = \frac{K \times 1.0344 \times 10^{-3} E^2 dE}{\exp\left(\frac{E}{kT}\right) - 1} \quad (3.1)$$

şeklinde hesaplanır³.

3.2.5. Nthcomp (termal olarak komptonize sürekli ışıınım)

Nthcomp, termal komptonizasyondan elde edilen sürekli yayınının benzer diğer

modellere göre daha iyi bir açıklamasıdır. Yüksek enerjilerdeki kesilim üstel kesilime göre daha diktir ve elektron sıcaklığı (kT_e) ile hesaplanır. Özellikle X-ışını çiftleri için önemli bir etkisi düşük enerjilerdeki yönelim değişiminin modellenenebilmesidir. Sıcak elektronlar tarafından kompton saçılması ile yüksek enerjilere saçılan tohum fotonlarının düşük enerjilerde modellenenebilmesini sağladığı için model düşük enerjilerde güç yasasına göre çok daha kullanışlıdır.³

3.2.6. compPS (komptonizasyon)

Etkin soğuma mekanizması olarak bilinen kompton saçılması, yüksek enerjili elektronların düşük enerjili fotonlarla etkileşmesi sonucu enerji salınmasıdır. Bu nedenle, ortamda meydana gelen yayılım tayfı bu çekirdek fotonların sıcaklığına ve miktarına bağlıdır. Bu fotonların sıcak taç bölgesi elektronları etrafında bulunan yığılma diskinden geldiği düşünüldüğünde daha önce yığılma diski tarafından soğurulan fotonlar yukarı saçılarak bulundukları yerdeki sıcaklığın artışına dolayısıyla çekirdek foton sayısının artışına neden olduğu bilinmektedir. Yapılan modellemelerde Kompton saçılması sürecinin hızlanmasına neden olan fotonların geri dönüşümünün de hesaba katılması gerekliliği gösterilmiştir (Sunyaev ve Titarchuk, 1984:10). Bu süreçler sonucunda soğumanın artması ve yayılım tayfında bir yumuşama görülmesi beklenmektedir. Komptonizasyon tayfı Poutanen ve Svensson (1996:249) tarafından ışıma aktarım denkleminin tam sayısal çözümü kullanılarak farklı geometriler için hesaplanmıştır. compPS olarak adlandırılan bu model Xspec programı altında X-ışın tayflarının modellenmesi için kullanılmaktadır.

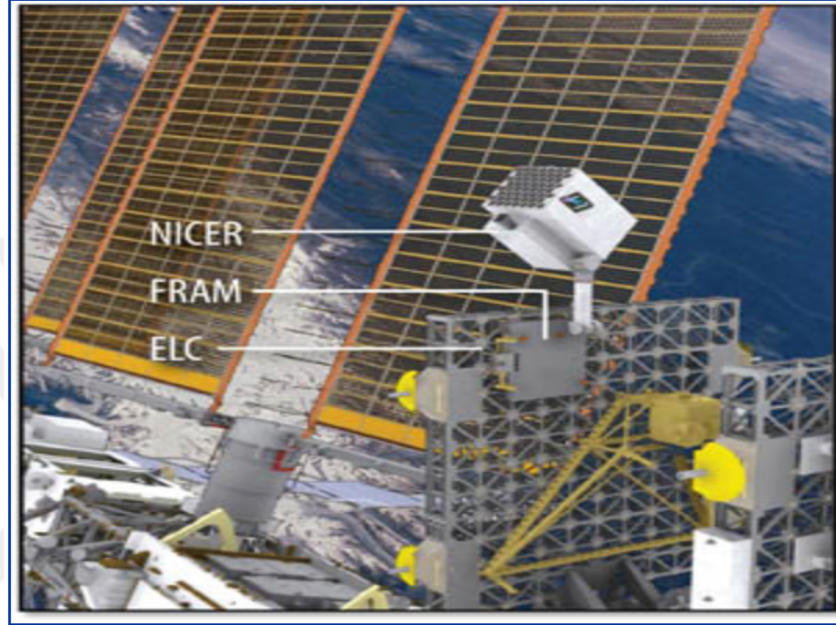
3.3. NICER X-ışın Zamanlama Uydusu

X-ışın Zamanlama uydusu NICER, düşük enerjilerde X-ışını zamanlama yöntemi ile nötron yıldızlarının iç yapılarının incelenmesi için tasarlanmış bir detektördür ve görevini Uluslararası Uzay İstasyonu (ISS) üzerinde gerçekleştirmektedir (Şekil 3.9). NICER, nötron yıldızlarının termal ve termal olmayan yayınımlarının benzeri görülmemiş bir hassasiyetle araştırılmak üzere 0.2-12 keV bandında veri sağlamaktadır.

NICER' da bulunan X-ışını zamanlama dedektörü (XTI) 56 X-ışını "yoğunlaştırıcı" optik (XRC) ve silikon sapma detektörü (SDD) çiftinin birleşiminden oluşur. Her XRC, gökyüzünün kabaca 30 açısıye² bölgesinden geniş bir geometrik alan üzerinde X-ışınları

³ <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/>

toplar ve bunları küçük bir SDD' ye odaklar. SDD, üzerine düşen her bir fotonu algılar, enerjilerini iyi (yüzde birkaç) tayfsal çözünürlükle ve algılama sürelerini Evrensel Zamana göre eşi görülmemiş 100 nanosaniyelik RMS'e kaydeder. 0.2-12 keV X-ışını bandı içinde yüksek bir sinyal-gürültü oranlı foton sayma kabiliyeti sağlar ve tipik nötron yıldız tayfını mükemmel bir şekilde betimlemesinin yanısıra diğer astrofiziksel kaynakların incelenmesi için de mükemmel bir dedektör olma özelliğini taşımaktadır (Heasarc, 2022).



Şekil 3.9. Uluslararası Uzay İstasyonu (ISS) üzerinde görevini gerçekleştiren NICER uydusu (Heasarc, 2022).

3.4. SWIFT (Neil Gehrels Swift Gözlemevi):

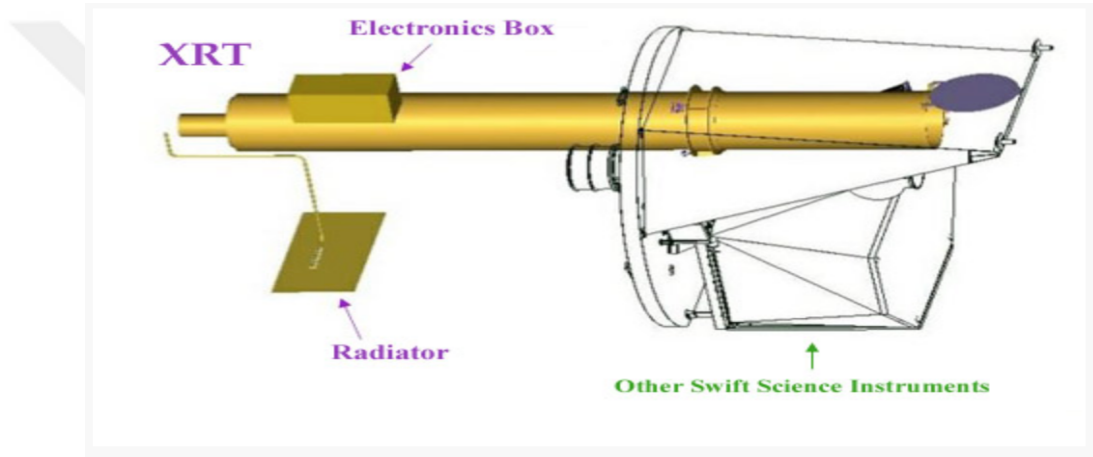
Swift, gama ışını patlamalarını (GRB) algılamak amacıyla tasarlanmış olan çoklu dalga boylu bir gözlemevidir. SWIFT'te bulunan üç dedektör, gama ışını, X ışını, ultraviyole ve optik dalga bantlarında GRB'leri ve ardıl ışımaları gözlemlemek için birlikte çalışır. Swift, yılda yaklaşık 100 GRB keşfeder. *Burst Alert Telescope*, GRB'leri algılar ve gökyüzündeki konumlarını belirler. Ardından hızlı bir şekilde (yaklaşık 90 saniyeden daha kısa bir sürede) patlama konumunu dar alanlı hassas X - ışını ve UV/optik teleskopların görüş alanı içine getirmek için kendini otomatik olarak yeniden yönlendirir. Swift, patlamaların ardıl ışınma yaptığı süre boyunca çok dalga boylu ışık eğrileri, patlamanın gama ışını, X-Işın tayflarının elde edilmesi için veri sağlar. Swift teleskopu üzerinde bulunan dedektörler;

Patlama Uyarı Teleskopu (Burst Alert Telescope, BAT, 15 - 150 keV)

Geniş görüş alanı (2 steradyan) ve yüksek hassasiyeti ile BAT, yılda yaklaşık 100 GRB tespit eder ve uydudaki patlama konumlarını açı dakikası konum doğruluğu ile hesaplar.

X-ışın Teleskopu (X-ray Telescope, XRT, 0.3 - 10 keV)

Swift X-ışını Teleskobu (XRT, Şekil 3.10), 110 cm² etkin alana, 23,6 x 23,6 açı dakikalık görüş alanına (FOV), 18 açı saniyelik çözünürlüğe ve 0.2-10 keV enerji aralığına sahip bir X-ışını teleskopudur. GRB'lerin ardalan akılarını, tayflarını ve ışık eğrilerini geniş bir aralıkta ölçmek için tasarlanmıştır. XRT, tipik bir GRB için 10 saniye içinde 5 yay saniyelik doğrulukta saptar ve patlama keşfinden 20-70 saniye sonra başlayan ve günler veya haftalar boyunca devam eden GRB'lerin X-ışını karşılıklarını inceler.



Şekil 3.10. XRT dedektörünün bir gösterimi.

UV/Optik Teleskop (UVOT, 170 - 600 nm)

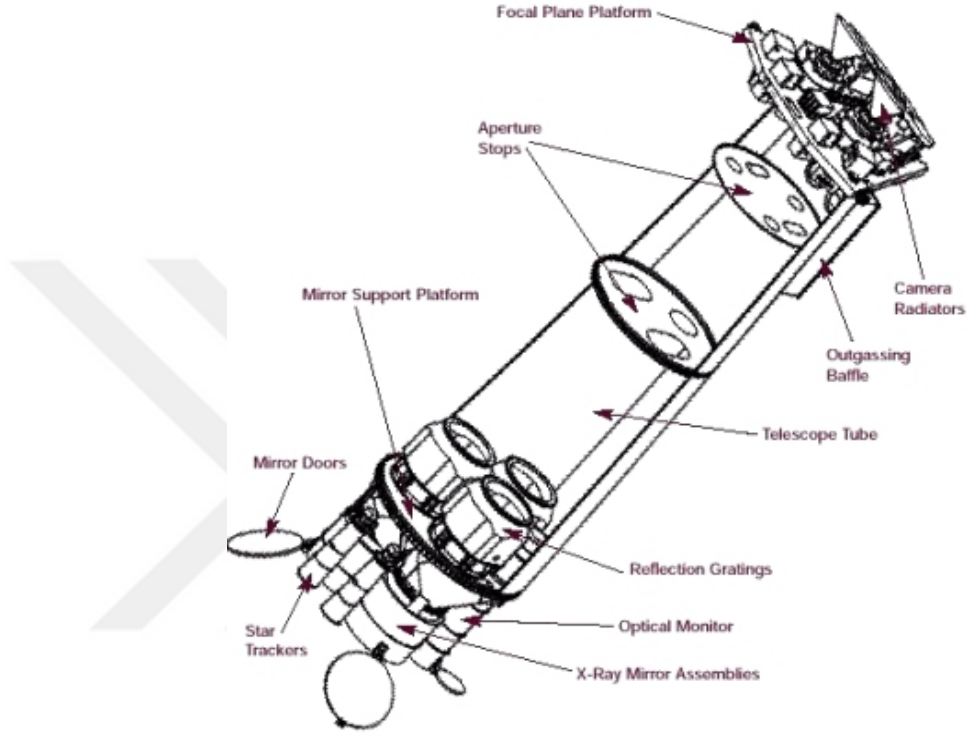
UVOT, *XMM-Newton* Optik Monitörün (OM) bir benzeridir. GRB'lerin gözlemleri, optik ardıl ışımaların parlaklıklarının tipik olarak $t^{-1.1}$ den $t^{-2.1}$ e düştüğünü göstermiştir. Bu nedenle, bu karşılıkları gözlemlemek ve kırmızıya kaymalarını henüz parlakken belirlemek için kaynağa hızlı bir şekilde yönelerek gözlemlere başlamak gereklidir. UVOT gözlemleri, GRB alanının hızlı optik görüntülerini sağlayarak, herhangi bir optik veya kızılötesi karşılığın tanımlanabilmesi ve çalışılabilmesi için yer tabanlı gözlemlerin hızlı bir şekilde ve yüksek konumsal hassasiyette başlatılmasını mümkün kılar.

3.5. XMM-Newton Teleskobu

Avrupa Uzay Ajansı'nın (*The European Space Agency*; ESA) Çoklu x-ışın Ayna misyonu (*XMM-Newton*) 10 Aralık 1999'da Ariane 504 tarafından yörüngeye

yerleştirilmiştir. Uydu, KD'lerden galaksilerin oluşumuna kadar birçok konunun araştırılmasına sağladığı oldukça hassas verilerle katkı sunmaktadır.

XMM-Newton, etkin alanı oldukça geniş, yüksek verimli üç X-ışını teleskopu ve bir optik monitörden oluşmaktadır. Geniş toplama alanı ve uzun kesintisiz pozlama yapma yeteneği, son derece hassas gözlemler sağlar (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. XMM-Newton uydu sistemi (ESA, 2022).

XMM-Newton uydusu modüler olarak yapılandırılmıştır ve dört ana unsurdan oluşur. Bu çalışmada kullandığımız Odak düzlemi araçlarını taşıyan Odak Düzlemi Platformundan (FPP) oluşan Odak Düzlemi Grubu (FPA), iki Yansıma Izgarası Spektrometresi (RGS) okuma kamerası, bir EPIC PN ve iki EPIC MOS görüntüleme dedektörü ve kameralar için veri işleme ve güç dağıtım birimlerinden oluşmaktadır. EPIC ve RGS cihazları, CCD dedektörlerini soğutan radyatörlerle donatılmıştır.

Avrupa Foton Görüntüleme Kamerası (EPIC); Altı konumlu bir filtre tekerleğinin arkasındaki uzay aracının üç teleskopunun her birinin ana odak noktasında bir Avrupa Foton Görüntüleme Kamerası (EPIC) bulunur. Son derece zayıf X-ışını radyasyonunu kaydedebilen silikon çipleri ile gelişmiş Charge-Coupled Device kameraları (CCD), saniyenin binde birine ve daha azına kadar olan hızlı yoğunluk değişimlerini tespit edebilir.

Yansıma Izgara Spektrometresi (RGS); Tayfın tamamlayıcı bir analizi için, üç teleskoptan ikisinin ayna modülünde, gelen ışınların yaklaşık yüzde 40'ını kendi CCD kamerasıyla ikincil bir odağa yansıtan bir ızgara yapısı vardır. Bu Yansıma Izgara Spektrometresi (RGS) çeşitli dalga boylarını EPIC' den daha ayrıntılı olarak gösterir.

Optik Monitör (OM); XMM-Newton'daki üçüncü cihaz, çok hassas bir optik/UV teleskopu olan Optik Monitördür (OM). X-ışını teleskoplarıyla aynı bölgeleri ultraviyole ve görünür dalga boylarında eş zamanlı gözlemleyebilir. Bu, gökbilimcilere X-ışını kaynakları hakkında tamamlayıcı veriler sağlar. 2 metre uzunluğundaki teleskop, X-ışını ayna modüllerinin yanında XMM-Newton'un ayna destek platformuna monte edilmiştir. Yörüngede, 30 cm çapındaki bu teleskop, Dünya yüzeyindeki dört metre çapındaki bir alet kadar hassas veriler sağlamaktadır(ESA, 2022).

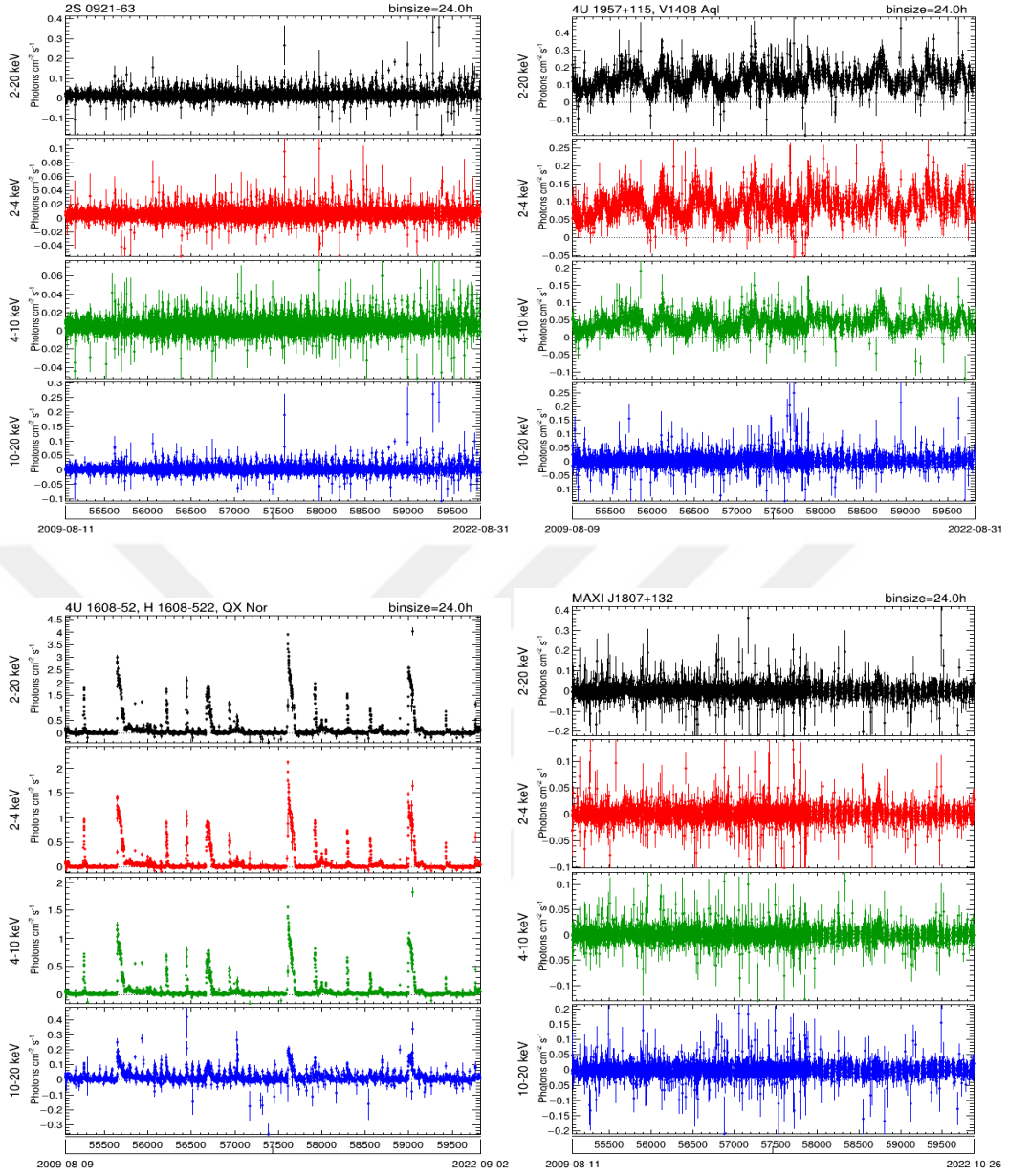
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

X- ışın çiftlerinin taç bölgesinin doğası ve kompton saçılmasının kritik bileşeni olan düşük enerjili fotonların temelini oluşturan geometrik yapısı ile ilgili araştırmalar son yıllarda büyük ivme kazanmıştır. Bu nedenle bileşenlerinden biri NY ve KD olan sistemlerin özellikle düşük ışıma gücü bölgesindeki benzerlik ve farklılıklarının araştırılması oldukça önemlidir. Bu tez kapsamında LMXB'lerde düşük enerji bölgesinde tayfsal indis ve X-ışın ışıma gücü arasında olduğu bilinen ters-korelasyon iki KD (2S 0921-63, 4U 1957+11) ve iki NY (4U 1608-52, MAXI J1807+132) kaynağının tayfsal analizleri ile incelenmiştir.

İncelenen kaynakların verileri ağırlıklı olarak NICER, Swift ve ek olarak XMM-Newton arşivlerinden alınmıştır. Öncelikli olarak kaynakların düşük yığılma ve nispeten düşük ışıma gücüne sahip olduğu verilerin tayfsal analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Kaynakların veri arşivlerinde çok sayıda gözlemleri olduğu için parlama yaptıkları dönemler ve parlaklıklarının azalıp düşük ışıma gücü evresine girdikleri dönemler öncelikle tüm gökyüzü röntgen monitörü MAXI (*The Monitor of All-sky X-ray Image*)'in uzun dönemli ışık eğrilerine bakılarak belirlenmiştir⁴. Her bir kaynağın yaklaşık 10 yıllık ışık eğrileri Şekil 4.1' de verilmektedir.

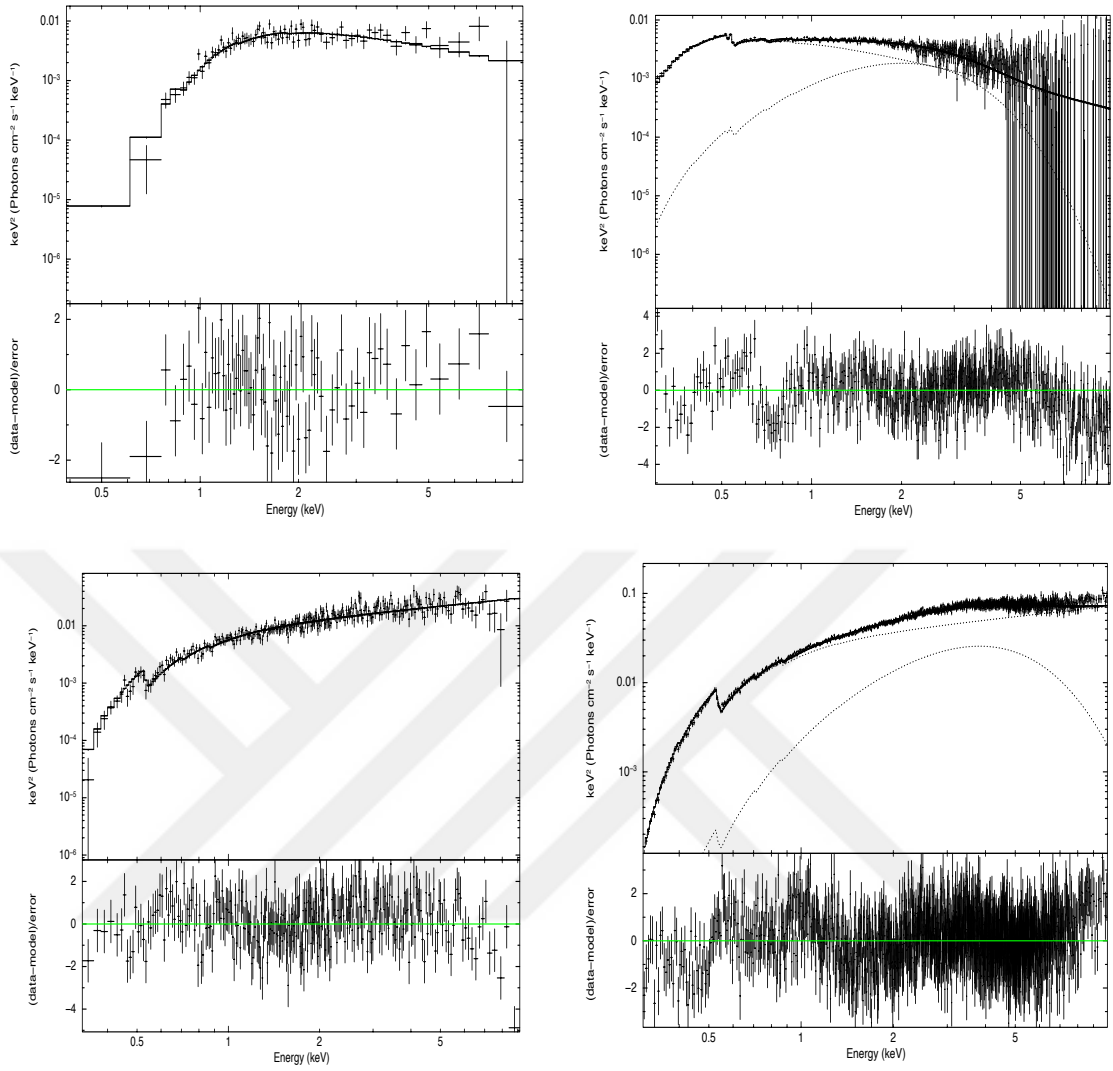
Öncelikli olarak termal, fenomenolojik güç yasası (PL) ve komptonizasyon gibi tekli modeller kullanılarak kabul edilebilir uyumlar elde edilmeye çalışılmıştır. Gerektiği durumlarda minimum sayıda model kombinasyonu kullanılmıştır. Özellikle NICER verilerinin düşük enerjilerdeki yüksek çözünürlükleri dolayısıyla bu enerji bölgesindeki termal yayının bileşenlerinin varlığı daha detaylı incelenmiştir. Termal bileşen, çok renkli bir disk veya standart bir kara cisim modelleri (bbody, diskbb ve bbodyrad) ile araştırılmıştır. Sıradan bir PL'a ek olarak, komptonizasyon (nthcomp) modelleri ile de PL benzeri bir bileşen elde edilebilir. Bu tez kapsamında NY kaynaklarından bir tanesi (MAXI J1807+132) için nthcomp modeli kullanılarak PL bileşeni elde edilmiştir. Tez kapsamında ele alınan her bir kaynak için birer tayf örneği Şekil 4.2' de gösterilmektedir.

⁴ <http://maxi.riken.jp/top/index.html>



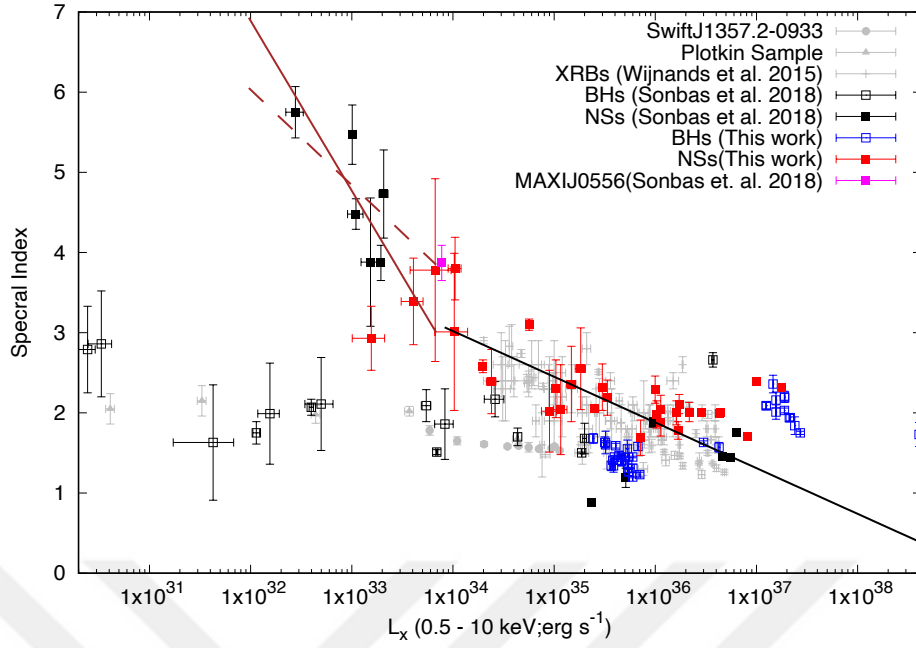
Şekil 4.1. (sol üst) 2S 0921-63, (sağ üst) 4U 1957+11, (sol alt) 4U 1608-52, (sağ alt) MAXI J1807+132 kaynaklarının uzun dönemli MAXI ışık eğrileri⁵

⁵ <http://maxi.riken.jp/top/slist.html>



Şekil 4.2. (sol üst) 2S 0921-63 NICER, (sağ üst) 4U 1957+11 XMM, (sol alt) 4U 1608-52 NICER, (sağ alt) MAXI J1807+132 NICER kaynaklarının farklı modeller kullanılarak elde edilen tayfları verilmektedir. 2S 0921-63 ve 4U 1608-52 için PL kullanılarak tek bileşenli modeli, 4U 1957+11 ve MAXI J1807+132 için termal ve PL yada nthcomp kullanılarak iki bileşenli modelleri elde edilmiştir ve model bileşenleri şekilde gösterilmektedir.

Şekil 4.3’ de tez kapsamında çalıştığımız dört LMXB kaynağının Γ ’ya karşı 0.5 – 10 keV enerji aralığındaki L_x arasındaki davranışı (KD: siyah ve NY: kırmızı) Wijnands vd. (2015:1371) ve Sonbas vd. (2018:150) ile birlikte sunulmaktadır. Wijnands vd. (2015:1371) çalışması gri ile Sonbas vd. (2018:150) siyah ile gösterilmiştir. Siyah ile yüksek parlaklık verileri ve kahverengi ile düşük parlaklık değerleri için gösterilen veriler, Sonbas vd. (2018:150)’ den alınmıştır ve bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlarla uyum içindedir. Tayfsal fitlerden elde edilen değerler Tablo 4.1’ de verilmektedir.



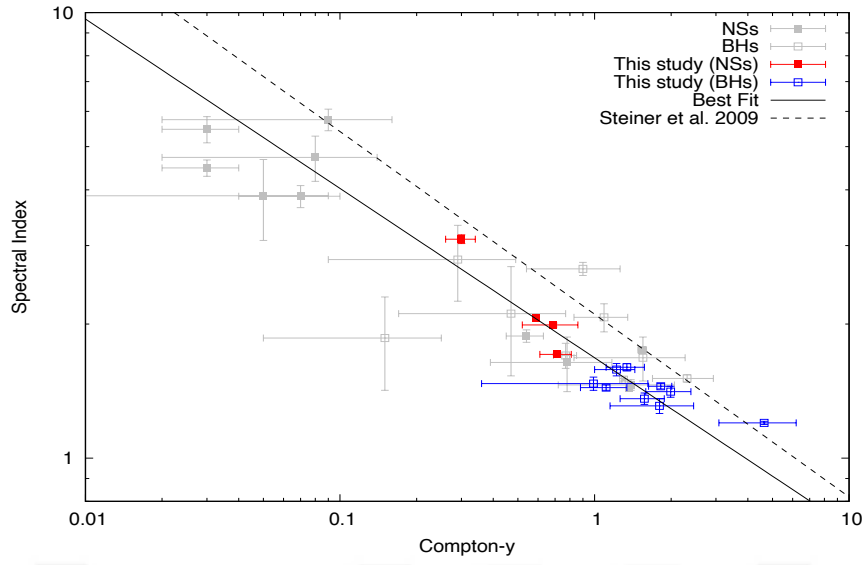
Şekil 4.3. KD çiftleri (mavi) ve NY çiftleri (kırmızı) için tayfsal indekse karşı 0.5-10 keV’de X-ışını parlaklığı. Wijnands vd. (2015:1371) çalışması gri ile Sonbas vd. (2018:150) siyah ile gösterilmiştir. Fit’ler Sonbas vd. (2018:150)’den alınmış ve bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlarla uyum içindedir.

Şekil 4.3’de görüldüğü üzere seçilen KD kaynaklarının (bkz. boş mavi kareler) $\sim < 10^{35}$ erg/s’den daha düşük ışıma gücünde verisi bulunamamıştır. NY kaynaklarının L_x dağılımları ise bu kaynak seti için KD’lere göre daha geniş ışıma gücüne dağılmıştır (bkz. kırmızı dolu kareler). Bu daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi kaynakların tayfsal durumları ile ilgilidir. Önceki çalışmalarda belirtildiği üzere bu çalışmada mümkün olduğu kadar gözlemlerin her biri için en düşük parlaklık ölçeğine, yani LHS’de bulunan veya sessiz duruma yaklaşan kaynaklara ve mümkün olduğunca en basit tayfsal modelin kullanımına odaklandık. Şekil 4.3’ün düşük parlaklık bölgesine dayalı olarak, NY çiftleri için Γ ’nın L_x ile ters orantılı olduğu önerisini destekler niteliktedir. İncelenen veri seti için tayfsal indis parlaklık azaldıkça dik bir artış gösterir yani LHS ile ilişkilendirilebilecek parlaklık aralığında çok daha yumuşak tayflara işaret eder ancak şekilden de görüldüğü üzere hata değerleri nispeten daha yüksektir.

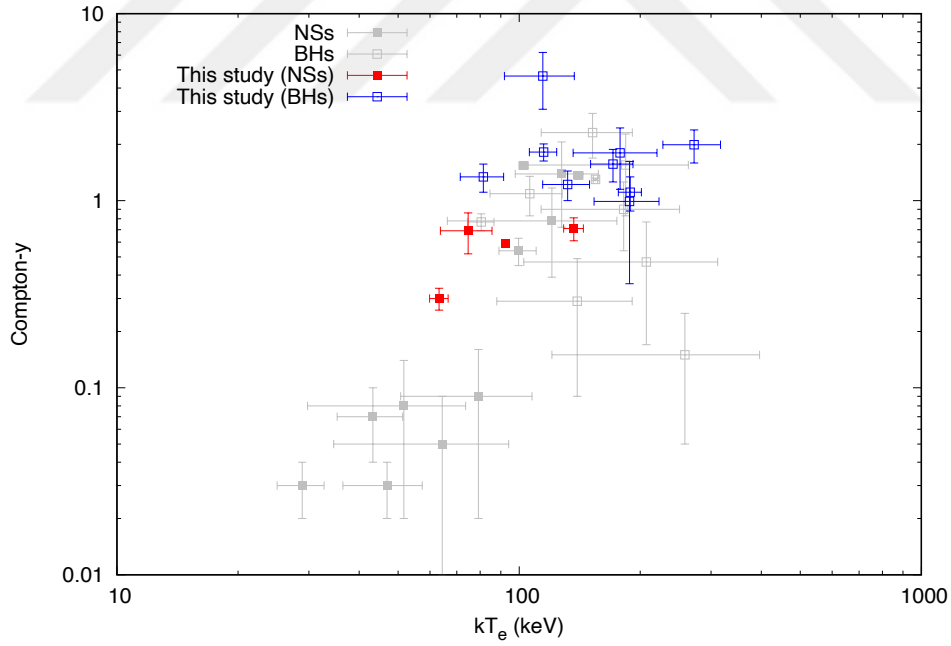
Sonbas vd. (2018:150)’den yola çıkarak Γ ’e karşı L_x ’in araştırılmasına ek olarak incelenen kaynaklara ait verilerin termal ve termal olmayan bileşenlerinin komptonization gibi fiziksel olarak motive edilmiş bir model tarafından tanımlanıp tanımlanamayacağını araştırmak için Xspec’de bulunan COMPPS modelini bu tez kapsamında kullanılan veri

setimize uygulanarak fotonların sıcak elektron koronasını geçerken enerjisindeki ortalama değişimin kT_e ve optik derinliğe bağlı olarak belirlenmesini sağlayan bir compton-y parametresi edilmesi amaçlanmıştır (Tablo 4.2). Sonuçlar, aynı veri setlerinin PL ile fit edilmesi sonucu elde edilen tayfsal indisleri Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Oldukça büyük belirsizliklere rağmen, compton-y parametreleri ve Γ arasında Sonbas vd. (2018:150) tarafından bildirilen korelasyon açıkça yeni veri seti için de geçerliliğini korumaktadır. Bu iki parametre arasında görülmesi beklenen ve yüksek enerjilere saçılan fotonların indisi Γ_1 , Denklem 2.1 kullanılarak hesaplanan teorik bağımlılık kesikli çizgi ile gösterilmektedir. Verilere en iyi uyum 0.38 ± 0.1 olarak bulunmuştur ve Sonbas vd. (2018:150) ile tutarlıdır. Işıma gücü yüksek olan sert tayf özelliği gösteren NY çiftlerinin yüksek compton-y değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Compton-y parametresi, $y = 4kT_e/m_e c^2 \text{Max}(\tau_{es}, \tau_{es}^2)$ ile hesaplanır. Burada kT_e elektron sıcaklığıdır ve τ_{es} saçılan elektronların optik derinliğidir (Steiner vd., 2009:1279). Düşük ışıma gücüne sahip NY çiftleri COMPPS modeli ile iyi uyum göstermediği için grafikte yer verilmemiştir.

Compton-y parametresine ek olarak, taç bölgesi sıcaklığı, kT_e (keV), komptonizasyon modelinin bir diğer önemli parametresidir. Compton-y ve korona sıcaklığı, kT_e arasındaki olması öngörülen korelasyon Şekil 4.5'te gösterilmektedir (elde edilen değerler için bkz. Tablo 4.2). Benzer şekilde Sonbas vd. (2018:150) tarafından bildirilen korelasyon açıkça yeni veri seti için de geçerliliğini korumaktadır. Yumuşak tayfa doğru gidildikçe NY çiftlerinin KD ile ve sert tayfa sahip NY çiftleri arasında bir ayrım olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 4.4. Bu tez çalışmasında ele alınan KD çiftleri (mavi) ve NY çiftleri (kırmızı) için tayfsal indekse karşı Compton-y parametresi. Sonbas vd. (2018:150) çalışması gri ile gösterilmiştir. Düz çizgi verilere en uygun olanıdır ve kesikli yüksek enerjilere saçılan foton indisinin compton-y parametresi ile arasında olan ilişkinlik temel alınarak hesaplanmıştır (Steiner vd., 2009:1279).



Şekil 4.5. Bu tez çalışmasında incelenen KD çiftleri (mavi) ve NY çiftleri (kırmızı) için Compton-y parametresine karşı taç bölgesi sıcaklığı, kT_e . Sonbas vd. (2018:150) çalışması gri ile gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Analizleri yapılan kaynakların model fitlerinden elde edilen parametrelerden bir örneklem

Kaynak Adı	Gözlem ID'si (N)=Nicer; (X)=XMM; (S)=Swift	Uzaklık kpc	Işımagücü (0.5 - 10 keV) erg/s ⁻¹	Model	Γ	Tin / kTbb keV	χ^2/dof
2S0921-63	1050460101(N)	7	5.48±0.10E+35	PL	1.26±0.04	-	479/525
	1050460103(N)	-	4.37±0.08E+35	PL	1.47±0.05	-	362/291
	1050460104(N)	-	5.30±0.20E+35	PL	1.55±0.11	-	88/89
	1050460105(N)	-	7.02±0.13E+35	PL	1.23±0.03	-	266/277
	1050460106(N)	-	5.04±0.03E+35	PL	1.44±0.02	-	1051/591
	1050460108(N)	-	3.22±0.13E+35	PL	1.63±0.14	-	93/88
	1050460109(N)	-	4.64±0.10E+35	PL	1.41±0.07	-	92/88
	1050460111(N)	-	3.86±0.10E+35	PL	1.34±0.08	-	224/201
	1050460112(N)	-	3.95±0.03E+35	PL	1.45±0.02	-	902/587
	1050460113(N)	-	5.99±0.03E+35	PL	1.45±0.01	-	1368/692
	1050460114(N)	-	5.33±0.03E+35	PL	1.31±0.01	-	1400/717
	1050460115(N)	-	5.99±0.03E+35	PL	1.20±0.01	-	1117/765
	1050460116(N)	-	2.44±0.04E35	PL	1.68±0.06	-	424/316
	1050460117(N)	-	3.67±0.07E+35	PL	1.34±0.06	-	358/282
	1050460118(N)	-	6.74±0.12E+35	PL	1.58±0.05	-	319/279
	1050460119(N)	-	5.33±0.08E+35	PL	1.36±0.04	-	397/319
	1050460122(N)	-	3.24±0.03E+35	PL	1.59±0.03	-	702/521
	1050460123(N)	-	4.60±0.03E+35	PL	1.45±0.02	-	954/562
	1050460125(N)	-	3.79±0.09E+35	PL	1.41±0.04	-	242/195
	1050460126(N)	-	6.00±0.20E+35	PL	1.31±0.05	-	127/106
	51590101(X)	-	4.10±0.01E+35	BBODY+PL	1.59±0.03	1.80±0.03	1809/1534
	51590201(X)	-	3.16±0.03E+35	BBODY+PL	1.63±0.07	1.43±0.08	3143/3233
4U1957+11	1100400101(N)	10	1.56±0.01E+37	DISKBB+PL	2.16±0.10	1.58±0.02	940/696
	1100400102(N)	-	1.56±0.01E+37	DISKBB+PL	2.01±0.09	1.57±0.03	937/702
	1100400104(N)	-	1.90±0.01E+37	DISKBB+PL	2.19±0.06	1.69±0.01	1605/817

Tablo 4.1. (Devam) Analizleri yapılan kaynakların model fitlerinden elde edilen parametrelerden bir örneklem

4U1957+11	1100400107(N)	-	1.89±0.01E+37	DISKBB+PL	2.21±0.06	1.70±0.01	1604/817
	2542010101(N)	-	1.25±0.02E+37	DISKBB+PL	2.09±0.04	1.44±0.01	1944/883
	2542010102(N)	-	1.25±0.01E+37	DISKBB+PL	2.09±0.05	1.44±0.01	1579/791
	2542010201(N)	-	2.11±0.01E+37	DISKBB+PL	1.94±0.05	1.74±0.01	1944/879
	2542010202(N)	-	2.16±0.01E+37	DISKBB+PL	1.94±0.04	1.69±0.01	2386/915
	2542010301(N)	-	2.39±0.01E+37	DISKBB+PL	1.84±0.11	1.79±0.01	3745/963
	2542010401(N)	-	2.71±0.01E+37	DISKBB+PL	1.75±0.02	1.78±0.01	2928/962
	2542010501(N)	-	1.89±0.01E+37	DISKBB+PL	2.03±0.03	1.67±0.01	4511/946
	206320101(X)	-	3.00±0.01E+36	BBODY+PL	1.63±0.02	0.97±0.02	2028/1789
	00030959001(S)	-	4.05±0.20E+38	PL	1.73±0.15	-	42/42
	00030959006(S)	-	4.27±0.10E+36	PL	1.57±0.06	-	220/214
	00091070015(S)	-	1.46±0.01E+37	PL	2.36±0.11	-	716/616
4U1608-52	3657027601(N)	5.8	4.34±0.02E+36	PL	1.99±0.02	-	890/696
	3657027501(N)	-	4.42±0.03E+36	PL	2.00±0.02	-	647/615
	2050070127(N)	-	1.03±0.37E+34	PL	3.01±0.98	-	66/56
	2050070114(N)	-	8.07±0.03E+36	PL	1.71±0.01	-	1063/772
	2050070115(N)	-	1.83±0.21E+35	PL	2.55±0.51	-	86/76
	1050070120(N)	-	1.05±0.15E+34	PL	3.80±0.39	-	64/32
	1050070123(N)	-	6.67±2.90E+33	PL	3.78±1.14	-	18/18
	1050070132(N)	-	1.76±0.01E+37	PL	2.32±0.02	-	865/718
	1050070134(N)	-	9.92±0.04E+36	PL	2.39±0.02	-	835/677
	0050070108(N)	-	2.88±0.02E+36	PL	2.01±0.03	-	586/544
	00010741008(S)	-	1.13±0.04E+36	PL	1.88±0.17	-	369/488
	00010741009(S)	-	9.96±0.04E+35	PL	2.29±0.17	-	419/471
	00010741010(S)	-	1.13±0.04E+36	PL	2.04±0.18	-	484/505
	00010741011(S)	-	1.03±0.04E+36	PL	1.98±0.17	-	495/498
	00010741015(S)	-	7.15±0.37E+35	PL	1.69±0.22	-	296/382
	00015288001(S)	-	1.62±0.06E+36	PL	2.00±0.15	-	407/502
	00030791025(S)	-	1.68±0.04E+36	PL	1.78±0.11	-	695/680

Tablo 4.1. (Devam) Analizleri yapılan kaynakların model fitlerinden elde edilen parametrelerden bir örneklem

4U1608-52	00030791117(S)	-	2.17±0.06E+36	PL	2.01±0.12	-	582/604
	00030791120(S)	-	1.04±0.08E+35	PL	2.30±0.36	-	148/204
	00030791130(S)	-	1.48±0.16E+35	PL	2.36±0.47	-	81/126
	00032322001(S)	-	2.99±0.18E+35	PL	2.32±0.29	-	265/298
	00032322002(S)	-	3.36±0.16E+35	PL	2.19±0.22	-	327/378
	00032322003(S)	-	1.72±0.05E+36	PL	2.11±0.12	-	562/570
MAXIJ1807+132	2200840101(N)	5	1.48±0.01E+36	BBODYRAD+PL	2.06±0.02	0.11±0.01	893/705
	2200840106(N)	-	6.51±0.05E+34	BBODYRAD+PL	2.58±0.08	0.35±0.01	1663/428
	2200840118(N)	-	5.65±0.05E+34	BBODYRAD+PL	3.10±0.07	0.50±0.01	504/393
	00010030001(S)	-	1.16±0.18E+35	PL	2.04±0.56	-	38/58
	00010031001(S)	-	9.01±0.15E+34	PL	2.02±0.51	-	53/54
	00010037008(S)	-	5.41±2.38E+33	PL	2.64±0.62	-	15/16
	00010037009(S)	-	4.07±0.99E+33	PL	3.39±0.54	-	10/20
	00010037017(S)	-	2.40±0.26E+34	PL	2.39±0.40	-	87/117
	00010037020(S)	-	1.83±0.62E+33	PL	2.50±1.08	-	5.0/9.0
	00010037021(S)	-	1.56±0.55E+33	PL	2.93±0.40	-	15/10

Tablo 4.2. *Düşük Parlaklık aralığındaki LMXB seti için kullanılan COMPPS parametreleri.*

Kaynak Adı	Gözlem ID'si (N)=Nicer; (X)=XMM; (S)=Swift	kTbb (keV)	kTe (keV)	τ_y	χ^2/dof
2S0921-63	1050460103(N)	0.13±0.01	188.14±39.57	0.68±0.29	340/289
	1050460106(N)	0.12±0.00	188.85±13.11	0.75±0.13	990/591
	1050460115(N)	0.15±0.01	114.54±23.31	5.18±1.12	1037/767
	1050460118(N)	0.13 (fixed)	132.00±17.54	1.18±0.13	327/279
	1050460119(N)	0.11±0.01	171.18±20.59	1.17±0.17	356/314
	1050460122(N)	0.13±0.01	81.44±10.29	2.11±0.21	808/531
	1050460123(N)	0.14±0.01	115.00±9.00	2.02±0.13	904/565
	1050460125(N)	0.15±0.01	272.13±40.57	0.93±0.10	206/192
	1050460126(N)	0.13±0.02	178.14±41.51	1.29±0.30	124/105
4U1608-52	3657027601(N)	0.12±0.01	74.65±11.49	1.18±0.19	865/694
	2050070114(N)	0.14±0.00	136.69±7.87	0.66±0.08	869/770
MAXIJ1807+132	2200840101(N)	0.11±fixed	92.39±1.44	0.81±0.01	887/706
	2200840118(N)	0.07±0.00	63.23±3.44	0.60±0.06	516/395

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

LMXB sınıfından iki KD (2S 0921-63, 4U 1957+11) ve iki NY (4U 1608-52, MAXI J1807+132) kaynağının tayfsal analizleri ile $L_x \sim 10^{30}-10^{36}$ erg s⁻¹ bölgesindeki Γ , L_x , compton-y ve kTe arasındaki ilişki farklı (NICER, SWIFT ve XMM-Newton) uydu verileri kullanılarak ilk kez geniş kapsamlı olarak bu tez çalışmasında incelenmiştir. Çalışmada tayflar öncelikle bir PL ve istatistiksel olarak gerekli görüldüğü durumlarda ek bir termal bileşen (bbody, diskbb, bbodyrad) ve sonrasında kaynaklara ait anlamlı fiziksel parametrelerin elde edilmesi için güçlü bir model olan komptonizasyon modeli uygulanarak modellenmiştir.

Tez kapsamında seçilen KD kaynakları büyük olasılıkla kaynaklar sessiz duruma girmediğinden $L_x < 10^{35}$ erg s⁻¹'den daha düşük ışıma gücünde verisi bulunamamıştır. KD kaynaklarından 2S 0921-63' ün verileri genel olarak herhangi bir termal bileşen olmadan sadece PL ile modellenmiştir. 4U 1957+11 kaynağının verileri PL'a ek olarak termal bileşen (diskbb) kullanılarak modellenmiştir. NY kaynakların KD kaynaklarına göre daha düşük parlaklık bölgesinde tayfları elde edilmiştir. NY kaynaklarının tayfsal olarak tanımlanabilmesi için çoğunlukla ek termal bir bileşene gerek duyulmadan sadece bir PL bileşeni kullanılmıştır. İncelenen NY ve KD çiftlerinin Γ ' ya karşı L_x davranışı önceki çalışmalarla uyum içindedir (Qiao ve Liu, 2020:2704, 2021; Sonbas vd., 2018:150; Wijnands vd., 2015:1371).

İncelenen 2S 0921-63, 4U 1608-52 ve MAXI J1807+132 kaynaklarının NICER ile alınmış toplam dokuz gözlemi COMPPS ile modellenebilmiştir. Bu modellerden kaynakların optik derinliği ve korona sıcaklığı elde edilmiş ve compton-y parametresi hesaplanmıştır. Compton-y parametresi ile kTe arasında bildirilen korelasyonun yeni veri seti için de geçerliliğini koruduğu açıkça görülmektedir. KD ve sert tayfa sahip NY çiftleri ile yumuşak tayfa sahip NY çiftleri arasında bir ayrışma olduğu açıkça görülmektedir. Ek olarak oldukça büyük belirsizliklere rağmen, compton-y parametreleri ve Γ arasında Sonbas vd. (2018:150) tarafından bildirilen ters-korelasyon açıkça yeni veri seti için de geçerliliğini korumaktadır.

Sonuç olarak, daha hassas veriler ile yapılan bu çalışmada, NY çiftleri için verilmiş olan L_x eşiğinin (10^{34} erg s⁻¹) altında kaynakların tayfsal durumunun karmaşık hale geldiği, yani bazı sistemlerin çok büyük tayfsal indekslere yol açan termal bileşen tarafından tamamen baskılanmış olabileceği bu çalışma kapsamında incelenen kaynaklar için de

geçerliliğini korumaktadır (Belloni vd., 2002:199; Degenaar ve Wijnands, 2012b:581; Heinke vd., 2009:1035; Rutledge vd., 2001:921, 2002:346; Sonbas vd., 2018:150; Tomsick vd., 2004:933; Wijnands vd., 2015:1371; Wijnands vd., 2005:883). Gözlemlenen termal bileşenin Wijnands vd. (2015:1371) tarafından önerildiği gibi, NY yüzeyinin varlığının bir sonucu olarak ortaya çıkması fikri araştırılmaya açıktır. Bunun için, son zamanlarda yapılan çalışmalara (Cackett vd., 2008:87; Degenaar vd., 2015: 2071; Díaz Trigo vd., 2011:150; Fridriksson vd., 2011:162; Homan vd., 2014:131; Merritt vd., 2016:186; Waterhouse vd., 2016:4001; Wijnands vd., 2004:61) ek olarak sessiz evrede geçici bir LMXB için etkin NY yüzey sıcaklık profillerinin NICER gibi uydulardan alınan yüksek çözünürlüklü verilerle belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, Qiao ve Liu (2020:2704) tarafından teorik olarak elde edilen f_{th} değerinin ADAF'ın yapısını ve elde edilen tayfı önemli ölçüde etkileyebileceği sonucu da göz ardı edilmemelidir. Soğuma profillerinin elde edilebileceği ve tüm bu önerilerin incelenebilmesi için ve yüksek çözünürlükte çok daha fazla veriye ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKÇA

- Abramowicz, M. A., Chen, X., Kato, S., Lasota, J.-P., & Regev, O. (1995). "Thermal equilibria of accretion disks". *The Astrophysical Journal*, 438, L37. <https://doi.org/10.1086/187709>
- Abramowicz, M. A., Kluźniak, W., & Lasota, J. P. (2002). "No observational proof of the black-hole event-horizon". *Astronomy and Astrophysics*, 396, L31-L34. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021645>
- Alabarta, K., Altamirano, D., Méndez, M., Cúneo, V. A., Vincentelli, F. M., Castro-Segura, N., García, F., Luff, B., & Veledina, A. (2021). "Failed-transition outbursts in black hole low-mass X-ray binaries". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 507(4), 5507–5522. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2241>
- Alabarta, K., Altamirano, D., Méndez, M., Cúneo, V. A., Zhang, L., Remillard, R., Castro, A., Ludlam, R. M., Steiner, J. F., Enoto, T., Homan, J., Arzoumanian, Z., Bult, P., Gendreau, K. C., Markwardt, C., Strohmayer, T. E., Uttley, P., Tombesi, F., & Buisson, D. J. K. (2020). "X-ray spectral and timing evolution of MAXI J1727-203 with NICER". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 497, 3896-3910. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa2168>
- Alabarta, Kevin, Méndez, M., García, F., Peirano, V., Altamirano, D., Zhang, L., & Karpouzas, K. (2022). "Variability and phase lags of the type-C quasi-periodic oscillation of MAXI J1348–630 with NICER". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 514(2), 2839–2854. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1533>
- Armas Padilla, M., Degenaar, N., Patruno, A., Russell, D. M., Linares, M., Maccarone, T. J., Homan, J., & Wijnands, R. (2011). "X-ray softening in the new X-ray transient XTE J1719-291 during its 2008 outburst decay". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 417, 659-665. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19308.x>
- Armas Padilla, M., Degenaar, N., Russell, D. M., Wijnands, R. (2013). "Multiwavelength spectral evolution during the 2011 outburst of the very faint X-ray transient Swift J1357.2-0933". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 428, 3083-3088. <https://doi.org/10.1093/mnras/sts255>
- Armas Padilla, M., Degenaar, N., & Wijnands, R. (2013b). "The X-Ray Spectral Properties Of Very-Faint Persistent Neutron Star X-Ray Binaries". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 434, 1586-1592. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt1114>
- Armas Padilla, M., Degenaar, N., & Wijnands, R. (2013c). "XMM-Newton and Swift spectroscopy of the newly discovered very faint X-ray transient IGR J17494-3030". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 436, 89-93. <https://doi.org/10.1093/mnras/slt119>
- Bahramian, A., Heinke, C. O., Sivakoff, G. R., Altamirano, D., Wijnands, R., Homan, J., Linares, M., Pooley, D., Degenaar, N., & Gladstone, J. C. (2014). "Discovery of the third transient X-ray binary in the galactic globular cluster Terzan 5". *Astrophysical Journal*, 780, 127. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/780/2/127>

- Balbus, S. A., & Hawley, J. F. (1991). "A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I - Linear analysis. II - Nonlinear evolution". *The Astrophysical Journal*, 376, 214. <https://doi.org/10.1086/170270>
- Balbus, S. A., & Henri, P. (2008). "On the Magnetic Prandtl Number Behavior of Accretion Disks". *The Astrophysical Journal*, 674, 408-414. <https://doi.org/10.1086/524838>
- Balona, L. A. (2000). "The Be Phenomenon". *International Astronomical Union Colloquium*, 175, 1–12. <https://doi.org/10.1017/S0252921100055524>
- Barziv, O., Kaper, L., Van Kerkwijk, M. H., Telting, J. H., & Van Paradijs, J. (2001). "The mass of the neutron star in Vela X-1". *Astronomy and Astrophysics*, 377, 925-944. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011122>
- Bassi, T., Del Santo, M., D'Ai, A., Motta, S. E., Malzac, J., Segreto, A., Miller-Jones, J. C. A., Atri, P., Plotkin, R. M., Belloni, T. M., Mineo, T., & Tzioumis, A. K. (2019). "The long outburst of the black hole transient GRS 1716-249 observed in the X-ray and radio band". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 482, 1587-1601. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2739>
- Begelman, M. C., & Armitage, P. J. (2014). "A mechanism for hysteresis in black hole binary state transitions". *Astrophysical Journal Letters*, 782, L18. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/782/2/L18>
- Belloni, T., Colombo, A. P., Homan, J., Campana, S., & Van der Klis, M. (2002). "A low/hard state outburst of XTE J1550-564". *Astronomy and Astrophysics*, 390, 199-204. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020703>
- Belloni, T., Homan, J., Casella, P., Van Der Klis, M., Nespoli, E., Lewin, W. H. G., Miller, J. M., & Méndez, M. (2005). "The evolution of the timing properties of the black-hole transient GX 339-4 during its 2002/2003 outburst". *Astronomy and Astrophysics*, 440, 207-222. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20042457>
- Belloni, T. M. (2010). "States and Transitions in Black Hole Binaries". *The Jet Paradigm, Lecture Notes in Physics* (pp. 53–84). https://doi.org/10.1007/978-3-540-76937-8_3
- Belloni, T. M. (2011). "Black-hole states in external galaxies". *Astronomische Nachrichten* 324, 409-428. <https://doi.org/10.1002/asna.201011492>
- Burke, M. J., Gilfanov, M., & Sunyaev, R. (2017). "A dichotomy between the hard state spectral properties of black hole and neutron star X-ray binaries". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 466, 194-212. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw2514>
- Cackett, E. M., Wijnands, R., Miller, J. M., Brown, E. F., & Degenaar, N. (2008). "Cooling of the Crust in the Neutron Star Low-Mass X-Ray Binary MXB 1659-29". *The Astrophysical Journal*, 687, L87. <https://doi.org/10.1086/593703>
- Campana, S., Colpi, M., Mereghetti, S., Stella, L., & Tavani, M. (1998). "The neutron stars of Soft X-ray Transients". *Astronomy and Astrophysics Review*, 8, 279-316. <https://doi.org/10.1007/s001590050012>
- Capitanio, F., Belloni, T., Del Santo, M., & Ubertini, P. (2009). "A failed outburst of H1743-322". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398, 1194-1200. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15196.x>
- Casella, P., Belloni, T., Homan, J., & Stella, L. (2004). "A study of the low-frequency quasi-

- periodic oscillations in the X-ray light curves of the black hole candidate XTE J1859+226". *Astronomy and Astrophysics*, 426, 587-600. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041231>
- Cosmos. (2021). "Blackbody Radiation". Swinburne Teknoloji Üniversitesi. <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/b/Blackbody+Radiation>
- Cottam, J., Kahn, S. M., Brinkman, A. C., Den Herder, J. W., & Erd, C. (2001). "High-resolution spectroscopy of the low-mass X-ray binary EXO 0748-67". In *Astronomy and Astrophysics*. 365, L277-L281. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20000053>
- Curran, P. A., & Chaty, S. (2013). "Near-infrared and optical observations of the failed outbursts of black hole binary XTE J1550-564". *Astronomy and Astrophysics*, 557, 45. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321865>
- Davis, S. W., Blaes, O. M., Hubeny, I., & Turner, N. J. (2005). "Relativistic Accretion Disk Models of High-State Black Hole X-Ray Binary Spectra". *The Astrophysical Journal*, 621, 372-387. <https://doi.org/10.1086/427278>
- De Marco, B., Motta, S. E., & Belloni, T. M. (2022). "Probing black-hole accretion through time variability". <http://arxiv.org/abs/2209.13467>
- Degenaar, N., Miller, J. M., Wijnands, R., Altamirano, D., & Fabian, A. C. (2013). "X-ray emission and absorption features during an energetic thermonuclear X-ray burst from IGR J17062-6143". *Astrophysical Journal Letters*, 767, L37. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/767/2/L37>
- Degenaar, N., Patruno, A., & Wijnands, R. (2012d). "THE QUIESCENT X-RAY PROPERTIES OF THE ACCRETING MILLISECOND X-RAY PULSAR AND ECLIPSING BINARY SWIFT J1749.4-2807". *The Astrophysical Journal*, 756, 148. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/756/2/148>
- Degenaar, N., & Wijnands, R. (2012b). "Strong X-ray variability in the quiescent state of the neutron star low-mass X-ray binary EXO 1745-248". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 422, 581-589. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20636.x>
- Degenaar, N., Wijnands, R., Bahramian, A., Sivakoff, G. R., Heinke, C. O., Brown, E. F., Fridriksson, J. K., Homan, J., Cackett, E. M., Cumming, A., Miller, J. M., Altamirano, D., & Pooley, D. (2015). "Neutron star crust cooling in the Terzan 5 X-ray transient swift J174805.3-244637". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451, 2071-2081. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv1054>
- Degenaar, N., Wijnands, R., & Miller, J. M. (2013c). "A direct measurement of the heat release in the outer crust of the transiently accreting neutron star XTE J1709-267". *Astrophysical Journal Letters*, 767, L31. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/767/2/L31>
- Deufel, B., Dullemond, C. P., & Spruit, H. C. (2001). "X-ray spectra from protons illuminating a neutron star". *Astronomy and Astrophysics*, 377, 955-963. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011129>
- Díaz Trigo, M., Boirin, L., Costantini, E., Méndez, M., & Parmar, A. (2011). "XMM-Newton observations of the low-mass X-ray binary EXO0748-676 in quiescence". *Astronomy and Astrophysics*, 528, 150. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016200>

- Done, C., Gierliński, M., & Kubota, A. (2007). "Modelling the behaviour of accretion flows in X-ray binaries". *The Astronomy and Astrophysics Review*, 15, 1-66. <https://doi.org/10.1007/s00159-007-0006-1>
- Dunn, R. J. H., Fender, R. P., Körding, E. G., Belloni, T., & Cabanac, C. (2010). "A global spectral study of black hole X-ray binaries". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 403, 61-82. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16114.x>
- ESA. (2021). "X Ray Binaries Monitoring". X-Işını İkisinin Temsili. (Kredi: NASA / R. Hynes). [https://doi.org/X-ışını ikilisinin temsili. \(Kredi: NASA / R. Hynes\)](https://doi.org/X-ışını ikilisinin temsili. (Kredi: NASA / R. Hynes))
- ESA. (2022). XMM-Newton. *Sci.Esa.Int.* <https://sci.esa.int/web/xmm-newton/>
- Fender, R. P., Homan, J., & Belloni, T. M. (2009). "Jets from black hole X-ray binaries: Testing, refining and extending empirical models for the coupling to X-rays". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 396, 1370-1382. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14841.x>
- Fridriksson, J. K., Homan, J., Wijnands, R., Cackett, E. M., Altamirano, D., Degenaar, N., Brown, E. F., Méndez, M., & Belloni, T. M. (2011). "The variable quiescent X-Ray emission of the transient neutron star XTE J1701-462". *Astrophysical Journal*, 736, 162. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/736/2/162>
- Gendreau, K. C., Arzoumanian, Z., Adkins, P. W., Albert, C. L., Anders, J. F., Aylward, A. T., Baker, C. L., Balsamo, E. R., Bamford, W. A., Benegalrao, S. S., Berry, D. L., Bhalwani, S., Black, J. K., Blaurock, C., Bronke, G. M., Brown, G. L., Budinoff, J. G., Cantwell, J. D., Cazeau, T., ... Yu, W. H. (2016). "The Neutron star Interior Composition Explorer (NICER): design and development". *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*, 9905. <https://doi.org/10.1117/12.2231304>
- Ghisellini, G. (2013). "Radiative processes in high energy astrophysics". *Lecture Notes in Physics*, 873. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-00612-3>
- Giacconi, R., Gursky, H., Kellogg, E., Schreier, E., & Tananbaum, H. (1971). "Discovery of Periodic X-Ray Pulsations in Centaurus X-3 from UHURU". *The Astrophysical Journal*, 167, L67. <https://doi.org/10.1086/180762>
- Giacconi, Riccardo, 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. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.9.439>
- Gilfanov, M. (2010). *The Jet Paradigm. Lecture Notes in Physics*, 794.
- Grindlay, J., Gursky, H., Schnopper, H., Parsignault, D. R., Heise, J., Brinkman, A. C., & Schrijver, J. (1976). "Discovery of intense X-ray bursts from the globular cluster NGC 6624". *The Astrophysical Journal*, 205, L127-L130. <https://doi.org/10.1086/182105>
- Hanuschik, R. W. (1996). "On the structure of Be star disks". *Astronomy and Astrophysics*, 308, 170-179.
- Hasinger, G., & Van Der Klis, M. (1989). "Two patterns of correlated X-ray timing and spectral behaviour in low-mass X-ray binaries". *Astronomy & Astrophysics*, 225, 79-96.
- Heasarc. (2022). NICER Mission Overview. [Heasarc.Gsfc.Nasa.Gov.](https://heasarc.gsfc.nasa.gov)

https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/nicer_about.html

- Heinke, C. O., Jonker, P. G., Wijnands, R., Deloye, C. J., & Taam, R. E. (2009). "Further constraints on thermal quiescent X-ray emission from SAX J1808.4-3658". *Astrophysical Journal*, 691, 1035-1041. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/691/2/1035>
- Homan, J., & Belloni, T. (2005). "The evolution of black hole states". *Astrophysics and Space Science*, 300(1-3). <https://doi.org/10.1007/s10509-005-1197-4>
- Homan, J., Fridriksson, J. K., Jonker, P. G., Russell, D. M., Gallo, E., Kuulkers, E., Rea, N., & Altamirano, D. (2013). "The x-ray properties of the black hole transient MAXI J1659-152 in quiescence". *Astrophysical Journal*, 775, 9. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/775/1/9>
- Homan, J., Fridriksson, J. K., Wijnands, R., Cackett, E. M., Degenaar, N., Linares, M., Lin, D., & Remillard, R. A. (2014). "A strongly heated neutron star in the transient z source maxi J0556-332". *Astrophysical Journal*, 795, 131. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/795/2/131>
- Homan, J., Van Der Klis, M., Fridriksson, J. K., Remillard, R. A., Wijnands, R., Méndez, M., Lin, D., Altamirano, D., Casella, P., Belloni, T. M., & Lewin, W. H. G. (2010). "XTE J1701-462 and its implications for the nature of subclasses in low-magnetic-field neutron star low-mass X-ray binaries". *Astrophysical Journal*, 719, 201-212. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/719/1/201>
- Homan, J., Wijnands, R., van der Klis, M., Belloni, T., van Paradijs, J., Klein-Wolt, M., Fender, R., & Mendez, M. (2001). "Correlated X-Ray Spectral and Timing Behavior of the Black Hole Candidate XTE J1550-564: A New Interpretation of Black Hole States". *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 132, 377-402. <https://doi.org/10.1086/318954>
- Horne, K. (1985). "Images of accretion discs - I. The eclipse mapping method". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 213, 129-141. <https://doi.org/10.1093/mnras/213.2.129>
- Ichimaru, S. (1977). "Bimodal behavior of accretion disks - Theory and application to Cygnus X-1 transitions". *The Astrophysical Journal*, 214, 840-855. <https://doi.org/10.1086/155314>
- Landaluce, I. O. De. (2015). "Spectral state transitions in Low-Mass X-Ray Binaries observed with Ginga". <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3629.9602>
- Lin, D., Remillard, R. A., & Homan, J. (2007). "Evaluating Spectral Models and the X-Ray States of Neutron Star X-Ray Transients". *The Astrophysical Journal*, 667, 1073-1086. <https://doi.org/10.1086/521181>
- Lin, D., Remillard, R. A., & Homan, J. (2009). "Spectral states of XTE J1701 - 462: Link between z and atoll sources". *Astrophysical Journal*, 696, 1275. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/696/2/1257>
- Lin, D., Remillard, R. A., Homan, J., & Barret, D. (2012). "The spectral evolution along the Z track of the bright neutron star X-ray binary GX 17+2". *Astrophysical Journal*, 756, 34. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/756/1/34>

- Linares, M., Bahramian, A., Heinke, C., Wijnands, R., Patruno, A., Altamirano, D., Homan, J., Bogdanov, S., & Pooley, D. (2014). "The neutron star transient and millisecond pulsar in M28: From sub-luminous accretion to rotation-powered quiescence". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 438, 251-261. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt2167>
- Liu, B. F., Mineshige, S., & Shibata, K. (2002). "A Simple Model for a Magnetic Reconnection-heated Corona". *The Astrophysical Journal*, 572, L173-L176. <https://doi.org/10.1086/341877>
- Liu, H., Dong, A. J., Weng, S. S., & Wu, Q. (2019). "Evolution of the hard X-ray photon index in black-hole X-ray binaries: Hints for accretion physics". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487, 5335-5345. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz1622>
- Maccarone, T. J., & Coppi, P. S. (2003). "Hysteresis in the light curves of soft X-ray transients". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 338, 189-196. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06040.x>
- Makishima, K., Maejima, Y., Mitsuda, K., Bradt, H. V., Remillard, R. A., Tuohy, I. R., Hoshi, R., & Nakagawa, M. (1986). "Simultaneous X-ray and optical observations of GX 339-4 in an X-ray high state". *The Astrophysical Journal*, 308, 635. <https://doi.org/10.1086/164534>
- Manmoto, T., Mineshige, S., & Kusunose, M. (1997). "Spectrum of Optically Thin Advection-dominated Accretion Flow around a Black Hole: Application to Sagittarius A* ". *The Astrophysical Journal*, 489, 791-803. <https://doi.org/10.1086/304817>
- Markoff, S. (2010). "From multiwavelength to mass scaling: Accretion and ejection in microquasars and AGN". *Jet Paradigm Lecture Notes in Physics*, 794, 143. https://doi.org/10.1007/978-3-540-76937-8_6
- McClintock, J. E., & Remillard, R. A. (1986). "The black hole binary A0620-00". *The Astrophysical Journal*, 308, 110. <https://doi.org/10.1086/164482>
- McConnell, M. L., Zdziarski, A. A., Bennett, K., Bloemen, H., Collmar, W., Hermsen, W., Kuiper, L., Paciesas, W., Phlips, B. F., Poutanen, J., Ryan, J. M., Schonfelder, V., Steinle, H., & Strong, A. W. (2002). "The Soft Gamma-Ray Spectral Variability of Cygnus X-1". *The Astrophysical Journal*, 572, 984-995. <https://doi.org/10.1086/340436>
- Méndez, M., van der Klis, M., van Paradijs, J., Lewin, W. H. G., Lamb, F. K., Vaughan, B. A., Kuulkers, E., & Psaltis, D. (1997). "Kilohertz Quasi-periodic Oscillation and Atoll Source States in 4U 0614+09". *The Astrophysical Journal*, 485, L37-L40. <https://doi.org/10.1086/310803>
- Menou, K., Esin, A. A., Narayan, R., Garcia, M. R., Lasota, J., & McClintock, J. E. (1999). "Black Hole and Neutron Star Transients in Quiescence". *The Astrophysical Journal*, 520, 276-291. <https://doi.org/10.1086/307443>
- Merritt, R. L., Cackett, E. M., Brown, E. F., Page, D., Cumming, A., Degenaar, N., Deibel, A., Homan, J., Miller, J. M., & Wijnands, R. (2016). "The Thermal State of KS 1731-260 After 14.5 Years in Quiescence". *The Astrophysical Journal*, 833, 186.

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/186>

- Meyer, F., Liu, B. F., & Meyer-Hofmeister, E. (2000). "Evaporation: The change from accretion via a thin disk to a coronal flow". *Astronomy and Astrophysics*, 361, 175-188. <https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0007091>
- Miller, J. M. (2007). "Relativistic X-ray lines from the inner accretion disks around black holes". *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 45, 441-479. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.45.051806.110555>
- Mirabel, I. F., & Rodríguez, L. F. (1994). "A superluminal source in the Galaxy". *Nature*, 371, 46-48. <https://doi.org/10.1038/371046a0>
- Mitsuda, K., Inoue, H., Koyama, K., Makishima, K., Matsuoka, M., Ogawara, Y., Suzuki, K., Tanaka, Y., Shibazaki, N., & Hirano, T. (1984). "Energy spectra of low-mass binary X-ray sources observed from TENMA". *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 36, 741-759.
- Miyamoto, S., Kitamoto, S., Iga, S., Negoro, H., & Terada, K. (1992). "Canonical time variations of X-rays from black hole candidates in the low-intensity state". *The Astrophysical Journal*, 391, L21. <https://doi.org/10.1086/186389>
- Motta, S. E. (2016). "Quasi periodic oscillations in black hole binaries". *Astronomische Nachrichten*, 337, 398. <https://doi.org/10.1002/asna.201612320>
- Muñoz-Darias, T., Casares, J., Sánchez, D. M., Fender, R. P., Padilla, M. A., Linares, M., Ponti, G., Charles, P. A., Mooley, K. P., & Rodríguez, J. (2016). "Regulation of black-hole accretion by a disk wind during a violent outburst of V404 Cygni". *Nature*, 534, 75-78. <https://doi.org/10.1038/nature17446>
- Muñoz-Darias, T., Fender, R. P., Motta, S. E., & Belloni, T. M. (2014). "Black hole-like hysteresis and accretion states in neutron star low-mass X-ray binaries". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 443, 3270-3283. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu1334>
- Narayan, R., & Heyl, J. S. (2002). "On the Lack of Type I X-Ray Bursts in Black Hole X-Ray Binaries: Evidence for the Event Horizon?". *The Astrophysical Journal*, 574, L139-L142. <https://doi.org/10.1086/342502>
- Narayan, R., McClintock, J. E., & Yi, I. (1996). "A New Model for Black Hole Soft X-Ray Transients in Quiescence". *The Astrophysical Journal*, 457, 821. <https://doi.org/10.1086/176777>
- Narayan, R., & Yi, I. (1994). "Advection-dominated accretion: A self-similar solution". *The Astrophysical Journal*, 428, L13. <https://doi.org/10.1086/187381>
- Narayan, R., & Yi, I. (1995). "Advection-dominated Accretion: Underfed Black Holes and Neutron Stars". *The Astrophysical Journal*, 452, 710. <https://doi.org/10.1086/176343>
- Nixon, C., & Salvesen, G. (2014). "A physical model for state transitions in black hole X-ray binaries". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437, 3994-3999. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt2215>
- Petrucchi, P. O., Ferreira, J., Henri, G., & Pelletier, G. (2008). "The role of the disc magnetization on the hysteresis behaviour of X-ray binaries". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 385, L88-L92. <https://doi.org/10.1111/j.1745->

- Plant, D. S.; Fender, R. P.; Ponti, G.; Muñoz-Darias, T.; Coriat, M. (2014). "Revealing accretion on to black holes: X-ray reflection throughout three outbursts of GX 339-4". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442, 1767-1785. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu867>
- Plotkin, R. M., Gallo, E., & Jonker, P. G. (2013). "The X-ray spectral evolution of galactic black hole X-ray binaries toward quiescence". *Astrophysical Journal*, 773, 59. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/773/1/59>
- Porter, J. M., & Rivinius, T. (2003). "Classical Be Stars". *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115, 1153-1170. <https://doi.org/10.1086/378307>
- Poutanen, J., & Svensson, R. (1996). "The Two-Phase Pair Corona Model for Active Galactic Nuclei and X-Ray Binaries: How to Obtain Exact Solutions". *The Astrophysical Journal*, 470, 249. <https://doi.org/10.1086/177865>
- Psaltis, D. (2006). "Accreting neutron stars and black holes: a decade of discoveries". *Compact stellar X-ray sources*, 39, 1-38. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006csxs.book....1P>
- Qiao, E., & Liu, B. F. (2018). "The advection-dominated accretion flow for the origin of the thermal soft X-ray component in low-level accreting neutron stars". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481, 938-946. <https://doi.org/10.1093/MNRAS/STY2337>
- Qiao, E., & Liu, B. F. (2020). "The advection-dominated accretion flow for the anticorrelation between the X-ray photon index and the X-ray luminosity in neutron star low-mass X-ray binaries". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 496, 2704-2714. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa1671>
- Qiao, E., & Liu, B. F. (2021). "The radiative efficiency of neutron stars at low-level accretion". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 502, 3870-3878. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab227>
- Rees, M. J., Begelman, M. C., Blandford, R. D., & Phinney, E. S. (1982). "Ion-supported tori and the origin of radio jets". *Nature*, 295, 17-21. <https://doi.org/10.1038/295017a0>
- Reig, P. (2011). "Be/X-ray binaries". In *Astrophysics and Space Science*, 332, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s10509-010-0575-8>
- Remillard, R. A., Lin, D., Cooper, R. L., & Narayan, R. (2006b). "The Rates of Type I X-Ray Bursts from Transients Observed with RXTE: Evidence for Black Hole Event Horizons". *The Astrophysical Journal*, 646, 407-419. <https://doi.org/10.1086/504862>
- Remillard, R. A., & McClintock, J. E. (2006). "X-ray properties of black-hole binaries". *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 44, 49-92. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.44.051905.092532>
- Reynolds, M. T.; Reis, R. C.; Miller, Jon M.; Cackett, Edward M.; Degenaar, N. (2014). "The quiescent X-ray spectrum of accreting black holes". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441, 3656-3665. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu832>
- Rutledge, R. E., Bildsten, L., Brown, E. F., Pavlov, G. G., & Zavlin, V. E. (2001). "The Quiescent X-Ray Spectrum of the Neutron Star in Centaurus X-4 Observed with

- Chandra /ACIS-S". The Astrophysical Journal, 551, 921-928. <https://doi.org/10.1086/320247>
- Rutledge, R. E., Bildsten, L., Brown, E. F., Pavlov, G. G., & Zavlin, V. E. (2002). "Variable Thermal Emission from Aquila X-1 in Quiescence". The Astrophysical Journal, 577, 346-358. <https://doi.org/10.1086/342155>
- Rybicki, G. B., & Lightman, A. P. (1985). Radiative Processes in Astrophysics. 70, 451. <https://doi.org/10.1002/9783527618170>
- Shahbaz, T., Casares, J., Azquez, V. E. L., & Noz, T. M. U. (2018). "X-ray Emission from Black-Hole and Neutron-Star Binaries". High Time-Resolution Astrophysics, 97–132. <https://doi.org/10.1017/9781316831984.005>
- Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. (1973). "Black holes in binary systems. Observational appearance". In Astronomy and Astrophysics, 500, 33-51.
- Shapiro, S. L and Lightman, A. (1976). P., Eardley, DM, 1976. ApJ, 204, 187.
- Slettebak, A. (1988). "The Be stars". Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 100, 770. <https://doi.org/10.1086/132234>
- Sonbas, E., Dhuga, K. S., & Göğüş, E. (2018). "A study of low-mass x-ray binaries in the low-luminosity regime". The Astrophysical Journal, 853, 150 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaa29f>
- Sonbas, E., Mohamed, K., Dhuga, K. S., & Göğüş, E. (2022). "A temporal scale to track the spectral transitions in low-mass X-ray binaries". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 511, 2535-2543. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab3352>
- Sonbas, E., Mohamed, K., Dhuga, K. S., Tuncer, A., & Göğüş, E. (2020). "A minimal time-scale for the spectral states of GX 339-4". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 499, 2513-2522. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa2923>
- Steiner, J. F., Narayan, R., McClintock, J. E., & Ebisawa, K. (2009). "A Simple Comptonization Model". Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 121, 1279. <https://doi.org/10.1086/648535>
- Stiele, H., Motta, S., Muñoz-Darias, T., & Belloni, T. M. (2011). "Spectral properties of transitions between soft and hard states in GX 339-4". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 418, 1746-1752. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19616.x>
- Strohmayer, T. E., Zhang, W., Swank, J. H., Smale, A., Titarchuk, L., Day, C., & Lee, U. (1996). "Millisecond X-Ray Variability from an Accreting Neutron Star System". The Astrophysical Journal, 469, L9. <https://doi.org/10.1086/310261>
- Sunyaev, R. A., & Titarchuk, L. G. (1984). "Comptonization of low-frequency radiation in accretion disks: Angular distribution and polarization of hard X-ray radiation". Advances in Space Research, 3, 10–12. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(84\)90099-1](https://doi.org/10.1016/0273-1177(84)90099-1)
- Sunyaev, R. A., & Trümper, J. (1979). "Hard X-ray spectrum of Cyg X-1". In Nature Vol. 279, 506-508. <https://doi.org/10.1038/279506a0>
- Sunyaev, R., & Titarchuk, L. (1980). "Comptonization of X-rays in plasma clouds - Typical radiation spectra". Astronomy and Astrophysics, 86, 121.

- Tetarenko, B. E., Sivakoff, G. R., Heinke, C. O., & Gladstone, J. C. (2016). "WATCHDOG: A COMPREHENSIVE ALL-SKY DATABASE OF GALACTIC BLACK HOLE X-RAY BINARIES". *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 222, 15. <https://doi.org/10.3847/0067-0049/222/2/15>
- Titarchuk, L. (1994). "Generalized Comptonization models and application to the recent high-energy observations". *The Astrophysical Journal*, 434, 570. <https://doi.org/10.1086/174760>
- Tomsick, J. A., Gelino, D. M., Halpern, J. P., & Kaaret, P. (2004). The Low Quiescent X-Ray Luminosity of the Neutron Star Transient XTE J2123–058. *The Astrophysical Journal*, 610, 933-940. <https://doi.org/10.1086/421865>
- Turolla, R., Zane, S., & Titarchuk, L. (2002). "Power-Law Tails from Dynamical Comptonization in Converging Flows". *The Astrophysical Journal*, 576, 349-356. <https://doi.org/10.1086/341631>
- Uttley, P., & Klein-Wolt, M. (2015). "The remarkable timing properties of a ‘hypersoft’ state in GRO J1655-40". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451, 475–485. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv978>
- van der Klis, M. (2006). "Overview of QPOs in neutron-star low-mass X-ray binaries". *Advances in Space Research*, 38, 2675-2679. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.11.026>
- van der Klis, M. (2000). "Millisecond oscillations in x-ray binaries". *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 38, 717-760. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.38.1.717>
- van der Klis, M., Swank, J. H., Zhang, W., Jahoda, K., Morgan, E. H., Lewin, W. H. G., Vaughan, B., & van Paradijs, J. (1996). "Discovery of Submillisecond Quasi-periodic Oscillations in the X-Ray Flux of Scorpius X-1". *The Astrophysical Journal*, 469, L1. <https://doi.org/10.1086/310251>
- Van Paradijs, J. & McClintock, J. E., (1995). "Optical and ultraviolet observations of X-ray binaries". *X-ray binaries*, p. 58 - 125. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1995xrbi.nasa...58V>
- Waterhouse, A. C., Degenaar, N., Wijnands, R., Brown, E. F., Miller, J. M., Altamirano, D., & Linares, M. (2016). "Constraining the properties of neutron star crusts with the transient low-mass X-ray binary Aql X-1". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 456, 4001-4014. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2959>
- Wijnands, R., Degenaar, N., Armas Padilla, M., Altamirano, D., Cavecchi, Y., Linares, M., Bahramian, A., & Heinke, C. O. (2015). "Low-level accretion in neutron star X-ray binaries". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454, 1371-1386. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv1974>
- Wijnands, R., In 't Zand, J. J. M., Rupen, M., Maccarone, T., Homan, J., Cornelisse, R., Fender, R., Grindlay, J., Van Der Klis, M., Kuulkers, E., Markwardt, C. B., Miller-Jones, J. C. A., & Wang, Q. D. (2006). "The XMM-Newton/Chandra monitoring campaign of the Galactic center region Description of the program and preliminary results". *Astronomy and Astrophysics*, 449, 1117-1127. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20054129>
- Wijnands, Rudy, Heinke, C. O., Pooley, D., Edmonds, P. D., Lewin, W. H. G., Grindlay, J.

- E., Jonker, P. G., & Miller, J. M. (2005). "The Hard Quiescent Spectrum of the Neutron Star X-Ray Transient EXO 1745–248 in the Globular Cluster Terzan 5". *The Astrophysical Journal*, 618, 883-890. <https://doi.org/10.1086/426127>
- Wijnands, Rudy, Homan, J., Miller, J. M., & Lewin, W. H. G. (2004). "Monitoring Chandra Observations of the Quasi-persistent Neutron Star X-Ray Transient MXB 1659-29 in Quiescence: The Cooling Curve of the Heated Neutron Star Crust". *The Astrophysical Journal*, 606, L61-L64. <https://doi.org/10.1086/421081>
- Wu, Q., & Gu, M. (2008). "The X-Ray Spectral Evolution in X-Ray Binaries and Its Application to Constrain the Black Hole Mass of Ultraluminous X-Ray Sources". *The Astrophysical Journal*, 682, 212-217. <https://doi.org/10.1086/588187>
- Yang, Q. X., Xie, F. G., Yuan, F., Zdziarski, A. A., Gierliński, M., Ho, L. C., & Yu, Z. (2015). "Correlation between the photon index and X-ray luminosity of black hole X-ray binaries and active galactic nuclei: Observations and interpretation". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 447, 1692-1704. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu2571>
- Yuan, F., & Narayan, R. (2014). "Hot accretion flows around black holes". In *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 52, 529-588. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082812-141003>
- Zampieri, L., Turolla, R., Zane, S., and Treves, A. (1995). "X-Ray Spectra from Neutron Stars Accreting at Low Rates". *The Astrophysical Journal*, 439, 849. <https://doi.org/10.1086/175223>
- Zdziarski, A. A., & Gierliński, M. (2004). "Radiative processes, spectral states and variability of black-hole binaries". In *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 155, 99-119. <https://doi.org/10.1143/PTPS.155.99>
- Zdziarski, A. A., Poutanen, J., Paciesas, W. S., & Wen, L. (2002). "Understanding the Long-Term Spectral Variability of Cygnus X-1 with Burst and Transient Source Experiment and All-Sky Monitor Observations". *The Astrophysical Journal*, 578, 357-373. <https://doi.org/10.1086/342402>