



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



SİMBİYOTİK YILDIZLARIN DİSK, JET VE YÜZEY YAPILARININ EVRİMİ

Doktora Tezi

Melis YARDIMCI

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

İzmir
2022

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

SİMBİYOTİK YILDIZLARIN DİSK, JET VE YÜZEY YAPILARININ EVRİMİ

Melis YARDIMCI

Danışman: Prof. Dr. Belinda KALOMENİ

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı
Astrofizik Doktora Programı

İzmir

2022

Melis YARDIMCI tarafından Doktora Tezi olarak sunulan “Simbiyotik Yıldızların Disk, Jet ve Yüzey Yapılarının Evrimi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 23/12/2022 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri üyeleri

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Tansel AK

Raportör Üye : Prof. Dr. Belinda KALOMENİ

Üye : Prof. Dr. Selim Osman SELAM

Üye : Prof. Dr. Varol KESKİN

Üye : Prof. Dr. Ömer Lütfi DEĞİRMENCİ

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Simbiyotik Yıldızların Disk, Jet ve Yüzey Yapılarının Evrimi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

23/12/2022

Melis Yardımcı

ÖZET

SİMBİYOTİK YILDIZLARIN DİSK, JET VE YÜZEY
YAPILARININ EVRİMİ

YARDIMCI, Melis

Doktora Tezi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Belinda KALOMENİ

Aralık 2022, 126 sayfa

Simbiyotik sistemler büyük yörünge ayrıklığına sahip sıcak ve soğuk bileşen barındıran çift yıldız sistemleridir. Sıcak bileşen çoğunlukla bir beyaz cücedir. Evrimleşmiş dev yıldız olan soğuk bileşen, beyaz cüce üzerine çeşitli yollarla madde aktarımı gerçekleştirir. Simbiyotik yıldızlar, sistemi çevreleyen gaz-toz, yıldız rüzgârları, toplanma diski ve jet/jet benzeri madde çıkışları gibi karmaşık fiziksel yapıları bir arada barındıran astrofiziksel laboratuvarlardır. Bu sayede, elektromanyetik tayfın radyo bölgesinden gamma ışınlarına kadar geniş bir aralığı boyunca gözlemsel olarak çalışma olanağı sağlarlar.

Bu çalışma için seçilen simbiyotik yıldızlar, AG Dra, AX Per, CH Cyg, CI Cyg ve Z And sistemleridir. Seçilen sistemlerin optik bölgede gözlemleri yapılmış ve uzun dönemli ışık değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, *XMM-Newton* ve *Swift* teleskoplarının veri arşivindeki gözlemleri analiz edilmiştir.

Simbiyotik sistemlerin yaklaşık %10'u çift kutuplu (bipolar) jet ve jet benzeri yapılar göstermektedir. Bu yapılar genellikle bükük (C- ya da S-şekilli) madde/plazma akışları şeklindedir. Bu çalışmada bükük jet çıkışları için nümerik çözümler gerçekleştirilmiştir.

Anahtar sözcükler: çift yıldızlar, simbiyotik yıldızlar, toplanma diskleri, jet yapıları, X-ışınlar, nümerik çözümler.

ABSTRACT

THE EVOLUTION OF DISK, JET, AND SURFACE STRUCTURES OF SYMBIOTIC STARS

YARDIMCI, Melis

PhD in Department of Astronomy and Space Sciences

Supervisor: Prof. Dr. Belinda KALOMENI

Aralık 2022, 126 pages

Symbiotic stars are binary systems hosting a hot and a cool component in a widely separated orbit. In general, the hot component is a white dwarf. Mass transfer from the evolved cooler red giant component to the white dwarf through different mechanisms can occur in these systems. Symbiotic stars are the astrophysical laboratory hosting several complex structures which are gas and dust surrounding the system, stellar winds, accretion disk and jet/jet-like outflows. In this way, these systems allow us to study them from radio to gamma-rays in the electromagnetic spectrum.

Symbiotic stars we choose to study in this thesis were AG Dra, AX Per, CH Cyg, CI Cyg and Z And. Optical band photometric observations of these selected systems are obtained and studied for their long-term light variations. X-ray archival data from *XMM-Newton* and *Swift* telescopes are also analysed.

About 10% of symbiotic systems show jet and jet-like structures. These structures are generally bent (C- and S-shaped) matter/plasma outflows. In this study, we performed some numerical simulations for these bent jet structures.

Keywords: binary stars, symbiotic stars, accretion disk, jet structures, X-rays, numerical simulations.

ÖNSÖZ

Simbiyotik yıldızlarda son zamanlarda elde edilen bilgiler, yeni keşfedilen ve aday olan simbiyotik yıldız sayısının artması, bu sistemlerde yeni bulgular ortaya koymakta ve açık problemleri artırmaktadır. Sistemlerin uzun döneme sahip olması, görece uzun gözlem süreleri gerektirse de optik ve X-ışın tayfindaki tuhaf davranışları nedeniyle oldukça ilgi çekmektedirler. Simbiyotik yıldızlar ayırık/yarı-ayırık etkileşen çift sistemlerin çalışılması açısından da önem taşımaktadır. Sistemi oluşturan yıldızların ayrıklığının fazla olması yıldız rüzgârları, toplanma diski, sistemi saran gaz-toz yapı ve/veya jet gibi birçok astrofiziksel süreci ayrıntısıyla araştırma imkanı sunmaktadır.

Bu tür çiftlerde rüzgâr, jet ve disk etkileşimi söz konusudur. Böylece bu sistemlerin nümerik çözümlerinin gerçekleştirilmesi ile bazı temel sorulara ışık tutacağı düşünülmektedir. Bu sorular arasında rüzgâr ve disk etkileşiminin jet oluşumuna ya da ivmelenme sürecine bir etkisinin olup olmadığı sorusu da vardır. Diske sahip çoğu astrofiziksel cisimde (örn., aktif gökada çekirdekleri, kara delikler, X-ışın çiftleri) koşutlanmış madde atımları/jetler belirlenmiştir. Ancak kataklizmik değişen yıldızlar ve simbiyotik yıldızlar diske sahip olmalarına rağmen çoğunluğunda jet yapılarının görülmemesinin nedeni hala gizemini saklamaktadır.

Tez konum sayesinde, bu ilgi çekici sistemlerle tanışarak onları birçok açıdan inceleyebilme ve X-ışın davranışlarını anlamak ve karmaşık fiziksel yapılarının simülasyonlarını gerçekleştirmek için nümerik çözüm gibi birçok yöntem deneyimleme ve öğrenme fırsatı yakaladım.

İZMİR

23/12/2022

Melis Yardımcı

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇ KAPAK	i
KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
TABLolar DİZİNİ	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxiii
1 GİRİŞ	1
2 SİMBİYOTİK YILDIZLAR	3
2.1 Tarihçe	3
2.2 Madde Transfer Süreçleri	4
2.3 Toplanma Diski	6
2.4 Kırmızı Dev Bileşen	7
2.5 Madde Çıkış Süreçleri	8
2.5.1 Yıldız Rüzgârları	8
2.5.2 Jet ve Jet Benzeri Yapılar	9
2.6 Optik Patlamalar ve Flickering	13
2.7 Simbiyotik Yıldızlarda X-Işın	14
2.8 Simbiyotik Sistemlerin X-ışın Sınıflandırması	16
3 SİMBİYOTİK YILDIZLARIN OPTİK VE X-IŞIN GÖZLEMLERİ	19
3.1 TUG Gözlemleri	19
3.2 X-ışın Görevleri	19
3.2.1 XMM-Newton	19

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.2.2 Swift	21
3.3 XMM-Newton ve Swift Gözlemleri	22
3.4 Tez Kapsamında İncelenen Sistemler	26
3.5 CH Cygni	27
3.5.1 Tarihçe	27
3.5.2 Optik Gözlemleri	30
3.5.3 X-ışın Gözlemleri	35
3.5.3.1 X-ışın Işık Eğrisi	36
3.5.3.2 X-ışın Tayfı	38
3.5.3.3 Üçlü Demir Çizgisi	41
3.5.3.4 RGS Tayfı	42
3.6 CI Cygni	46
3.6.1 Tarihçe	46
3.6.2 Optik Gözlemler	48
3.6.3 X-ışın Gözlemleri	51
3.7 Z Andromedae	53
3.7.1 Tarihçe	53
3.7.2 Optik Gözlemleri	55
3.7.3 X-ışın Gözlemleri	59
3.8 AX Persei	63
3.8.1 Tarihçe	63
3.8.2 Optik Gözlemleri	66
3.8.3 X-ışın Gözlemleri	70
3.9 AG Draconis	70
3.9.1 Tarihçe	70
3.9.2 Optik Gözlemleri	72
3.9.3 X-ışın Gözlemleri	76

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4	SİMBİYOTİK YILDIZLARIN NÜMERİK ÇÖZÜMLERİ	81
4.1	PLUTO Kodu	82
4.2	Bükük Jet Yapı Simülasyonları	85
4.2.1	Simülasyon Kurulumu ve Sınırları	85
4.2.2	Hesaplama Alanı	86
4.2.3	Başlangıç Koşulları	87
4.2.4	Yörünge Hareketinde Jet Simülasyonları	88
4.2.5	Jet Presesyon Simülasyonları	89
4.2.6	Normalizasyon	90
4.3	Jet ve Yıldız Rüzgârları Etkileşim Simülasyonları	91
4.4	Simülasyon Sonuçları	94
5	SONUÇ	95
6	TARTIŞMA	99
	KAYNAKLAR DİZİNİ	103
	TEŞEKKÜR	125
	ÖZGEÇMİŞ	126

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Simbiyotik yıldızlarda beyaz cüce etrafında maddenin toplanması .	4
2.2 R Aqr ve CH Cyg sistemlerinin bükük jet yapıları	10
2.3 Z And yıldızının sakin ve aktif evredeki uzun dönemli ışık değişimi .	13
2.4 Simbiyotik sistemlerin X-ışın sınıflamasında salma tayfı davranışları	17
3.1 CH Cyg sisteminin <i>Swift</i> /XRT WT ve PC modlarındaki alan görüntüleri	21
3.2 <i>Swift</i> gözlemlerinde farklı grup değerleri ile uygulanan model uyumlama denemeleri	24
3.3 En uygun grup değeri elde edildikten sonra oluşturulan üst üste çizdirilmiş model tayfları	25
3.4 CH Cyg'nin TUG T60 verileri ile elde edilmiş uzun zaman aralıklı ışık değişimi	31
3.5 Büyük parlama sonrası belli dönemlerde gerçekleşen küçük genlikli parlamalar	31
3.6 CH Cyg'nin TUG T60 gözlemlerinin U bandı ışık değişimi ile $U - B$ ve $B - V$ renk değişimleri	32
3.7 CH Cyg sisteminin gözlem başındaki büyük genlikli parlama ayık- landıktan sonra uygulanan dönem analizi sonucu elde edilen güç tayfı grafikleri	33
3.8 CH Cyg'nin TUG T60 gözlemlerinden üretilen U , B , V ve R bandı için ışık eğrileri	34
3.9 CH Cyg'nin uzun dönemli ışık eğrisine uygulanmış doğrusal sinüs fiti	35
3.10 CH Cyg sisteminin ~ 158 günlük evrelendirilmiş ışık eğrisi	35
3.11 CH Cyg sisteminin <i>XMM-Newton</i> 2018 gözleminin 0.2 – 15 keV bandında X-ışın eğrisi	36

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil	Sayfa
3.12 CH Cyg <i>XMM-Newton</i> 2018 gözleminin farklı enerji aralıklarındaki X-ışın ışık eğrileri	37
3.13 CH Cyg'nin 2018 yılındaki <i>XMM-Newton</i> gözleminin 0.2 – 12 keV aralığındaki güç tayfı grafiği ve elde edilen 68 dk'lık değişim grafiği	37
3.14 CH Cyg'nin <i>XMM-Newton</i> gözleminin modellenen yumuşak X-ışın tayfı	38
3.15 CH Cyg sistemine ait 2018 yılı <i>XMM-Newton</i> tüm enerji bandındaki X-ışın tayfı	40
3.16 CH Cyg'nin demir çizgilerinin model tayfı	41
3.17 CH Cyg'nin Mayıs 2018 <i>XMM-Newton</i> RGS tayfı	43
3.18 CH Cyg sisteminin farklı zamanlarda alınmış <i>Swift</i> X-ışın tayflarındaki 3 farklı davranışı	45
3.19 CI Cyg'nin TUG T60 verileri ile elde edilen uzun zaman aralıklı ışık değişimi	48
3.20 CI Cyg sisteminin <i>U</i> bandı ışık değişimi ile $U - B$ ve $B - V$ renk değişimleri	49
3.21 CI Cyg sisteminin TUG T60 verilerinin frekans analizi sonucu elde edilmiş güç tayfları	50
3.22 CI Cyg cisminin yörünge dönemine göre evrelendirilmiş ışık eğrileri	50
3.23 CI Cyg'nin uzun dönemli ışık eğrisine uygulanmış polinom fitleri	51
3.24 CI Cyg sisteminin ~ 71 gün dönem ile elde edilen ışık eğrisi . . .	51
3.25 CI Cyg sisteminin <i>Swift</i> tarafından yapılmış 00090503002 gözlemine ait X-ışın tayfı	52
3.26 Z And sisteminin TUG T60 verileri ile elde edilmiş uzun dönemli ışık eğrisi	55

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.27 Z And sisteminin U bandı ışık değişimi ile $U - B$ ve $B - V$ renk değişimleri.	56
3.28 Z And sisteminin dönem analizi sonucu elde edilmiş güç tayfları	57
3.29 Z And'ın dönem analizi sonucu elde edilen en baskın dönem değeri ile evrelendirilmiş ışık eğrileri	58
3.30 Z And'ın uzun dönemli ışık eğrisine uygulanmış sinüs fiti	58
3.31 Z And'ın R filtresindeki ~ 398 ve ~ 150 gün dönemlerle evrelendirilmiş ışık eğrileri	59
3.32 Z And <i>XMM-Newton</i> 2001 yılı Ocak ve Haziran gözlemlerine uygulanan model tayfları	59
3.33 Z And sisteminin <i>XMM-Newton</i> Haziran 2010 tarihli X-ışın tayfı	61
3.34 Z And sisteminin bazı <i>Swift</i> gözlemlerine uygulanan X-ışın tayf modelleri	62
3.35 AX Per sisteminin aktif evrede ışık dalgalanması olayı	64
3.36 AX Per sisteminin farklı zamanlarda elde edilmiş parlaklık-evre grafikleri	65
3.37 AX Per'in TUG T60 gözlemlerinden üretilmiş UBVR ışık değişimleri	67
3.38 AX Per'in TUG T60 verileri ile elde edilmiş renk değişimleri . .	67
3.39 AX Per sisteminin dönem analizi sonucu elde edilmiş güç tayfları	68
3.40 AX Per'in 649 günlük dönem değeriyle evrelendirilmiş ışık eğrileri	68
3.41 AX Per'in uzun dönemli ışık eğrisine uygulanmış sinüs fiti . . .	69
3.42 AX Per sisteminin 66 günlük evrelendirilmiş ışık eğrileri	69
3.43 AG Dra'nın X-ışın ve optik bölgedeki ışık değişimleri	71
3.44 AG Dra'nın TUG T60 verileri ile elde edilmiş uzun zaman aralığına dağılmış ışık değişimi	73
3.45 AG Dra'nın TUG T60 verileri ile elde edilmiş renk değişimleri .	74

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.46 AG Dra'nın TUG T60 verilerinin dönem analizi sonucu elde edilmiş güç tayfı grafikleri	75
3.47 AG Dra'nın TUG T60 verileri kullanılarak evrelendirilmiş ışık eğrileri	76
3.48 AG Dra'nın Haziran 2004 tarihli <i>XMM-Newton</i> gözleminin tüm enerji bandında ve yumuşak enerji bandında X-ışın ışık değişimi	77
3.49 AG Dra'nın Haziran 2004 ve 2005 yılı <i>XMM-Newton</i> tayf analizi	78
3.50 AG Dra'nın Ekim 2003 ve Temmuz 2006 gözlemlerinin model tayfı	78
3.51 AG Dra sisteminin Kasım 2003 ve Temmuz 2005 gözlemlerinin X-ışın tayfı	79
4.1 1 boyutta uygulanan farklı grid tasarımları	83
4.2 2 boyutlu koordinat sistemindeki grid ve ghost hücreleri	84
4.3 2 boyutlu kartezyen koordinat sistemindeki sınır durumları ve hesaplama alanının yapısı	86
4.4 Seçilen zaman adımlarında jet akışının yörünge hareketi ile davranışı	88
4.5 Seçilen zaman adımlarında $\alpha_{max} = 30^\circ$ için elde edilen simülasyonlar	90
4.6 Zonklayan yıldız rüzgârının düz jet çıkışına etkisini gösteren simülasyonunun hız haritasının zaman evrimi	93

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 S- ve D-türü simbiyotik sistemlerin bazı özellikleri	8
2.2 Tez kapsamında incelenen sistemlerin soğuk bileşenine ait bazı fiziksel parametreler	8
2.3 Jet gösteren bazı simbiyotik sistemlerin özellikleri	12
3.1 Tez kapsamında seçilen sistemlerin <i>XMM-Newton</i> ve <i>Swift</i> veri tabanlarındaki gözlem sayıları	22
3.2 Tez kapsamında seçilen simbiyotik sistemlere ait bazı bilgiler	26
3.3 CH Cyg sistemine ait 2018 yılı <i>XMM-Newton</i> X-ışın tayf model ve parametreleri	40
3.4 CH Cyg'nin <i>XMM-Newton</i> X-ışın tayfındaki demir salma çizgilerinin merkezi dalga boyu ve eşdeğer genişlikleri	42
3.5 CH Cyg'nin <i>XMM-Newton</i> RGS tayfının çizgi analizi sonucu elde edilen merkezi dalga boyları ve eşdeğer genişlikleri	44
3.6 CH Cyg sistemine ait <i>Swift</i> gözlem verilerinin analizi sonucunda elde edilen bazı parametreler	46
3.7 CI Cyg sisteminin <i>Swift</i> 00090503002 numaralı gözleminin X-ışın tayf analizi sonucunda elde edilen bazı parametreler	53
3.8 Z And sisteminin <i>XMM-Newton</i> gözlemlerinin X-ışın tayf analizleri sonuçları	61
3.9 Z And sistemine ait <i>Swift</i> gözlem verilerinin analizi sonucunda elde edilen bazı parametreler	63
3.10 AG Dra sisteminin <i>XMM-Newton</i> verilerinden elde edilmiş model sonuçları	80
4.1 Yörünge hareketi yapan jet çıkış noktası ile belli bir noktada sabitlenen jet çıkış noktasının kurulumları için jet ve ortam başlangıç değerleri	88

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$M_{\odot}$	Güneş Kütlesi
$R_{\odot}$	Güneş Yarıçapı
$\dot{M}$	Kütle Toplanma Hızı
q	Kütle oranı
M_{dev}	Soğuk Bileşenin Kütlesi
R_{dev}	Soğuk Bileşenin Yarıçapı
L_{dev}	Soğuk Bileşenin Işıtması
M_{WD}	Sıcak Bileşenin Kütlesi
R_{WD}	Sıcak Bileşenin Yarıçapı
L_{WD}	Sıcak Bileşenin Işıtması
F_x	X-ışın Akısı
L_x	X-ışın Işıtması
$P_{yör}$	Sistemin Yörünge Dönemi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler

n_H Galaktik Hidrojen Kolon Yoğunluğu

Γ Foton İndeksi

r_{jet} Jet Yarıçapı

Kısaltmalar Açıklama

SySt Simbiyotik Yıldız/Sistem

CV Katakлизмik Değişen Yıldız

WD White Dwarf (Beyaz Cüce)

L1 noktası Lagrange 1 noktası

RLOF Roche Lobe Overflow (Roche Lobu Taşması)

WRLOF Wind Roche Lobe Overflow (Rüzgârla Roche Lobu Taşması)

HEASARC The High Energy Astrophysics Science
Archive Research Center

SAS Science Analysis System

Xspec X-ışın Tayfı Modelleme Paketi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar

tbabs Tuebingen-Boulder ISM Soğurma Modeli

pcfabs Parçalı Soğurma Modeli

BB Blackbody (Kara Cisim)

mekal Sıcak Plazma Modeli

1 GİRİŞ

Simbiyotik yıldızlar (SySt: Symbiotic Star or System) evrimleşmiş kırmızı dev olan soğuk bileşene ve sıcak bileşene sahip etkileşen çift yıldız sistemleridir. Sıcak bileşen genellikle bir beyaz cücedir ancak literatürde bu bileşenin bir anakol yıldızı (örn. Kenyon and Webbink, 1984; Lü et al., 2006) olabileceği önerilmiş, nadiren nötron yıldız (örn. GX 1+4, Chakrabarty and Roche, 1997) bileşene sahip örnekler de belirlenmiştir (Masetti et al., 2006b). SySt'lerin beyaz cüce kütleleri ortalama $0.53 \pm 0.05 M_{\odot}$ civarındadır (Mikołajewska et al., 2003). Ancak daha büyük kütleli beyaz cüceye sahip simbiyotik sistemlerin (hatta Chandrasekhar kütle sınırına yakın kütleli beyaz cücelerin) tekrarlayan nova (recurrent nova) patlamaları ya da daha güçlü ve sert bölgede X-ışın salması gösterdiği bilinmektedir (örn. RT Cru, Luna and Sokoloski, 2007; RS Oph, Sokoloski et al., 2006b).

SySt'in yörünge dönemleri birkaç yüz günden birkaç on yıl mertebesinde değişmektedir (Belczyński et al., 2000). Sıcak ve evrimleşmiş soğuk bileşen, sistemi çevreleyen gaz ve tozca zengin bulutsu yapı, bileşenler arası madde aktarımı, güçlü yıldız rüzgârları, çift kutuplu jet benzeri yapıları ve bunların birbiri ile etkileşimi sonucu elektromanyetik tayfın neredeyse her bölgesinde izlenebilen farklı türden ışıınım mekanizmalarını inceleme olanağı sunar (Karovska et al., 2010; Skopal et al., 2012; Meng and Han, 2016). Sistem bileşenlerinin ayrıklığının büyük olması bu açıdan yarar sağlar.

Sistemin etrafını çevreleyen yoğun bir gaz ve toz yapısı bulunur. Sistemdeki soğuk bileşen kırmızı devin güçlü yıldız rüzgârları, çifti saran yoğun bulutsu yapıya katkı sağlar. Bu yapı, kırmızı dev yıldızın rüzgârı tarafından iyonlaştırılmıştır. Bunun yanı sıra, beyaz cücenin fotosferi ve/veya disk kaynaklı moröte ışınları, “*simbiyotik bulutsu*”yu ısıtıp iyonlaşmasına neden olabilir. İyonlaşmış gaz yapı yıldızın tayfında mavi sürekliliğin oluşmasına katkı sağlar (Skopal, 2000; Mürset et al., 1991).

Simbiyotik sistemler genelde yumuşak X-ışın kaynağı olarak bilinmektedir (Mürset et al., 1997). Ancak sonraki çalışmalar SySt'lerin sert X-ışın

bölgede de salmalar gösterdiğini ortaya koymuştur (Luna et al., 2013). Sert X-ışın salması gösteren sistemlerin bazıları nötron yıldızı bileşene sahiptir. Nötron yıldızı bileşenine sahip SySt'lerin sakin ve patlama evresinde X-ışın ışıltmaları 10^{32-34} erg s⁻¹ aralığında değişmektedir (Masetti et al., 2002). Ayria, GX 1+4 sistemi patlama evresinde $\sim 10^{37}$ erg s⁻¹ değerlerine ulaşmıştır (Staubert et al., 1995).

SySt'ler, kataklismik değişen yıldızların (CV'ler) geniş ayrıklığa sahip türevleri şeklinde tanımlanabilir (Sokoloski, 2003). Bazı simbiyotik yıldızların soğuk bileşeni Mira benzeri zonklamalar göstermektedir. Simbiyotik yıldızlar kataklismik değişen yıldızlar gibi belli evrelerde patlamalar gösterir. Ancak bu sistemler de CV'ler gibi hala açık problemlere sahiptir ve iyi anlaşılamamıştır. Simbiyotik yıldızları radyodan X-ışına geniş bir tayf aralığında çalışmak yeni patlamaların keşfedilmesi ve sistemlerin doğasının anlaşılması için önemlidir. Ayrıca uzun dönemli optik değişimler bu patlamaların, SySt'lerde görülen jet yapılarının ve patlama-jet-disk etkileşimlerinin anlaşılması açısından önem taşımaktadır.

Kataklismik değişen yıldızların aksine çoğu toplanma yapılarında jet yapıları görülmesi beklenir. Ancak tüm simbiyotik yıldızlarda jet ve benzeri yapılar belirlenememiştir (belirlenen SySt'lerin yaklaşık % 5 – 10 civarı jet ve benzeri yapıları gösterir). Simbiyotik yıldız sistemi olan Z And'da olduğu gibi jet yapısı ışık eğrisinde her zaman görülmeyebilir. Bu durumda beyaz cüceye doğru gerçekleşen toplanma sürecini açıklamak için farklı yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Jet yapıları SySt'lerde genellikle bükük yapılarda belirlenmiştir (Melnikov et al., 2018; Crocker et al., 2002). Bu tür jet yapılarını anlamak jet yapısının devamlılığını anlamak da yardımcı olabilir.

SySt'ler karmaşık astrofiziksel bileşenlere sahiptir. Bu sistemleri bir bütün olarak anlamak için farklı enerji aralıklarında araştırılmaları gerekir. Bu nedenle tez kapsamında seçilen sistemlerin hem optik hem de X-ışın gözlemleri çalışılmıştır. Böylece sistemler farklı enerji aralıklarında tanınmaya çalışılmış ve simülasyon çalışmaları için zemin hazırlanmıştır.

2 SİMBİYOTİK YILDIZLAR

2.1 Tarihçe

Simbiyotik yıldızların keşfi değişen yıldızların tayflarının incelenmesiyle gerçekleşmiştir. Fleming and Pickering (1912) “*tuhaf tayflı yıldızlar*”ın geniş bir listesini oluşturmuş ve uzun dönemli değişen grubunda yer alan kırmızı değişenler birçok astronomun ilgisini çekmiştir. Uzun dönemli kırmızı değişenlerin bazılarının farklı tayf özellikleri göstermesi Cannon and Pickering (1914) tarafından fark edilmiş ve parlak H I ve He II çizgileri gösteren bu kırmızı değişenleri ayırmıştır. Bu grubun içinde simbiyotik yıldızlar olan Z Andromedae (Z And) ve SY Muscae (SY Mus) sistemleri de yer almaktadır. Plaskett (1928), Z And simbiyotik sistemi için yaptığı çalışmasında 2 ayrı ışık kaynağının varlığına işaret eden çizgi yapıları keşfetmiştir; i) dar Fe II, Ti II ve diğer iyonlaşmış metal çizgileri ile ilişkili yıldızıl kaynak ve ii) He II, N III ve [O III] geniş salma çizgileri gösteren gaz-toz kaynağı. Merrill and Humason (1932) bu tayf kombinasyonuna sahip 3 yeni yıldız keşfetmiştir: CI Cygni (CI Cyg), RW Hydrae (RW Hya) ve AX Persei (AX Per). Bu sistemler, TiO bantlarının yanı sıra He II 4686 salma çizgisi gösterirler. He II 4686 salma çizgileri, M4 tayf türünden dev yıldızların göstergesidir. Ayrıca Balmer çizgileri oldukça güçlü, [O III] ve [Ne III] gibi bulutsu çizgileri oldukça baskındır. Genel olarak tanımlarsak SySt’lerin tayfında TiO soğurma bantları, güçlü H I ve He II salma çizgileri belirleyici rol oynayan çizgilerdir (Kenyon, 1986). Ancak bu sistemlerin hangi evrede (sakin ya da patlama evresi) olduklarına bağlı olarak çizgi baskınlıkları değişebilir (Bkz. Sokoloski et al., 2006a; Baella et al., 2013).

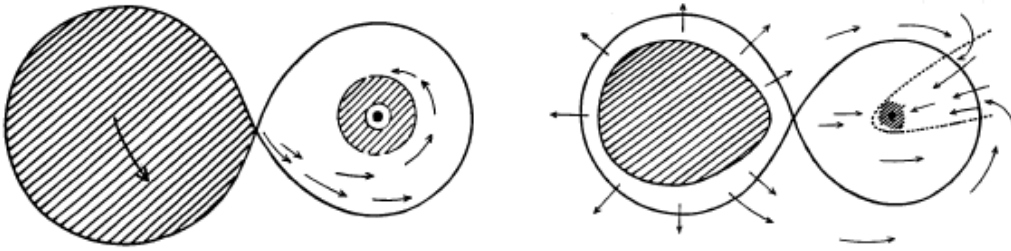
Cisimlerin “*simbiyotik yıldızlar*” olarak isimlendirilmesi Merrill tarafından 1958 yılında yapılmıştır (Merrill, 1958). Hem soğuk bileşen hem de sıcak bileşen tayfını veren simbiyotik yıldızlar üzerine çalışmalar gün geçtikçe artmıştır. Bilinen simbiyotik sistemlerin sayısı 2000 yılında yaklaşık 200 civarındayken, tüm gökyüzü tarama görevleri sayesinde (WISE, 2MASS vb.) bu sayı 20 yıl içinde neredeyse 2 katına çıkmıştır (Bkz. Akas et al., 2019;

Belczyński et al., 2000).

Tipik bir beyaz cücenin yüzey manyetik alan şiddeti birkaç $10^6 - 10^8$ G aralığındadır (Bond and Chanmugam, 1982). Optik bölgede ya da X-ışın salmalarında görülen eşvreli (coherent) salınımlar CV'lerde ya da X-ışın kaynaklarında belirlenen manyetik toplanmaya ilişkin en güvenilir işaretlerden biridir. Manyetik alan yoluyla toplanma, sıkışık cisim yüzeyinde sıcak lekenin oluşmasına neden olur. Dönen toplanma kolonunun ürettiği X-ışınları, diski ve/veya yıldız yüzeyini aydınlatarak dönemli parlamalar meydana getirir. Böylece beyaz cücenin dönme dönemi belirlenebilir. Ancak güçlü manyetik alan şiddetine sahip olduğu optik değişimlerle belirlenen tek simbiyotik sistem Z And'dır (Sokoloski and Bildsten, 1999).

2.2 Madde Transfer Süreçleri

Simbiyotik yıldızlarda, beyaz cüce etrafındaki diske madde transferi iki yolla gerçekleşmektedir (Bkz. Şekil 2.1); i) dev yıldızın Roche lobunu doldurup Lagrange 1 (L1) noktasından madde transferi (Paczynski, 1971) ve/veya, ii) kırmızı dev yıldızdan gelen rüzgârlarla madde transferi (Theuns and Jorissen, 1993). Kütle transfer mekanizması kırmızı devin bulunduğu evrim aşamasına bağlı olarak değişebilir.



Şekil 2.1: Simbiyotik yıldızlarda beyaz cüce etrafında maddenin toplanması; (solda) dev yıldızın Roche lobunu doldurması sonucu beyaz cüce üzerine madde transferi ve (sağda) şiddetli rüzgârlara sahip dev yıldızdan uzaya yayılan maddenin beyaz cücenin kütle çekimine kapılması sonucu beyaz cüce üzerine madde transferi temsil edilmektedir (Gleißner, 2004).

Simbiyotik sistemlerde baskın madde transferinin dev yıldızın rüz-

gârları ile gerçekleştiği önerilmiştir (Bondi and Hoyle, 1944). Ancak bazı SySt’lerin jet yapıları ve yumuşak X-ışın bölgesinde salmalar göstermesi, kütle kaybındaki baskın sürecin Roche lobu taşması (Roche Lobe Overflow - RLOF) aşama-sındaki bir toplanma diskinin varlığına işaret etmektedir. Gazın güçlü bir şekilde koşutlanarak madde atımı göstermesi toplanma diskinin varlığına uygun düşmektedir; diğer bir deyişle, tek başına yıldız rüzgârının madde transferinde rol oynaması gazın koşutlanmasında yetersiz kalacaktır (Kafatos, 1996).

Mohamed and Podsiadlowski (2007) simbiyotik yıldızlar gibi büyük ayrıklıklara sahip sistemler için “*rüzgârla Roche lobu taşması*” (Wind Roche Lobe Overflow - WRLOF) mekanizmasını önermiştir. Bu mekanizmada Roche lobunu dolduran madde yıldızın kendisinden çok, yoğun ve yavaş yıldız rüzgârlarıdır. Roche lobunu dolduran madde böylece L1 noktasından beyaz cüce üzerine transfer olur. WRLOF daha çok ekvator düzleminde bir madde çıkışı önerir ve böylece sistemin etrafında bipolar bulutsu yapılarının oluşmasına imkan verir (Mohamed et al., 2015). Hidrodinamik model, bu mekanizmadaki kütle transfer hızının Bondi-Hoyle-Lyttleton rüzgâr toplanmasından daha güçlü olduğunu göstermiştir. Diğer bir deyişle, jet gibi koşutlanmış madde atımlarının oluşması için yeterli toplanma hızları sunabilir.

Tutukov and Iungelson (1976) ve Paczynski and Rudak (1980) bazı simbiyotik yıldızlarda soğuk bileşenden beyaz cüce üzerine düşen maddenin kararlı hidrojen (H) yanması gerçekleştirdiğini ileri sürmüşlerdir. hidrojen zengin maddenin birikmesi ile “*outburst*¹” (patlama ya da parlama) gerçekleşir. Daha sonra gözlemlerle bu durum desteklenmiştir (Munari and Buson, 1994; Sokoloski, 2003). Kararlı hidrojen yanması ve etrafındaki küçük bir zarfın olması kütle toplanma hızlarında bazı durumları gerektirir (Bkz. Kenyon, 1986, Bölüm 4). Kararlı yanmanın sürekliliğinin devam etmesi için gereken minimum

¹Outburst, ışık eğrilerinde görülen parlaklık artışıdır. Beyaz cüce ve/veya yoldaş bileşendeki bazı kararsızlıklar sonucu oluşabilir. Bu süreçlere örnek olarak, beyaz cüce üzerindeki termonükleer patlamalar (Paczynski and Zytkov, 1978), yoldaş bileşendeki dinamik kararsızlıklar (Paczyński, 1965) vb. verilebilir.

miktarda toplanma hızının artmasıyla yanan zarf genişlemeye başlayacaktır (bunun sonucunda fotosfer soğuyacaktır). Böylece patlama sırasında fotosferin yayınladığı ışımının enerji aralığı uzak moröteden optik bölgelere kayacaktır.

Beyaz cüceye doğru gerçekleşen toplanma hızının artması, ya soğuk bileşenin sistem dışına kütle kaybının ya da toplanma diskine doğru düşen kütle miktarının artmasıyla gerçekleşir (örn. Sokoloski et al., 2006a)

2.3 Toplanma Diski

Bazı simbiyotik sistemlerin ışık eğrilerinde görülen superhump yapıları² çiftlerin doğasını anlama açısından önemlidir. Katakлизмik değişen yıldızların superhump yapıları diskin presesyon yapması ile açıklanabilir (Whitehurst, 1988). Ancak simbiyotik sistemlerin çoğunda sıcak yoldaş bileşenin etrafında gezegenimsi bulutsu yapılar bulunurken bazı sistemler parlak toplanma diskine sahiptir. Mikolajewska and Kenyon (1992) CI Cyg ve AX Per'in optik ve moröte gözlemleri ile disk varlığına dikkat çekmektedir.

Yörünge ayrıklıkları çok fazla olan simbiyotik yıldızların toplanma disk büyüklüğü, CV'lerinkinden ~ 10 kat daha fazladır. Bu tür disklerin çoğunlukla da dış bölgeleri kararsızdır (Duschl, 1986). Dış bölgeler çok soğuk olduğundan maddeyi verimli taşıyamaz ve dış bölgelerde birikmeye sebep olur. Bu durum ısısal viskoz kararsızlığın başlamasına kadar devam eder.

Eğer disk eğri ise diske çarpan maddenin oluşturduğu sıcak leke (hot spot) beyaz cüceye yakın olacaktır. Bunun sonucunda sıcak lekenin rezonans yarıçapı yörünge yarıçapından küçük olacağından disk ters (retrograde) yönde bir devinim gerçekleştirecektir. Bu durum manyetik olmayan CV'lerin ışık eğrilerinde görülmüş ve negatif superhumplarla belirlenmiştir (ayrıntılar için Bkz. Hellier, 2001). Eğik diskte sıcak leke beyaz cüce yüzeyini her yörüngede iki defa etkileyecektir. Ancak simbiyotik sistemlerin yörünge dönemleri çok uzun

²Genel olarak SU UMa türü cüce novalarda görülen normal parlamalara göre sıklığı az ancak parlama genliği (2-8 kadir) büyük olan ışık eğrilerindeki parlama artışlarıdır. Parlamaların süresi kısa ancak sönümleme dönemi gün ölçeğinden yıl ölçeklerine varmaktadır.

olduğundan bu durumu karşılaştırmak için uzun zaman aralığına yayılmış optik gözlemlere ihtiyaç vardır.

Bileşenler arasındaki ayrıklık fazla olmasına rağmen görece daha yüksek kütleli soğuk bileşenin çekim potansiyeli dış diskin madde yörüngesini etkileyebilir. Eğer öyle ise diskin eliptik biçime sahip olduğu düşünülebilir. Ancak kataklismik değişenlerde superhumpları açıklamak için yapılan hidrodinamik simülasyonlar böyle bir çekim kararsızlığının $q < 0.15$ olan çiftler için mümkün olduğunu göstermiştir (Whitehurst, 1988). Bu durum tartışılırken, simbiyotik yıldızların q değerlerinin genelde 1'den büyük olduğunu unutmamak gerekir.

2.4 Kırmızı Dev Bileşen

SySt'lerin soğuk bileşeni geri tayf türünden evrimleşmiş bir kırmızı devdir. SySt'lerin bir kısmı Roche lobunu dolduran normal veya Mira türü değişim gösteren bir kırmızı dev yıldız olabilir. SySt'lerin kızılöte çalışmaları sonucunda bu sistemler iki sınıfta toplanmıştır. Bu sınıflandırma dev yıldızın türünü belirler: S- (Stellar) türü simbiyotik yıldızlar normal kırmızı dev bileşenine, D- (Dusty) türü ise Mira türü kırmızı dev bileşenine sahiptir. Simbiyotik yıldızların yaklaşık % 80'i S-türü iken, geriye kalan % 20'si D-türü SySt'lerdir. Bu sınıflandırma altındaki SySt'lerin bazı özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Simbiyotik dev bileşenlerin madde kayıp hızlarına bakıldığında izole dev yıldızlara göre daha fazla olduğu görülür (Kenyon et al., 1988). S-türünde kütle transferi iç Lagrange noktasından gerçekleşirken, D-türünde daha çok yıldız rüzgârları ile madde aktarımı gerçekleşir.

Geç tür dev yıldızların X-ışın çalışmaları onların yumuşak X-ışın kaynakları olabilecek türde X-ışın akısına katkı sağladıklarını ortaya koymuştur. X-ışın salmaları optik ile kıyaslandığında X-ışın katkısının $f_x / f_v \lesssim 10^{-5}$ gibi oldukça düşük bir değerde olduğu belirlenmiştir (Vaiana et al., 1981).

Tablo 2.1: S- ve D-türü simbiyotik sistemlerin bazı özellikleri (Leedjärv, 2004).

	S-türü	D-türü
Soğuk Bileşen	normal kırmızı dev	Mira-türü
$P_{yör}$	1 – 15 yıl	$\geq 20 - 100$ yıl
a	birkaç AU	$\geq 10 - 100$ AU
$\dot{M}_{dev} (M_{\odot} \text{ yr}^{-1})$	$\sim 10^{-7}$	$\sim 10^{-5}$
$L_{WD} (L_{\odot})$	$10^2 - 10^3$	10^4
Bulutsu boyu	$\sim 1\text{AU}$	$> 10\text{AU}$
Radyo Gözlemi	$\sim \%10$	çoğu
X-ışın	$\sim \%10$	$\sim \%20$
Flickering	birkaç	belirlenemedi
Jet yapıları	birkaç	sadece R Aqr

Tez kapsamında incelenen simbiyotik sistemlerin kırmızı dev yıldız özellikleri Tablo 2.2’de sunulmuştur. Bu çalışmada incelenen sistemler S-türü SySt’lerdir.

Tablo 2.2: Tez kapsamında incelenen sistemlerin soğuk bileşenine ait bazı fiziksel parametreler (Skopal, 2005). Uzaklıklar Hipparcos ölçümlerinden elde edilen uzaklıklardır.

Sistem Adı	$T_{etkin} (^{\circ}\text{K})$	$R_{dev} (R_{\odot})$	$L_{dev} (L_{\odot})$	d (kpc)
AG Dra	4300	33	360	1.1
AX Per	3400	102	1200	1.73
CH Cyg	2600	370	5600	0.27
CI Cyg	3300	180	3400	2.0
Z And	3400	106	1400	1.5

2.5 Madde Çıkış Süreçleri

2.5.1 Yıldız Rüzgârları

Sistemin kırmızı dev bileşeni güçlü yıldız rüzgârlarına sahiptir (Nussbaumer and Vogel, 1988). Tipik bir soğuk devin rüzgâr hızı $< 100 \text{ km s}^{-1}$ mertebesindedir (Espey and Crowley, 2008). Bu değer, jet hızından çok düşük mertebededir (Bkz. Bölüm 2.5.2).

Beyaz cücenin ısınmı dev yıldız rüzgârlarını iyonlaştırır. Ancak, gözlem ve model akı oranlarının (hem izinli hem de yasaklı çizgilerdeki) bazı tutarsızlıkları sıcak yıldızın da kendine ait yıldız rüzgârı olabileceğini gösterir (Wallerstein et al., 1984; Nussbaumer and Vogel, 1989). Bu nedenle simbiyotik yıldızlarda her iki bileşenden gelen rüzgârların çarpışması gerektiği öne sürülmüştür (Nussbaumer et al., 1995). Böylece yüksek enerjili süreçlerin (jet, toplanma ve diğer yüksek enerjili süreçler) doğası daha tutarlı bir şekilde tartışılmıştır (Kellogg et al., 2007; Stute and Sahai, 2009).

2.5.2 Jet ve Jet Benzeri Yapılar

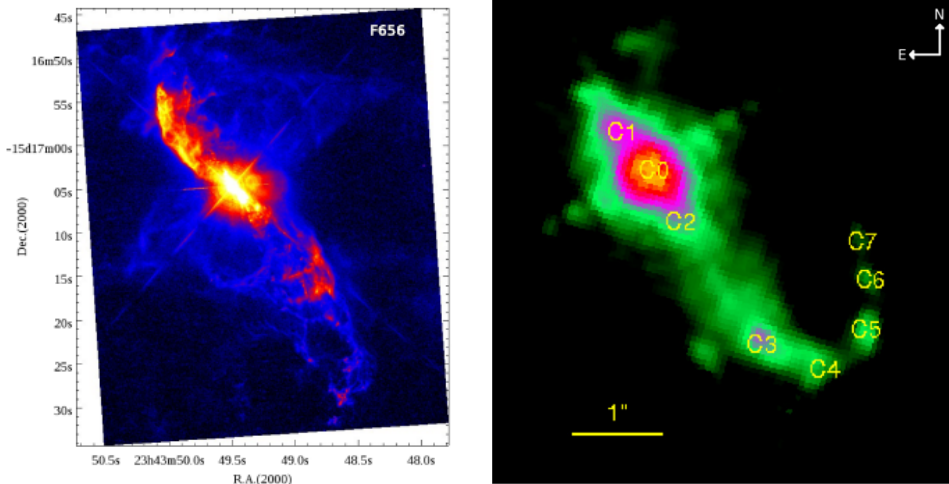
Jet yapıları, diske sahip birçok astrofiziksel nesnede görülmektedir; aktif gökada çekirdekleri (AGNs), X-ışın çiftleri (kara delikler ve nötron yıldızları), genç yıldızimsı cisimler (YSO) vb. Toplanma diskine sahip beyaz cücelerde de jet yapıları belirlenmiştir. Katakлизмik değişen yıldızlarda şimdiye kadar jet yapıları bir iki örnekle kalmışken (Kato and Hachisu, 2003), toplanma diskli beyaz cüceye sahip çok yumuşak (supersoft) X-ışın kaynaklarında (örn. Tomov et al., 1998) ve simbiyotik sistemlerde (Taylor et al., 1986) jet yapıları gözlenmiştir. Ancak simbiyotik sistemlerin jet gösterenleri yaklaşık % 5-10 civarındadır. Her simbiyotik sistemde jet ve benzeri yapıların gözlenememesi/üretilememesi nedeni ile bu sistemlerin araştırılması, diske sahip her astrofiziksel cismin neden jet yapısına sahip olmadığına ışık tutabilir.

Katakлизмik değişen yıldızlarda neden jet yapılarının görülmediğine dair yapılan bir çalışmada jet oluşumu için bir kritik toplanma hızı değeri hesaplanmıştır (Soker and Lasota, 2004). Yapılan modele göre $10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ kritik değerin altındaki sistemlerde jet oluşmayacağı önerilir. Simbiyotik yıldızlarda daha yüksek toplanma hızlarının görülmesi ancak her simbiyotik yıldızda jet yapısının görülmemesi bu önerinin açık bir problemidir.

Yüzeyde gerçekleşen termonükleer patlama süreçleri güçlü koşutlanmış jet yapılarını açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Bu durumda klasik nova sırasında güçlü koşutlanmış madde çıkışları gerçekleşemez (Slavin et al., 1995; Gill and O'Brien, 1998). Nova patlaması sırasında görülen asimetrik kabuk

yapısı muhtemelen yakın çiftlerde meydana gelir. Ancak bileşenleri uzak olan RS Oph gibi sistemler, bazı X-ışın çiftleri, YSO veya radyo galaksiler kadar güçlü ve hızlı jet yapıları gösterir. Bu yapıların jetleri ortak özelliklere sahiptir: Jet kaynağının toplanması disk boyunca gerçekleşir; jet hızları merkezi cismin kaçma hızına yakın veya daha fazladır; ve toplanan maddenin yaklaşık yüzde 10'u jet tarafından atılır (Livio, 1999; Price et al., 2003). Ayrıca RS Oph için yapılan bir çalışmada bu tür koşutlanmış jetlerin iç ve dış disk yarıçapı oranının büyük olması gerektiği vurgulanmıştır (King and Pringle, 2009). Bu tür sistemlerde jet yapıları, uzun süren ve daha parlak olan patlamaları izleyen uzun süreli sakin evre gösteren sistemlerde görülmektedir.

Simbiyotik yıldızlarda iki kutuplu (bipolar) jet yapıları birçok sistemde belirlenmiştir (Leedjör, 2004). Bipolar jetlerin yörünge düzlemine dik ve bileşenlerin dönme eksenleri ile aynı doğrultuda olduğu varsayılır. Bunlardan en iyi bilineni ve jete sahip en yakın ($d \sim 200$ pc) simbiyotik sistem R Aquarii'dir (R Aqr). Bunun yanı sıra jete sahip, ilgi çekici bir diğer sistem ise, tez kapsamında incelenen CH Cygni'dir (CH Cyg). SySt'lerde belirlenen jet yapıları genel olarak S- ve C-şeklinde bükük jet yapılarıdır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: R Aqr (sol) ve CH Cyg (sağ) sistemlerinin bükük jet yapıları. Hubble uzay teleskobu ile elde edilmiş bu görüntüler sırasıyla Melnikov et al. (2018) ve Karovska et al. (2010)'dan alınmıştır.

Jet gösteren simbiyotik sistemlerin sıcak bileşenleri $L_{WD} \sim 10^2 L_{\odot}$ gibi düşük ısıtma değerlerine sahiptir (Leedjör, 2004). Bu durum, bu ci-

simlerin termonükleer reaksiyonlardan çok toplanma akışı ile desteklendiğini göstermektedir. Düşük L_{WD} değerine sahip simbiyotik yıldızlar ışık eğrilerinde dakikalar mertebesinde hızlı değişimler (flickering) göstermektedir (Dobrzycka et al., 1996; Sokoloski et al., 2001). Flickering yapıları toplanma diskleri ve/veya sınır tabakaları ile ilişkilendirilir (Fritz and Bruch, 1998). Yani bu tür sistemlerde tek başına toplanma yeterli bir süreç olabilir ancak yüksek L_{WD} değerine sahip SySt'lerde nükleer yanma söz konusudur. Nükleer yanma sırasındaki enerji üretimi, toplanmadaki çekimsel enerjiye kıyasla 40 kat daha fazladır (Sokoloski, 2003).

Güçlü madde çıkış sürecinin doğası henüz tam olarak anlaşılmış değildir, ancak güçlü olasılıklardan biri sistemin manyetize olmuş bir diske sahip olmasıdır. Jet hızı en az merkez kaynağın kaçma hızı mertebesinde olmalıdır. Kabaca bu değerler, YSO için 100 km s^{-1} mertebesinde olup, kara delik bileşenli X-ışın çiftlerinde ve AGN'lerde relativistik hız mertebesinde. Tüm bu durumlar jet çıkışlarının toplanma diskleri ile ilgili olduğu ve jet koşutlanmasının geniş boyut ve karakterde tüm sistemlerde rol oynayabileceğini göstermektedir (Livio, 1999).

Manyetik alan ise daha çok koşutlanmış jetlerde önemli bir rol oynar (Livio, 1999, 2001; Lynden-Bell, 2003).

D-türü SySt'lerde (R Aqr gibi; en yakın astrofiziksel jet gösteren sistem) fırlatılan madde ışıyım basıncı tarafından desteklenebilir. R Aqr sisteminin ROSAT gözlemlerinin MHD (manyetohidrodinamik) modelleri, yumuşak X-ışın salmalarının sıcak leke bölgesinden kaynaklanabileceğini göstermektedir (Kafatos, 1996; Korreck et al., 2005). Bu sistemlerde sıklıkla gezegenimsi bulutsu yapısına benzer genişlemiş yapılar görülür ve ilaveten 1000 km s^{-1} 'den yüksek hızlarda madde çıkışlarına sahip çift kutuplu yapılar da gözlenmiştir. Bunların yanı sıra kütle atımı, toplanma diski, termonükleer patlama ve jet benzeri yapıların oluşmasına katkı sağlayan madde çıkışları da görülür. Jet gösteren bazı SySt'lerin özellikleri Tablo 2.3'de sunulmuştur. Tabloda jet gösteren SySt'lerin farklı özelliklere sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 2.3: Jet gösteren bazı simbiyotik sistemlerin özellikleri (Leedjärv, 2004). Tabloda “+” işareti ilgili özelliğin o sistem için belirlendiği, “−” işareti ise belirlenmediği anlamına gelirken, “?” işareti bilginin eksikliğine ya da güvenilirliğinin düşük olmasına dikkat çeker.

	CH Cyg	MWC560	R Aqr	RS Oph	Hen3-1341	StHα190
Kızılöte Türü	S	S	D	S	S	D
$P_{yör}(\text{gün})$	5700	1900(?)	16000(?)	455.7	?	170(?)
$L_{WD}(L_{\odot})$	1-10 (<300)	100-1000	1-100	~100	$10^3(?)$	?
Devin Tayf Türü	M6.5-7.5	M5.5	M7-8	K4-M0	M4	G5-7
X-ışın	+	−	+	+	−	−
Radyo	+	−	+	+	+	−
λ 6825	−	−	−	+	+	−
Flickering	+	+	−	+	−	−
$V_{jet} (\text{km s}^{-1})$	~1000	200 – 2000	500 – 1000	≥ 2000	~800	≥ 1000

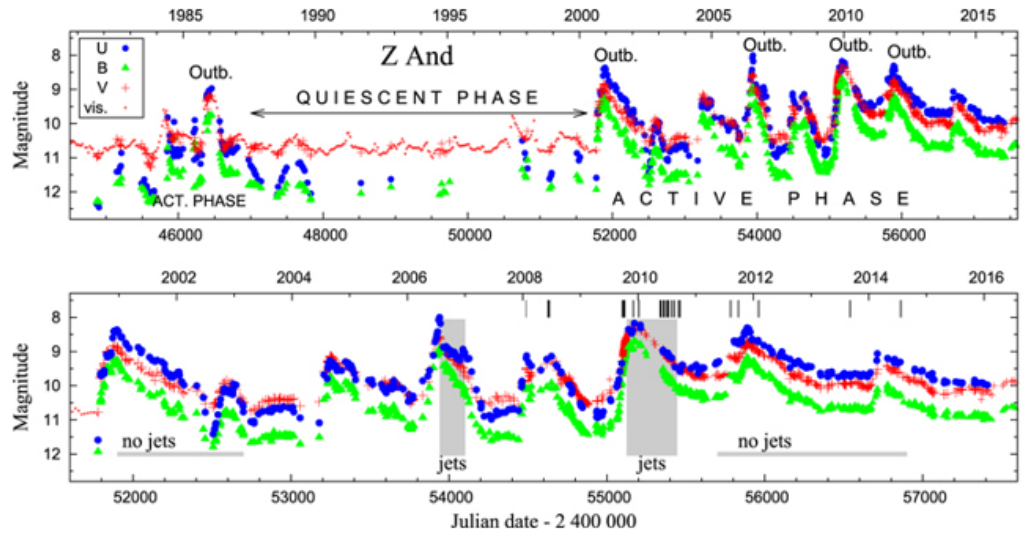
Simbiyotik yıldızlarda manyetik alan konusu çok tartışmalı bir konudur. Z And sistemi yüksek manyetik alan şiddetine sahip beyaz cüce bileşen içerdiği belirlenmiş tek simbiyotik çiftidir (Sokoloski and Bildsten, 1999). Sokoloski and Bildsten (1999)’in yaptıkları optik gözlemler sonucunda dönemi 1682.6 s ve değişim genliği 2-5 mmag (milikadir) olan salınımlar belirlenmiştir. Böyle bir değişim ancak toplanma diskine sahip manyetik bir beyaz cücenin ($B > 10^5$ G) dönmesi sonucu elde edilebilir. Stute and Camenzind (2005) bu gözlemler doğrultusunda Z And’ın beyaz cücesi için manyetik alan şiddetini 22 MG olarak hesaplamıştır.

Bununla birlikte jete sahip CH Cyg ve MWC 560 sistemlerinin beyaz cüce manyetik alan şiddetlerinin 10^7 - 10^8 G mertebesinde olabileceği önerilir (Panferov and Mikolajewski, 2000). Manyetik beyaz cüceli tek bir sistemin belirlenmiş olması, simbiyotik yıldızlarda gözlenen jet yapıları için manyetik süreçlere ihtiyaç olup olmadığına yönelik araştırmalar yapılmasına yol açmıştır (Stute and Camenzind, 2005). Ancak jet oluşum modellerinde manyetik alanın kilit rol oynamasından dolayı bu soru hala açık bir problemdir.

2.6 Optik Patlamalar ve Flickering

Simbiyotik sistemlerin optik ışık eğrilerinin sakin ve aktif evrelerinde farklılıklar görülür (Skopal et al., 2018). Sakin evredeyken disk boyunca beyaz cüce üzerine sabit madde akışı gerçekleşir. Bu aşamada beyaz cüce sıcaklığı $> 10^5$ K civarına kadar çıkar ve bu da ısıtmasının 10-100 $L_{\odot}$ düzeyine ulaşmasına neden olur. Aktif evrede ise birkaç ay veya yıl ölçeklerinde gözlenebilen birkaç kadirlik parlaklık artışına neden olan patlamalar görülmektedir. Çok sık olmasa da bu patlamaların ardından sistemlerde koşutlanmış madde atımları (jetler) gözlenebilir (Sokoloski and Kenyon, 2003). Bu yapılar SySt'in toplanma diskine sahip olmasından ileri gelmektedir. Z And sisteminin sakin ve aktif evredeki uzun dönemli ışık değişimi Şekil 2.3'te sunulmuştur.

Dev bileşenden gelen kararsız kütle transferi, beyaz cüce üzerine düşen madde hızında değişkenliğe sebep olabilir ve bunun sonucunda parlamalar meydana gelebilir (Mass Transfer Burst Model; Bath, 1973). Eğer kütle transfer hızı değişmiyorsa, toplanma diskindeki kararsızlık sonucunda diskte belli bir yarıçapta toplanan madde miktarı kritik değeri aşabilir ve beyaz cüce üzerine ani bir madde transferi gerçekleşir. Böylece bir parlama meydana gelir (Disk Instability Model=DIM; Osaki, 1974).



Şekil 2.3: Z And simbiyotik yıldızının U , B ve V filtrelerinde elde edilmiş uzun dönemli ışık değişiminin sakin ve aktif evredeki davranışı (Skopal et al., 2018).

L1 noktasından diske aktarılan maddenin tamamı beyaz cüce yüzeyine düşemeyebilir. Böylece disk kütlesi artmaya devam ederek disk yarıçapının büyümesine neden olur. Bunun sonucunda bir parlama meydana gelecektir. Kütle transfer hızı fazla olduğunda, madde diskin dış kısmında toplanacak ve bu bölgede kritik yüzey yoğunluğuna ulaşılacaktır; ancak kütle transfer hızı düşük ise, soğuk diskteki viskoz yayılma önemli hale gelecek ve ısısal kararsızlık toplanma diskinin en iç kısımlarında oluşacaktır. Öyle ki kütle transfer hızı nasıl bir parlamanın oluşacağını belirleyebilir (Smak, 1984). Diske akan madde hızı ($\dot{M}$) ne kadar fazla olursa parlama dönemi de kısalmaktadır.

Tutulma gösteren sistemlerin ışık değişimlerinin gözlemleri diskin yarıçapı ile ilgili bilgi verebilir. Katakлизмik değişen Z Cha'nın gözlemleri parlama sırasında disk yarıçapının arttığını ve sakin evrede yavaşça diskin büzüldüğünü göstermiştir (Robinson et al., 1995; Odonoghue, 1986).

2.7 Simbiyotik Yıldızlarda X-Işın

Simbiyotik sistemlerin X-ışın kaynakları olduğu 1970'li yıllardan beri bilinmektedir (Lewin et al., 1971; Anderson et al., 1981; Cordova et al., 1981; Allen, 1981). X-ışın salma karakteristikleri *ROSAT* verileri kullanılarak ortaya konmuştur (Mürset et al., 1996, 1997).

Bu sistemlerin X-ışın davranışları, X-ışın kaynağı olarak keşiflerinin çok eskiye dayanmaması nedeniyle gelişmeye ihtiyaç duyan ve cevaplanmayı bekleyen birçok soruyu barındıran bir çalışma alanıdır. Özellikle ilk gözlemler bu sistemlerin çoğunlukla X-ışının yumuşak (soft) ve çok yumuşak (supersoft) bölgelerinde salmalar gerçekleştirdiğini göstermiştir. Bu istatistiksel bilgi Mürset et al. (1997)'nin *ROSAT* gözlemleri ile gerçekleştirdiği çalışmada bulunabilir (sınıflama için Bkz. Bölüm 2.8).

SySt'lerin X-ışın gözlemlerinin artması, X-ışın teleskop teknolojilerinin gelişmesi ve enerji duyarlılık aralıklarının atması sayesinde X-ışının sert (hard) bölgesinde salmalar gösteren SySt'lerin sayısı gün geçtikçe artmıştır. Örneğin, RT Cru sisteminin *INTEGRAL* (Chernyakova et al., 2005) ve T CrB sisteminin

Swift (Tueller et al., 2005) gözlemlerinden elde edilen sert X-ışın enerjisi 50 keV'a kadar uzanmaktadır. Sert X-ışın bölgesinde belirlenen diğer sistemler CD-57 3057 (Masetti et al., 2006a) ve CH Cyg'dir (Ezuka et al., 1998; Mukai et al., 2007).

Toplanma diskinin en iç bölgelerinde (sınır tabakası) X-ışın üretimi gerçekleşebilir. CV'lerin bir alt sınıfı olan cüce novalarda olduğu gibi simbiyotik yıldızlarda da sınır tabakasında sert X-ışın ($E \geq 2$ keV) üretimine neden olacak güçlü bir mekanizma olmalıdır. Optikçe ince olan bu sıcak bölgede toplanma hızının ne kadar olduğu ve toplanmanın nasıl bir cisim etrafında (beyaz cüce, nötron yıldızı vb.) gerçekleştiği X-ışın davranışını belirler (Kylafis and Lamb, 1982). Bu nedenle bazı SySt'in sıkışık bileşeni nötron yıldızı olabilir mi sorusu hala tartışılmaktadır (Lü et al., 2012).

Aslında nötron yıldızı bileşenine sahip olduğu düşünülen ilk sistemler GX 1+4 ve Hen 3-1591'dir (Mürset et al., 1997). *INTEGRAL*, *RXTE*, *Swift*/BAT gibi, 10 keV'dan daha yüksek enerjili bölgeye duyarlı X-ışın alıcıları ile gerçekleştirilen gözlemler sayesinde bu tür sistemlerin sayısı gün geçtikçe artmaktadır (4U 1700+24 Masetti et al., 2002; 3A 1954 + 319, Masetti et al., 2006b). Yaklaşık 5 saatlik uzun dönme dönemine sahip bu tür simbiyotik sistem olan 3A 1954 + 319'un X-ışın davranışının kökeni optikçe kalın Compton saçılması gösteren plazmadır (Marcu et al., 2011).

Yüksek toplanma hızı yumuşak X-ışın tayfına, düşük toplanma hızı ise sert X-ışın üretimine katkı sağlayabilir. RS Oph (Nelson et al., 2011) ve T CrB (Luna et al., 2008) sistemlerinin, benzer beyaz cüce kütlelerine sahip olmalarına rağmen farklı X-ışın sertliklerinde salmalar gösterdikleri belirlenmiştir. Bu davranışın farklı toplanma hızları ile ilgili olup olmadığı tartışılması gereken açık problemlerdendir. X-ışın tayfını değiştiren diğer bir unsur da beyaz cücenin manyetik alanı olabilir. Eğer manyetik alan şiddeti sıkışık cisim yüzeyinde çok güçlü ($> 10^{5-6}$ G) ise madde akışı manyetik alanın yönlendirmesiyle gerçekleşir. Maddenin manyetik kutuplara düşmesi sonucu sert X-ışın üretimi beklenir. Beyaz cücenin yüksek manyetik alana sahip olmasının gözlemsel göstergesi ışık değişiminin dönemi ile beyaz cüce

dönme döneminin eş zamanlı (senkronize) olmasıdır. Manyetik kataklismik değişen yıldızlarda bu davranış optik ve X-ışın değişimlerinden belirlenebilir. Ancak simbiyotik yıldızlarda yüksek manyetik alana sahip henüz iki sistem belirlenebilmiştir (Z And, Sokoloski and Bildsten, 1999; R Aqr, Nichols et al., 2007). Optik değişimlerle manyetik bir beyaz cüceye sahip olduğu belirlenen Z And sistemi için bulunan dönme modülasyon değeri yaklaşık 1683 s iken sert X-ışın tayfindan belirlenen R Aqr sistemi için yaklaşık 1734 s'dir.

SySt'lerde sert X-ışından ziyade yumuşak X-ışın salması daha sık görülür. Hatta jet gösteren bazı SySt'ler bile X-ışın bölgesinde sadece yumuşak X-ışın bileşenine ($kT \leq 2$ keV) sahip olabilir (Stute et al., 2013). Sistemin toplanma kolonu ya da sınır tabakasında şok yapılarının oluşması, toplanma diski ile kırmızı devden gelen rüzgârın etkileşmesi, her iki bileşenden gelen rüzgârların çarpışması ve sıcak disk koronasına sahip olması (Ishida et al., 2009) gibi birçok etki yumuşak X-ışın oluşmasına neden olabilir. Diskin iç kısmında üretilen sert X-ışınımı, disk koronası veya yıldız rüzgârları ile etkileşime girerek yumuşak X-ışın üretimine katkı sağlarlar.

2.8 Simbiyotik Sistemlerin X-ışın Sınıflandırması

*ROSAT*³ uydusunun gözlemlerini temel alan Mürset et al. (1997) bilinen galaktik simbiyotik yıldızların çoğunun X-ışın bölgesinde gözlenebilir olduğunu göstermiştir. Sistemler X-ışın salma özelliklerine göre üç gruba ayrılmıştır. Daha çok yumuşak X-ışın aralığını kapsayan bu sınıflandırma literatürde $\alpha - \beta - \gamma$ sınıflandırılması olarak bilinmektedir. Bu sınıflandırma daha çok sıcak yıldızın fiziksel özelliklerini baz almaktadır (sıcaklık, kütle kaybı, sıcak bileşen yıldızın türü gibi).

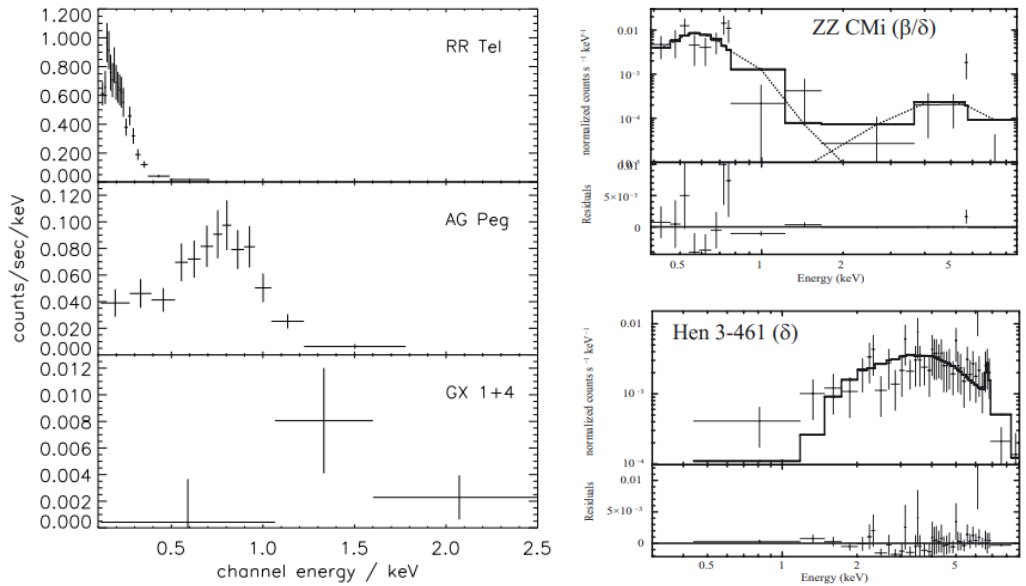
α türünde, X-ışın salma tayfı yaklaşık olarak 0.4 keV değerinin altında yer alır. Bu çok yumuşak X-ışın tayfı sıcak yıldızın fotosferinden kaynaklanır. Özellikle sıcak beyaz cüceye sahip sistemlerden çok yumuşak X-ışın tayfı beklenir. Böylece fotosfer X-ışın detektörlerinin algılayabileceği

³*ROSAT* uydusunun enerji duyarlılık aralığı 0.1 – 2.5 keV'tur.

enerji değerlerinde ($h\nu \sim 0.2$ keV) fotonlar üretebilir.

β türü, yaklaşık 0.8 keV değerinde pik yapan güçlü salma tayfı verir. Klasik simbiyotik bulutsu modeli soğuk yıldız rüzgârının sıcak bileşen tarafından iyonlaştırılmasına ve sistemi saran bir gaz-toz yapıya işaret eder. Bu salmanın kaynağı olarak iki bileşenden gelen rüzgârların çarpışması önerilir. Çarpışma sırasında 10^6 K civarında optikçe ince plazmadan oluşan bir şok bölgesi oluşur. Böylece β -türü X-ışın salmaları oluşur. Bu tür salma gösteren sistemlerin sıcak yıldızlarının büyük olasılıkla güçlü kütle kaybına sahip oldukları düşünülmektedir. Ayrıca toplanma akışında şokların oluşması da mümkündür.

Son olarak γ -türü ise, görece sert X-ışın bölgesinde salma tayfı gösteren sistemleri temsil eder. Bu simbiyotik sistemlerin sıcak bileşenlerinin toplanma diskli nötron yıldızları oldukları düşünülmektedir.



Şekil 2.4: Simbiyotik sistemlerin X-ışın sınıflamasında salma tayfı davranışları. Soldaki üç grafik yukarıdan aşağı sırasıyla $\alpha - \beta - \gamma$ türüne ait sistemleri gösterirken (Mürset et al., 1997), sağdaki grafik β / δ ve δ türü sistemlere ait salma tayfını göstermektedir (Luna et al., 2013). Sağdaki grafiklerin alt panelleri gözlem ve sıcak plazma model tayfının farklarını ifade eder.

Sonraki gözlemler SySt'lerin sert X-ışın bölgesinin yüksek değerele-

rine kadar salmalar gösterdiğini ortaya koymuştur (Bkz. Bölüm 2.7). Bu nedenle, sert X-ışın bölgesini de içerecek şekilde bu sınıflandırma yeniden ele alınmıştır (Luna et al., 2013). Böylece $\alpha - \beta - \gamma$ sınıflandırması, δ ve β / δ sınıfları eklenerek güncellenmiştir. Şekil 2.4 sınıflandırmalara örnek sistemlerin X-ışın salma tayflarını göstermektedir. Güncellenen sınıflamada β , 2.4 keV'den küçük değerlerde salma gösteren sistemleri kapsamaktadır. Sıcak bileşeni nötron yıldızı olduğu düşünülen γ sınıfı için X-ışın salmasının enerji kapsamı 2.4 keV'den yüksek enerjilere kadar uzanmaktadır. Bu tür sistemler için optikçe kalın Compton saçılması gösteren plazma modeli önerilmektedir (Masetti et al., 2007). Yüksek soğurmalı sert X-ışında ısısal salma gösteren (2.4 keV'den fazla değerlerde tek tepeli salma) sistemlere δ sınıfı adı verilmiştir. Bu tür salmanın kökeni olarak toplanma diskinin en iç bölgesinde bir sınır tabakası önerilmektedir. X-ışın tayfının hem yumuşak ($kT < 2$ keV) hem de sert ($kT > 2$ keV) X-ışın bölgesinde iki tepeli salma gösteren X-ışın tayfına sahip sistemler ise β / δ olarak isimlendirilir. Bunlar hem β hem de δ 'nın özelliklerini barındırır. Yumuşak X-ışın salmasının genelde rüzgâr çarpışmalarından kaynaklandığı düşünülürken (Mürset et al., 1997), sert bölgedeki salmanın çoğunlukla toplanma diskinin sınır tabakasında üretildiği düşünülür (Luna et al., 2013).

3 SİMBİYOTİK YILDIZLARIN OPTİK VE X-İŞİN GÖZLEMLERİ

3.1 TUG Gözlemleri

Tez kapsamında belirlenen sistemlerin gözlemleri TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG) yerleşkesinde bulunan T60 teleskobu ile yapılmıştır. TUG T60 teleskobu, 60 cm ayna çapına sahip robotik olarak ve cisim tabanlı çalışan bir teleskoptur⁴. Filtre olarak Bessel U , B , V ve R filtreleri kullanılmıştır. CCD gözlemlerinin DARK, BIAS ve FLAT ön indirgemeleri TUG personelleri tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadaki gözlemler 2019B dönemi ile başlamış ve 2022C dönemi ile son bulmuştur. Cisimlerin gözlenebilirlikleri ve hava şartlarını bir kenara bırakırsak, cisimlerin her biri için yaklaşık 3.2 yıllık gözlem süresinde fotometrik gözlemleri yapılmıştır.

Gözlem verilerinin analizi AstroImageJ görüntü işleme programı ile yapılmıştır (Collins et al., 2017). Bu program ImageJ programının geliştirilmiş halidir. Astronomlar için özelleştirilmiş ve birçok astronomi paket ve makroları içermektedir. AstroImageJ sayesinde cisimlerin mukayese ile parlaklık farkları alınarak uzun dönemli ışık eğrileri elde edilmiştir.

Hedef cisimlerin ışık eğrilerinde olası dönemsel değişimlerin tespiti için *Astropy* paketindeki *Lomb-Scargle Periodogram* (Lomb, 1976; Scargle, 1982) ve Fourier dönüşüm yöntemini kullanan *Period04* (Lenz and Breger, 2014) kullanılmıştır. Sistemlerin gözlem sonuçları Bölüm 3.4’de verilmektedir.

3.2 X-ışın Görevleri

3.2.1 XMM-Newton

XMM-Newton teleskobunda üç adet cihaz bulunmaktadır; **EPIC** (European Photon Imaging Camera), **RGS** (Reflection Grating Spectrometers) ve **OM** (Optical Monitor). EPIC cihazı farklı modlarda

⁴<https://tug.tubitak.gov.tr/tr/teleskoplar/t60>

ve CCD kameraları ile X-ışın ışık ölçümü ve düşük çözünürlüklü X-ışın tayfını elde etme imkanı verir. CCD'ler $0.15 - 15$ keV enerji aralığına duyarlıdır. RGS ise $0.33 - 2.5$ keV enerji aralığındaki yüksek çözünürlüklü X-ışın tayfı elde etmemizi sağlar. Son olarak OM cihazı sayesinde kaynakların moröte ve optik enerji bölgelerinin incelenmesi sağlanır. Görüş alanı $16''$ 'dir. Bu aygıtta Bessel U , B , V filtreleri yer alır ve optik duyarlılık aralığı $1700 - 6500 \text{ Å}$ 'dur. Moröte için UVW1 (2970 Å), UVM2 (2327 Å) ve UVW2 (2144 Å) filtreleri de yer almaktadır (Mason et al., 2001).

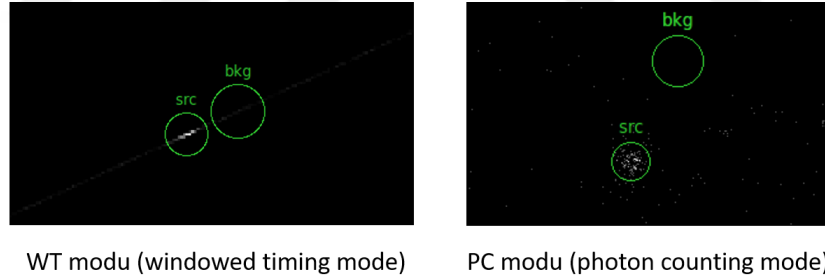
XMM-Newton teleskobunda üç adet X-ışın CCD kamerası bulunmaktadır: Bir adet **EPIC** ve iki adet **MOS (Metal Oxide Semi-conductor)** kamerası. Bu cihazlar **RGS (Reflection Grating Spectrometers)**'in arkasına yerleştirilmiştir. MOS bir CCD görüntüleme aygıtıdır. Görüntüleme alanı $\sim 2.5 \times 2.5 \text{ cm}$ 'dir ve 62 mm 'lik odak uzaklığı ile $\sim 28'.4$ 'lük bir görüş alanına sahiptir. RGS cihazları $5 - 35 \text{ Å}$ ($0.33 - 2.5 \text{ keV}$) bandında yüksek çözünürlüğe sahiptir. Etki alanı yaklaşık 15 Å (0.83 keV)'dur. Izgaralar sayesinde gelen X-ışın akısının neredeyse yarısı RGS detektörüne doğru yönlendirilir (yani gelen orjinal akının yaklaşık %44'ü MOS kameralarına ulaşır). Ancak üçüncü herhangi bir engelle karşılaşmadan ışınları toplar.

Üçüncü kameranın odak noktasında EPIC aygıtı bulunur ve *pn* CCD'lerini kullanır. EPIC kameralar teleskobun görüş alanının ($30'$) üzerinde çok hassas görüntüleme imkanı sunar. Duyarlı olduğu enerji aralığı $0.15 - 15 \text{ keV}$ 'dur (X-ışın geniş bant aralığı). EPIC CCD'ler frekans okuma moduna bağlı olarak sabit foton sayma modunda çalışır ve *eventlist* adı verilen gözlem bilgilerini barındıran .fits dosyaları üretir (eventlistler, her olay için giriş tabloları, konum, varış zamanı ve enerjisi gibi özellikleri barındırır).

XMM-Newton'da üç X-ışın teleskobunun her biri ortak eksenli (co-axial) ve ortak odağa sahip (cofocal) iç içe geçmiş ızgaralı yansıtma aynalarından oluşur. En büyük ayna çapı yaklaşık 70 cm 'dir.

3.2.2 Swift

Swift, Gama Işın Patlama (GRB) çalışmaları için geliştirilen ve ilk çok dalgaboyu gözlemi imkanı sunan bir gözlemevidir. *Swift* üzerinde 3 teleskop yer almaktadır: ***Swift*/XRT (X-Ray Telescope)**, 0.2 – 10 keV aralığına duyarlı X-ışın teleskobudur. Teleskobun görüş alanı $23'.6 \times 23'.6$ ve *XMM-Newton* teleskobunun EPIC-MOS aygıtının CCD'si ile aynı özelliktedir. *Swift*/XRT üzerinde 3 farklı gözlem modu yer alır: Photodiode Mode (PD), Windowed Timing Mode (WT) ve Photon Counting Mode (PC). PD ve WT farklı zaman çözünürlüklerine bağlı hızlı sayım modu iken, PC 2-boyutlu görüntüleme ve tayf alma modudur. PD, WT ve PC için zaman çözünürlükleri sırası ile 0.14 ms, 1.8 ms ve 2.5 s'dir. ***Swift*/BAT (Burst Alert Telescope)**, gama ışın patlamalarına yaklaşık 10 saniye kadar kısa bir sürede yönelebilen bir teleskoptur. Yüksek enerjili bölgeye duyarlıdır ve enerji duyarlılık aralığı 15 – 150 keV'tur. ***Swift*/UVOT (UV and Optical Telescope)** moröte ve optik bölgeye duyarlı (170 – 650 nm) bir teleskoptur.



Şekil 3.1: CH Cyg sisteminin *Swift*/XRT WT ve PC modlarındaki alan görüntüleri.

Simbiyotik sistemlerin bir kısmı bazı zamanlarda sert X-ışın bölgesinde kendini göstermektedir. Yaklaşık 100 günlük *Swift*/BAT gözleminde CH Cyg'nin 15 – 50 keV aralığında bir artış gösterdiği bildirilmiştir (Luna et al., 2020). Ancak simbiyotik yıldızların esas X-ışın salmasının yumuşak bölgede yer almasından dolayı burada *Swift*/XRT teleskobunun WT ve PC modları ile yapılmış gözlemler çalışılmıştır. PC modu tam görüntüleme ve tayfsal çözünürlüğü korurken, WT modu 10 veri satırının 1 satıra sıkıştırılması (binning) ve CCD'nin sadece merkezi 200 kolonunun ($\sim 8'$) okunması ile gerçekleşir (Bkz. Şekil 3.1).

3.3 XMM-Newton ve Swift Gözlemleri

Tez kapsamında seçilen SySt'lerin (Bkz. Bölüm 3.4) X-ışın davranışlarının çalışılması için *XMM-Newton* ⁵ ve *Swift* ⁶ arşivlerindeki veriler incelenmiştir ⁷. *XMM-Newton* arşivinde tez kapsamında seçilen beş sistemin yalnızca üçüne ait gözlem bulunmaktadır: CH Cyg, Z And ve AG Dra. *Swift* X-ışın veri tabanında ise 5 sisteme de ait gözlem verisi bulunmaktadır (Tablo 3.1).

Tablo 3.1: Tez kapsamında seçilen sistemlerin *XMM-Newton* ve *Swift* veri tabanlarındaki gözlem sayıları.

	AG Dra	AX Per	CH Cyg	CI Cyg	Z And
<i>XMM-Newton</i>	6	0	1	0	3
<i>Swift</i> /XRT	103	3	24	12	126

XMM-Newton verilerinin indirgenmesi *Science Analysis System* (SAS) aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. SAS çok sayıda komutların, betiklerin ve kütüphanelerin bulunduğu *XMM-Newton* verileri için özel olarak geliştirilmiş bir pakettir. Arşivden indirilen gözlem dosyasında ODF (Observation Data Files) ve PPS (Pipeline Processing System) dosyaları yer almaktadır. Kullanıcı, SAS sayesinde ODF dosyalarının PPS çıktıları yardımı ile indirgeme işlemi sağlar. ODF, FITS formatında gözlem bilgilerini barındıran EVENTFILE dosyalarına sahiptir. Arşivden alınan veriler ham halde olduğundan, öncelikle *barycen* paketi ile tüm gözlem zamanları Güneş Sistemi'nin kütle merkezine indirgenmiştir. Bunun nedeni *XMM-Newton*'ın zaman sayımının 1998-01-01 00:00:00'dan başlamasıdır. Daha sonra ışık eğrisi için kaynak ve arka plan alanların yarıçapları belirlendi. Kaynak için en uygun koordinat ve alan yarıçapının belirlenmesi için *eregonanalyse* paketi kullanıldı. Arka plan alan ve yarıçapların belirlenmesinde arayüz olarak *SAOImage DS9* programı

⁵<https://nxsas.esac.esa.int/>

⁶<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/>

⁷Bugüne kadar gerçekleştirilmiş tüm X-ışın görevleri verilerine NASA'nın The High Energy Astrophysics Science Archive Research Center (HEASARC) arşivinden ulaşılabilir. Özel olarak *XMM-Newton* verileri ESA'nın veri tabanında yer alan arşivinden de elde edilebilir.

kullanıldı. Böylece, veriler bu bilgiler kullanılarak *epiclccorr* paketi ile ışıık eğrisini elde edebilmek için hazır hale getirildi.

X-ışın tayfının elde edilmesi için ham verilerin hazır hale getirilmesi gerekir. Öncelikle gerekli dosyalar elde edilmelidir: Bunlar CCD ile ilgili bilgileri barındıran (redistribution matrice file; rmf) ve (ancillary file; arf) dosyalarıdır. Dosyaların elde edilmesi *rmfsgen* ve *arfgen* kodları ile sağlandı. Daha sonra *grppha* komutu ile EVENTFILE, ARF ve RMF dosyaları birleştirildi. Gözlem verisi istenen zaman ve enerji bandında *evselect* betiği ile filtrelenerek tayf analizine hazır hale getirildi (ayrıntılar için *XMM-Newton* kullanım klavuzuna bakılabilir ⁸).

Tez kapsamında belirlenen sistemlerin X-ışın verilerinin ön indirilmesi SAS kodu (versiyon 20.0.0) ile gerçekleştirilmiştir. X-ışın tayf analizlerinin gerçekleştirilmesi için tüm X-ışın görevlerinin tayf analizlerinin yapılmasına imkan veren *Xspec* (*An X-ray Spectral Fitting Package*) yazılımı (Arnaud, 1996; Dorman and Arnaud, 2001) kullanılmıştır (versiyon 12.10.1). *Xspec* komut tabanlı ve etkileşimli X-ışın veri analizini gerçekleştiren bir analiz programıdır.

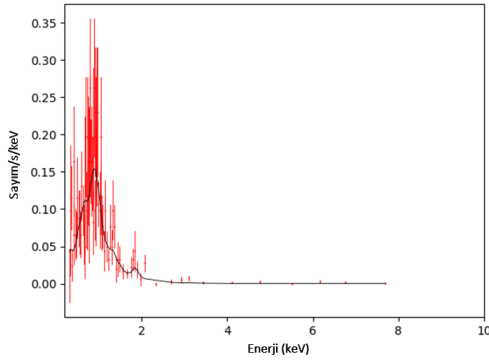
Swift'in veri tabanında tez kapsamı dahilindeki yıldızlara ilişkin tüm veriler analiz edilmek üzere veri tabanından çekilmiştir. Kaynaklara ilişkin gözlem sayısının fazla olması (Bkz. Tablo 3.1) nedeniyle analizlerin otomasyona dönüştürülmesi ihtiyacı doğmuştur. Bunun için *Python* programlama dili kullanılarak ön indirme ve modelleme betikleri oluşturulmuştur. Her gözlem verisine uygun modeli ve verilerin uygun grupta değeri bulmak X-ışın analizi için gerekli ön basamaklardandır.

Gözlem verisi çok olduğundan, X-ışın analizi için 3 farklı *Python* tabanlı betikler oluşturulmuştur. X-ışın tayf analizi için *Xspec* paketi kullanılması nedeniyle, *Python* ile uyumlu *PyXspec*⁹ arayüzü kullanılmıştır. Oluşturulan 3 betik şu şekilde özetlenebilir: Öncelikle, gözlem verileri X-ışın

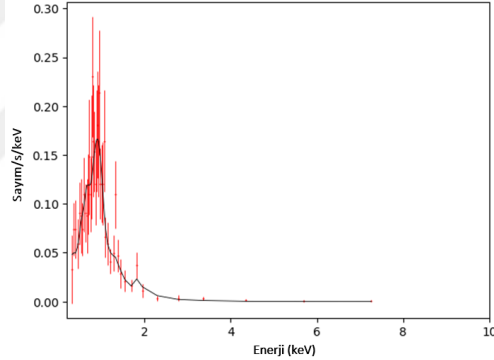
⁸<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xmm/abc/>

⁹<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/python/html/index.html>

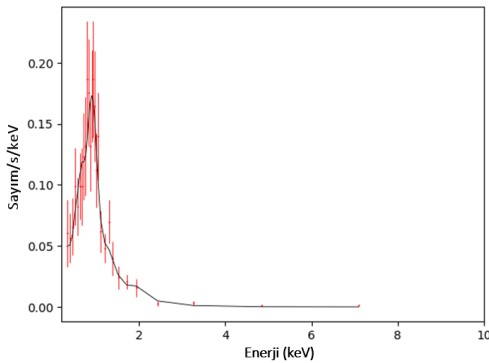
tayfı ya da ışıık eğrilerini elde etmek için işlenebilir hale getirilmelidir. İlk betik, seçilen bir cismin tüm gözlem dosyalarındaki verilerini sırasıyla işlenebilir hale getiren ön indirgeme işlemini yapar (*XSELECT* betiğı). İkincisi, gözlem verilerinin uygun grıplamasının yapılmasını sağlamaktadır (*GRUPPA* betiğı). Aksi taktirde verileri modellerken olumsuz durumlarla karşılaşılabilir (örneğin, modelin indirgenmiş χ^2 değeriinin optimum olmaması ya da model parametre hatalarının hesaplanamaması). Böylece verilerin farklı grup değeriinde tayf analizine uygun hale gelmesi sağlanır. Son betik ise X-ışın tayfına uygun modelin belirlenmesi ve parametrelerin elde edilmesi ile ilgilidir (*MODEL* betiğı). Bunun için 2 ayrı betik oluşturulmuştur. İlk betiğın amacı bir cisme ait tüm gözlem klasörlerine girerek sırasıyla belirlenen modellerin her birini daha önce elde edilmiş her grup dosyasına uygulamaktır.



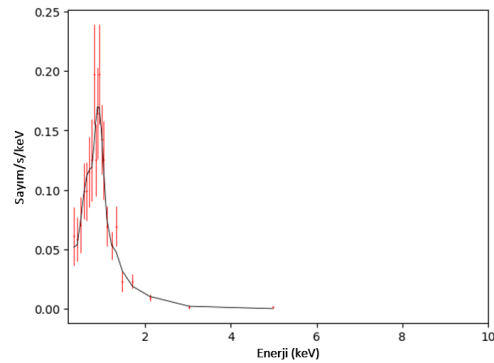
(a) Grup değeri 5



(b) Grup değeri 10



(c) Grup değeri 15

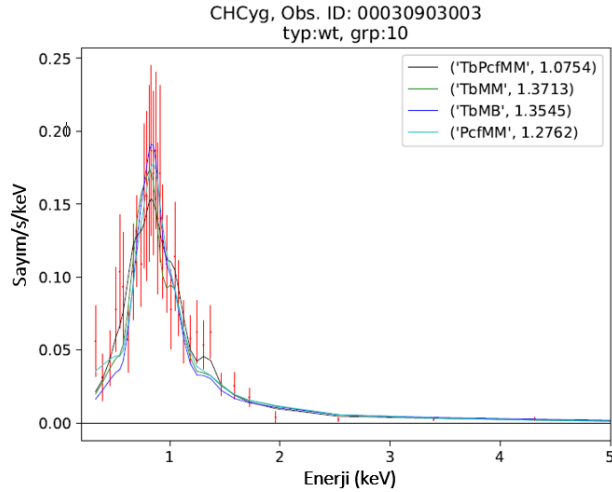


(d) Grup değeri 20

Şekil 3.2: *Swift* gözlemlerinde farklı grup değeri ile uygulanan model uyumlama denemeleri. Tüm grafiklerde sadece grup sayısı değışmektedir. Gözlem verisi ve uygulanan model aynıdır.

Bu sayede en uygun grup değeriinde hangi modelin nasıl davrandığı hızlıca görülebilir. Şekil 3.2’de farklı grup değerlerinde birleştirilmiş gözlem verilerine uygulanan modellerin davranışı görülmektedir. İkinci betik ise en uygun grup dosyasında modellerin (indirgenmiş χ^2 değerleri ile) üst üste çizdirilmesini (örneğin, Şekil 3.3) ve model/modellere ilişkin parametre dosyalarının üretilmesini sağlar.

Özetle, bu 3 betik yardımı ile verilerin ön indirgemesi yapılmış, en uygun grup dosyası elde edilmiş ve en uygun model/modeller ve model parametreleri hızlıca elde edilmiştir. Gerek duyulduğu takdirde en uygun modellerle ayrıntılı X-ışın tayf analizi *Xspec* paketi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3: En uygun grup değeri elde edildikten sonra oluşturulan üst üste çizdirilmiş model tayfları.

Xspec, 109 farklı model kullanımına olanak sağlar. Tez kapsamında en çok kullanılan modeller aşağıda sıralanmıştır:

- **mekal**: Maxwell dağılımını kullanan sıcak plazma modelidir (Liedahl et al., 1995; Kaastra and Mewe, 2000).
- **apec**: ATOMDB ¹⁰ veri tabanından alınan bilgilerle hesaplanan çarpışmalı iyonize plazma modelidir (Smith et al., 2001).
- **blackbody**: Kara cisim tayf modeli.
- **bremss**: Nümerik değerlere polinom fitleri uygulayarak elde edilen ısısal

¹⁰ ATOMDB: Atomic Data for Astrophysicists. <http://www.atomdb.org/>

bremsstrahlung modeli (Karzas and Latter, 1961; Kellogg et al., 1975).

- **power-law**: Temel foton kuvvet yasası ile elde edilen model.
- **pcfabs**: Kaynağı kısmi kaplayan soğurma modeli. Bu model sonucunda kaynağı soğuran parçanın kesirsel soğurma miktarını vermektedir.
- **tbabs**: Tübingen-Boulder yıldızlararası soğurma modeli. Yıldızlararası soğurmada sadece moleküler hidrojen dikkate alınır.

3.4 Tez Kapsamında İncelenen Sistemler

Bu tez kapsamında çalışmak üzere seçilen SySt'ler AG Dra, AX Per, CH Cyg, CI Cyg ve Z And'dır. Sistemlerin uzun dönemli optik gözlemleri TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi yerleşkesindeki 60 cm çaplı aynaya sahip robotik TUG T60 teleskobu ile yapılmıştır. 1495 no'lu proje başvurusu ile Mayıs 2019'dan bu yana gözlemler devam etmektedir. Gözlemler UBVR filtreleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde bu sistemlerin temel özellikleri tartışılırken TUG T60 gözlemleri de sunulacaktır. Sistemlere ait bazı temel bilgiler Tablo 3.2'de verilmiştir.

Seçilen sistemlerin *Swift* ve *XMM-Newton* gözlemlerinin X-ışın analizleri de gerçekleştirilmiştir (Bkz. Bölüm 2.7).

Tablo 3.2: Tez kapsamında seçilen simbiyotik sistemlere ait bazı bilgiler. ¹¹

Sistem Adı	Soğuk Bileşenin Tayf Türü	$P_{yör}$ (gün)	M_{dev} ($M_{\odot}$)	M_{WD} ($M_{\odot}$)	Tutulma	Jet	Ref.
AG Dra	K2 III	549	1.5	0.4	-	+	1,3,6,7
AX Per	M6 III	680.8	1	0.4	+	-	1,4,8
CH Cyg	M6.5-7 III	5700	2.2 ± 0.1	0.21 ± 0.01	+	+	1,9
CI Cyg	M5.5-6 III	855.3	1.3 ± 0.3	0.43 ± 0.04	+	-	1,5
Z And	M2 III	758.8	0.9 ± 0.2	0.37 ± 0.06	-	+	1,2,5

¹¹Referanslar: (1) Belczyński et al. (2000); (2) Sokoloski et al. (2006a); (3) González-Riestra et al. (2008); (4) Munari et al. (2012); (5) Mikołajewska et al. (2003); (6) Skopal (2005); (7) Sion et al. (2012); (8) Mikołajewska and Kenyon (1992); (9) Iijima et al. (2019)

3.5 CH Cygni

3.5.1 Tarihçe

CH Cyg sistemi kırmızı devden (M6-7 III) gelen yıldız rüzgârları ile madde toplayan bir beyaz cüceyi barındırır (Hinkle et al., 2009a) ve sistemi saran iyonize gaz ve toz yapısı bulunur. CH Cyg görsel bölgede en parlak olan simbiyotik sistemdir. Oldukça hızlı değişim gösterir ve simbiyotik sistemler arasında en ilgi çekici fotometrik değişimlere sahiptir. En yakın SySt'lerden biri olan CH Cyg'nin Hipparcos uzaklığı 268 ± 66 pc olarak belirlenirken (Viotti et al., 1997), Perryman (1997) bu değeri $\sim 245 \pm 50$ pc olarak vermiştir. *Gaia* verisinin incelenmesinden ise uzaklık $\sim 205 \pm 3.6$ pc olarak elde edilmiştir (Luri et al., 2018).

Bu sistemin simbiyotik benzeri değişimler gösterdiği 1963 yılında keşfedilmiştir (örn. Deutsch, 1964). Ancak sistemin çok renk gözlemleri ile elde edilen ışık eğrileri diğer klasik simbiyotik sistemlerden farklıdır (Luud et al., 1986). CH Cyg, radyo bölgede koşutlanmış madde çıkışları üreten (Taylor et al., 1986; Karovska et al., 2007) bir sert X-ışın kaynağı (Mukai et al., 2009) olarak kabul edilir.

CH Cyg sistemi en çok çalışılan simbiyotik sistemlerden biri olmasına rağmen yörünge dönemi ile ilgili tartışmalar hâlâ devam etmektedir. Çünkü bu sistemde belirlenen iki uzun dönemli değişim söz konusudur; ~ 14.5 yıl ve ~ 2 yıl. CH Cyg, kızılöte çalışmalarında en parlak S-türü simbiyotik yıldız olarak bilinir ancak bu sınıflamada 5 yılı geçen yörünge dönemine sahip başka bir simbiyotik sistem henüz bilinmemektedir (Fekel et al., 2007). Yıldız zonklama teorisine göre 2 yıllık bu değişim M devinin temel zonklama dönemi olamayacak kadar uzundur (Hughes and Wood, 1990). Bu iki uzun dönemi açıklamak için CH Cyg'nin bir üçlü sistem olabileceği düşünülmektedir. Diğer taraftan sistem madde toplayan bir beyaz cüceye sahip bir çift sistem olduğuna ilişkin güçlü kanıtlara sahiptir (Hinkle et al., 2009b).

Sistemin ikili ya da üçlü sistem olduğuna ilişkin tartışmalar günü-

müzde halen devam etmektedir. Tayfsal çalışmalar sonucunda sistemde ~ 5700 günlük bir dönem belirlenmiş ve bunun çift sistemin yörünge dönemi olduğu belirtilmiştir (Mikolajewski et al., 1987). Daha sonra Hinkle et al. (1993)'ün yaptığı çalışmada sistemin üçlü bir sistem olabileceği üzerinde durulmuş ve 756 gün döneme sahip çift sistemin etrafında dolanma dönemi 5300 gün olan bir G-K cücesi üçüncü bileşen olarak önerilmiştir. Ancak bu yörünge çözümü oldukça küçük bir beyaz cüce kütesinin ($0.2 M_{\odot}$) yanı sıra küçük yörünge eğikliği açısı vermektedir ve bu varsayım yapılan radyo (Taylor et al., 1986) ve optik (Solf, 1987) jet gözlemlerinde elde edilen sonuçlarla tutarsızlık gösterir (disk ve/veya yörünge eğiklik açısı neredeyse 90° 'ye yakındır).

Tüm bu tutarsızlıklara rağmen CH Cyg, Skopal et al. (1996) tarafından üçlü yıldız sistemi olarak tekrar incelenmiş ve hem iç yörüngedeki hem de dış yörüngedeki çiftin tutulma gerçekleştirdiği belirtilmiştir. Böylece sistem yüksek yörünge eğikliğine sahip olacaktır. Özetle, fotometrik gözlemler sonucunda 756 günlük kısa bir yörünge dönemi belirlenmiş ve bu üç bileşenin de eş düzlemli bir yörüngede olduğu belirtilmiştir.

Hem fotometrik hem de tayfsal çalışmalar, çoklu dönem değişimleri olduğunu gösterir. VRI ışık eğrilerinde yaklaşık 100 günlük dev yıldızın radyal zonklaması olduğu düşünülen bir değişime işaret etmektedir (Mikolajewski et al., 1992). M devlerinin zonklama modları dikkate alındığında uzun dönemli farklı zonklama dönemleri belirlenebilir.

CH Cyg'nin her parlamasına (outburst) kütle atımı ile ilişkili olan yüksek hızlı dar salma çizgileri (örneğin, optik bölgede Na I ve Fe II çizgileri) eşlik eder. Örneğin, 1984-85 yıllarında $600 - 2500 \text{ km s}^{-1}$ hızlarında bir madde çıkışı gözlenmiş ve 1992-95 yıllarında nadir görülen bir aktif evre sırasında $\sim 1000 - 1600 \text{ km s}^{-1}$ gibi yüksek hızlarda bipolar çıkışlar belirlenmiştir (Skopal et al., 1996; Iijima, 1996). Ayrıca, 1998-2000 yıllarında $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$ hızlı madde çıkışı gözlenmiştir (Iijima et al., 2019).

Radyo gözlemleri sonucunda yüzey parlaklık haritasında belirlenen genişleme, koşutlanmış jet yapılarına işaret etmektedir (Crocker et al., 2001).

Bu gözlemlerdeki genişleme büyük olasılıkla ısısal olmayan bir synchrotron salma sonucudur.

Crocker et al. (2001), sistemin 1986 yılına ait 15 GHz radyo gözlemleriyle gerçekleştirdikleri çalışmalarında jet yapılarının her bir düğüm (knot) noktası ile merkezi kaynak arasındaki açısal uzaklığı kuzey-batı (NW) uzantısı için $0''.70 \pm 0''.01$ ve güney-doğu (SE) uzantısı için $0''.71 \pm 0''.05$ olarak belirlemişlerdir. Hipparcos uzaklığına göre elde edilen düğüm hızları NW için $V \geq 1210 \pm 300 \text{ km s}^{-1}$ ve SE için $V \geq 1230 \pm 320 \text{ km s}^{-1}$ olarak verilmiştir¹².

CH Cyg sisteminde, Z And'da da görülen flickering benzeri hızlı optik değişimler belirlenmiştir (Sokoloski and Kenyon, 2003). *U* filtresi ile yapılan gözlemlerden bu hızlı fotometrik değişimlerin kaynağının dev yıldızdan ziyade sıcak bileşen olduğu birçok yayında tartışılmıştır (örn. Mikolajewski et al., 1990). Bu flickering değişimleri, gözlemlendikleri evre durumuna göre jet üretimi sırasında, yüksek aktivite durumunda ve tutulma sırasında toplanma diskinin nasıl etkilendiğine dair bilgiler vermektedir (Sokoloski and Kenyon, 2003). Yapılan çalışmada CH Cyg'nin parlak evre (high state) durumunda elde edilen gecelik ışık değişiminde flickering genliği kataklismik değişenlerdeki gibi büyük genlikler gösterirken ($\Delta m \sim 0.5$ kadir), sönük evre (low state) durumuna geçtiğinde genliğin azaldığı görülmüştür ($\Delta m < 0.15$ kadir) (Bkz. Sokoloski and Kenyon, 2003, çalışmasındaki Şekil 1 ve 2).

X-ışın, radyo ve optik gözlemler sonucunda CH Cyg için manyetik süreçlere dair bir kanıt bulunamamıştır. Ezuka et al. (1998) X-ışın bölgesinde 100 saniye gibi kısa bir zaman ölçeğinde değişimler belirlemişse de, X-ışının farklı enerji aralıklarında buna uyumlu (coherent) bir değişim bulamamıştır. Bunun yanı sıra, X-ışın tayfindan elde edilen beyaz cüce sıcaklığı oldukça düşüktür ($kT = 7.3 \pm 0.5 \text{ keV}$). Manyetik CV'lerde belirlenen sıcaklık değeri genel olarak $kT = 10 - 40 \text{ keV}$ değerindedir (Ishida and Fujimoto, 1995).

Gecelik optik gözlemlerde görülen flickering benzeri hızlı değişimler X-ışın bölgesinde de görülmektedir. CH Cyg ve birkaç sert X-ışın salması

¹²Hataların büyük olması Hipparcos uzaklığındaki hatalardan kaynaklanmaktadır.

gösteren simbiyotik sistemlerin X-ışın ışık değişimlerinde flickering yapıları belirlenmiştir (Ezuka et al., 1998). Flickering yapılarının beyaz cüce ya da diske aktarılan kararsız madde akışlarının sonucu olduğu düşünülür. Sistemi saran simbiyotik bulutsu yapısının kümelenmesinin de flickering üretimine katkı sağladığı düşünülmektedir (Contini et al., 2009). Beyaz cüceden gelen şokun kümelenmiş yapılarla karşılaşması sonucu flickering üretimine katkı sağladığı düşünülmektedir. Leahy and Taylor (1987) *EXOSAT* gözlemlerinde CH Cyg'nin 5-7 dk'lık flickering benzeri değişimler gösterdiğini bildirmiştir. Daha önce yapılan BVRI fotometrik gözlemlerinde de benzer süreli flickering belirlenmiştir (Slovak and Africano, 1978).

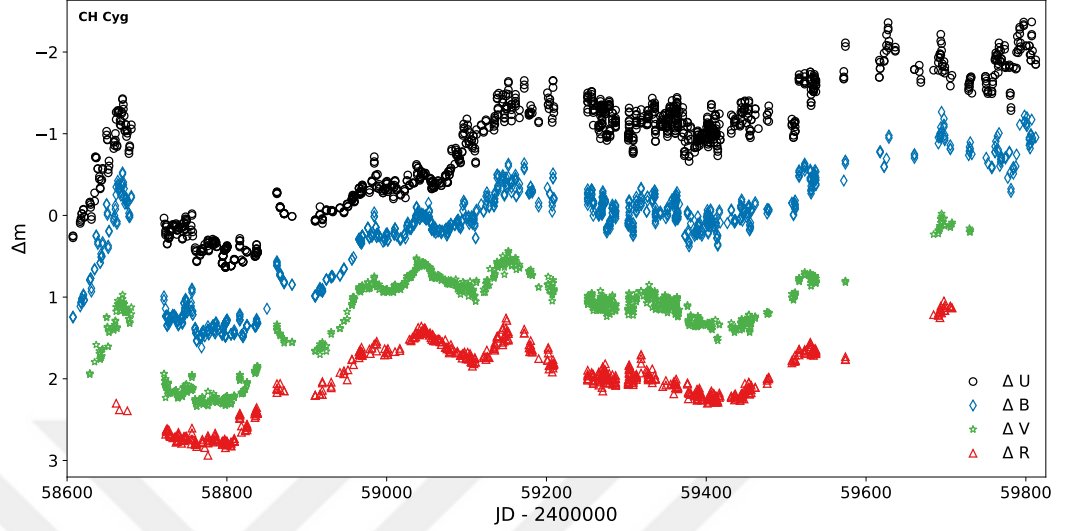
CH Cyg'nin X-ışın tayf davranışları ilginç bir şekilde Seyfert 2 galaksileri ile benzerlik göstermektedir (Wheatley and Kallman, 2006). İlgili çalışmada 19 Ekim 1994 tarihinde *ASCA* tarafından gerçekleştirilen gözlem verileri kullanılmıştır. *ASCA*'nin geniş bant aralığı sayesinde CH Cyg'nin ~ 7 keV civarında optikçe ince plazma göstergesi olan sert X-ışın salması belirlenmiştir (Ezuka et al., 1998). X-ışın tayfı $\sim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ gibi yüksek bir soğurmaya sahiptir ve güçlü Fe K_{α} salması gösterir (eşdeğer genişliği yaklaşık 420 eV).

Yansıma çizgileri beyaz cüce yüzeyinden, toplanma diskinin iç bölgelelerinden ya da bu ikisinin arasında kalan sınır tabakasından yansıyor olabilir. Geniş yansıma çizgisinin ise toplanma diskindeki yansıma ile gerçekleştiği düşünülmektedir (Ishida et al., 2009).

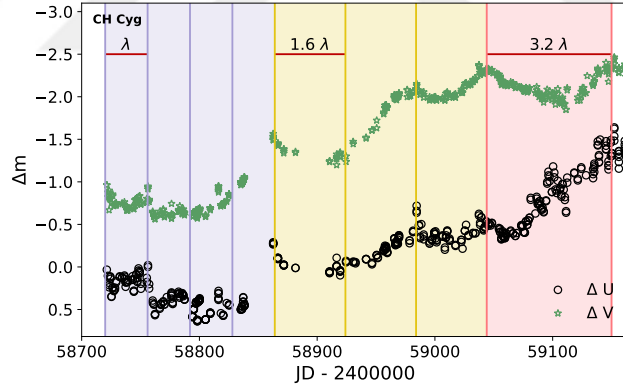
3.5.2 Optik Gözlemleri

CH Cyg sistemi TUG T60 teleskobu ile yaklaşık olarak 3.3 yıl boyunca gözlenmiştir (Bkz. Şekil 3.4). Grafikte farklı filtrelerdeki ışık eğrilerinin birbirine karışmaması için değerlere, $\Delta U+0$, $\Delta B+0.7$, $\Delta V+2.9$ ve $\Delta R+5.5$ şeklinde eklemeler yapılmıştır. Gözlemlerin hemen başında yaklaşık 2 kadirlik (U ve B filtresinde) bir parlama gerçekleşmiş, parlamanın maksimuma ulaşması yaklaşık 70 gün sürmüştür. Bunu takiben 35 günlük tekrarlayan küçük genlikli parlamalar gözlenmiştir. Özellikle U , B ve V filtresinde basamak

şeklinde kendilerini göstermektedir. Ek olarak, daha uzun dönemli değişimler belirlenmiştir.



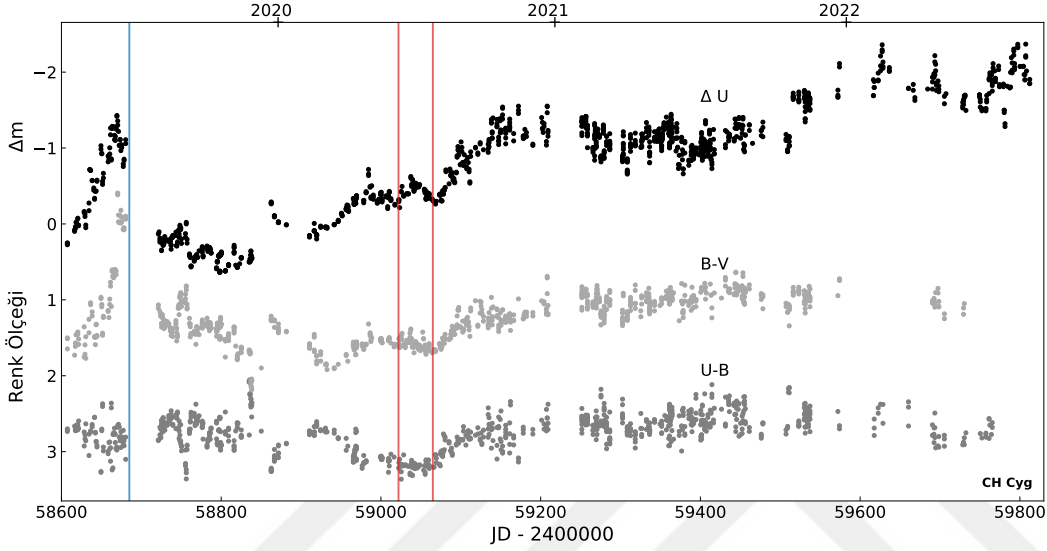
Şekil 3.4: CH Cyg'nin TUG T60 verileri ile elde edilmiş uzun zaman aralıklı ışık değişimi.



Şekil 3.5: Büyük parlama sonrası belli dönemlerde gerçekleşen küçük genlikli parlamalar. Renkli bölgelerin açıklaması için metne bakınız.

Değişimler başta ~ 35 günlük dönemlerle görülürken daha sonra artarak yaklaşık ~ 60 ve ~ 105 günlük değişimlere dönüşmüştür. Sistemin farklı zamanlarda elde edilen tayfsal gözlemlerinde de 20 gün (Skopal, 1986) ve 40 günlük (Skopal et al., 1987) değişimler belirlenmiştir. Disk üzerine aktarılan soğuk madde öncelikle diskin orta kısmı olan optikçe kalın tabakada maddenin birikmesine neden olur. Daha sonra madde diskin optikçe ince kısımlarına ulaşır. Şekil 3.5'te U ve V filtresi için bu değişimlerin bulunduğu zaman

aralığında ışık eğrileri gösterilmektedir. Şekilde sol bölge (mor) ~ 35 günlük dönemli değişimleri, orta bölge (sarı) 60 günlük ve sağ bölge (pembe) 105 günlük değişimlerin bulunduğu bölgelerdir. Şekil 3.5'ten görüleceği üzere $\lambda \sim 35$ gün olarak tanımlanmış zaman aralığıdır. Büyük parlama sonrası λ ve 1.6 katları şeklinde dönemli değişimler olduğu görülmüştür.



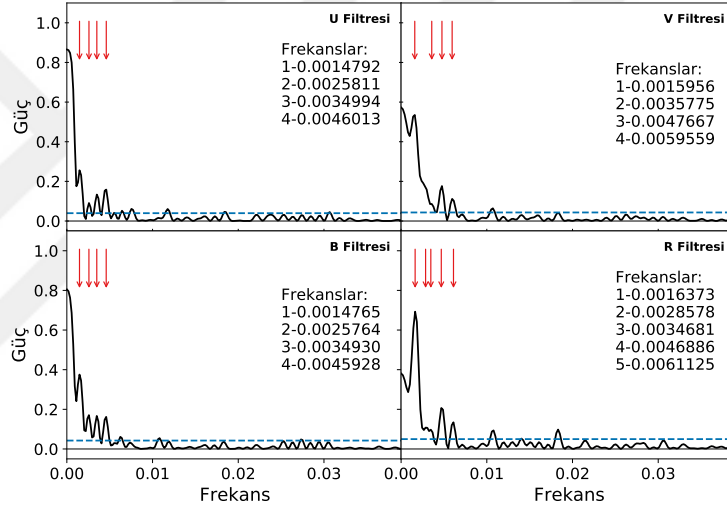
Şekil 3.6: CH Cyg'nin TUG T60 gözlemlerinin U bandı ışık değişimi ile $U - B$ ve $B - V$ renk değişimleri.

Şekil 3.6'da TUG T60 optik gözlemlerinin renk ölçekleri verilmiştir. Bu grafikte kolay kıyaslama yapılabilmesi için sadece $U - B$ verisine ekleme yapılmıştır: $U - B + 3$. Gözlem başında görülen 2 kadir genlikli parlamanın ($2458600 \leq JD \leq 2458685$) renk ölçeklerine baktığımız zaman $B - V$ genliğinin ~ 2 kadir olduğu, $U - B$ 'nin ise sabit bir ortalama değer etrafında dağıldığı görülmektedir. Daha sonra U filtresinin $2459020 \leq JD \leq 245965$ aralığında küçük genlikli bir parlama görülür. Bu parlamanın $U - B$ değeri tıpkı gözlem başındaki büyük genlikli parlama gibi sabit bir ortalama değer etrafında dağılır. Ancak $B - V$ ve ΔU parlaklık farkları kıyaslandığında gözlem başındaki parlamanın $B - V$ değişiminin ΔU 'dan daha fazla olduğu görülmektedir. $2459020 \leq JD \leq 245965$ zaman aralığında $U - B$ değeri genel değerden düşüktür ve ~ 0.2 civarındadır.

Uzun dönemli ışık eğrilerinin her bir filtresi için dönem analizi gerçek-

leştirilmiştir (dönem analiz yöntemi için Bkz. Bölüm 3.1). U ve B filtrelerindeki en baskın frekans değerleri sırasıyla ~ 1970 ve 2924 günlük bir dönem vermektedir. Dönem analizinin gözlemin başlangıcında görülen genliği yüksek parlamadan etkilendiği düşünülmektedir ve bu dönemlerle ilgili yorum yapılması için yeterli veri mevcut değildir. Bunların dışında bazı frekansların tüm filtreler için yakın değerde olduğu görülür.

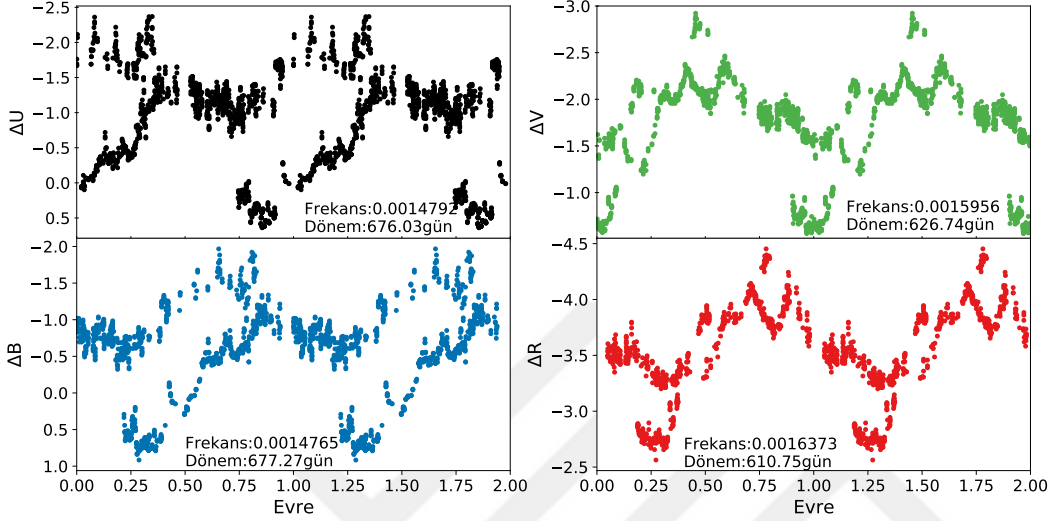
Büyük genlikli parlamanın dönem analizini etkilememesi için gözlemin başındaki parlama çıkarılarak dönem analizi tekrarlanmıştır. Sonuç olarak elde edilen güç tayfı diyagramı Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7: CH Cyg sisteminin gözlem başındaki büyük genlikli parlama ayıklandıktan sonra uygulanan dönem analizi sonucu elde edilen güç tayfı grafikleri. Oklar soldan sağa sırayla 1, 2, 3 ve 4 numaralı frekans değerlerinin yerini göstermektedir. Kesikli çizgi 5σ değerini ifade eder.

CH Cyg için önerilen ilk modellerde yörünge hareketi ve dönemine ilişkin 5700 gün dönemli bir değişim ve M dev yıldızının bünyesel hareketi için 756 günlük bir dönem önerilmiştir (Mikolajewski et al., 1990). İlgili çalışmada elde edilen ışık ögeleri zamani $JD_{min} = 2446275(\pm 75) + 5700(\pm 75) \times E$ olarak verilmektedir. Günümüz modelleri 756 günlük dönemsel değişimin dev yıldız ve beyaz cüce çiftinin yörünge dönemine, 5700 günlük dönemin ise sisteme çekimsel bağlı bir üçüncü yıldızın, simbiyotik çiftin kütle merkezi etrafındaki yörünge hareketine ilişkin olduğunu belirtmektedir. Tez çalışmasında evren-

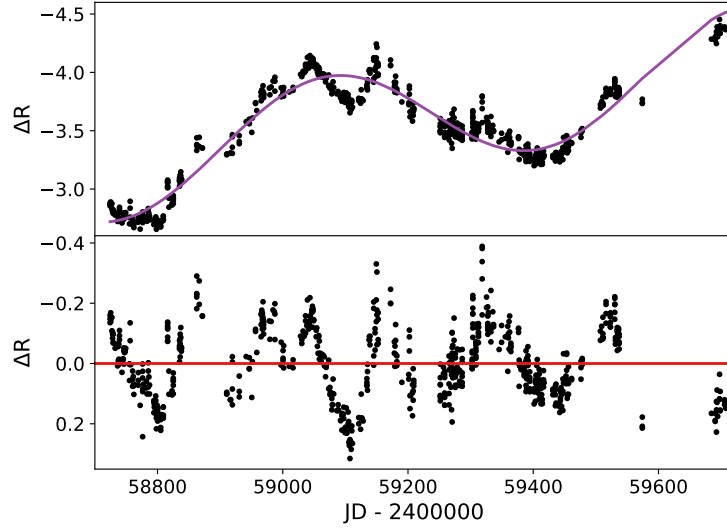
dirilmiş ışık eğrilerinde kullanılan T_0 zamanı için Iijima et al. (2019) tarafından elde edilen ışık öğeleri zamanındaki değer kullanılmıştır. Beyaz cücenin, M-türü dev yıldızın arka tarafında bulunduğu kavuşum zamanı için sunulan ışık öğeleri zamanı $JD_{conj} = 2446643.66 + 756.0 \times E$ 'dir.



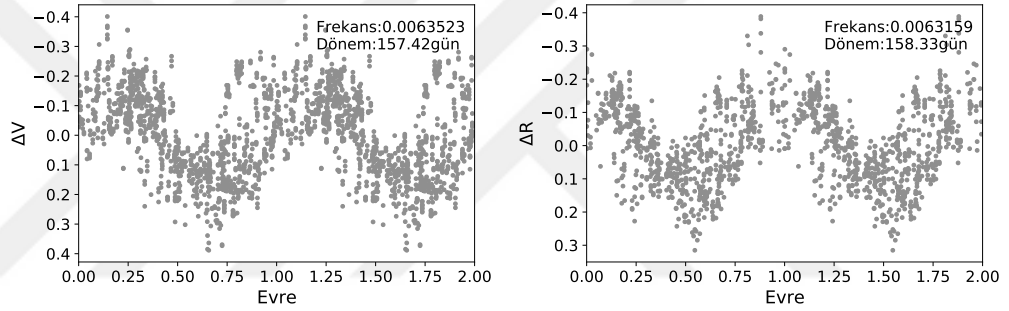
Şekil 3.8: CH Cyg'nin TUG T60 gözlemlerinden üretilen U , B , V ve R bandı için ışık eğrileri.

Dönem analizinde en belirgin değişimin dönemi U filtresi için 676.03 gün olarak belirlenmiştir. Frekans değeri U filtresi ($0.0014792 \text{ gün}^{-1}$) ve B filtresi ($0.0014765 \text{ gün}^{-1}$) için yakın değerdekken, V filtresi ($0.0015956 \text{ gün}^{-1}$) ve R filtresi ($0.0016373 \text{ gün}^{-1}$) için daha küçüktür (Bkz. Şekil 3.7). Bu frekansların evrelendirilmiş ışık eğrileri Şekil 3.8'de verilmektedir. Bu değerler yörünge dönemine en yakın hesaplanan değerlerdir. CH Cyg sisteminin TUG T60 gözlemleri yörünge döneminin yaklaşık 1.6 çevrimine karşılık gelir. Çevrim sayısı arttıkça bu dönem değişebilir. Öyle ki bu dönemin fiziksel kökeni hakkında bilgi vermek için yeni gözlemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Büyük genlikli değişimleri temizlemek için ışık eğrisine polinom fitleri uygulanmış ve bu fitler veri setinden çıkarılmıştır. Bu işlem veri setine iki kez uygulandı (Bkz. Şekil 3.9). Bu işlemden sonra R filtresinde ~ 158.33 günlük belirgin bir değişim elde edilmiştir (Bkz. Şekil 3.10). U , B ve V filtresinde elde edilen frekans değeri ~ 157.42 gündür. Değişimler V ve R filtresinde belirgindir.



Şekil 3.9: CH Cyg'nin uzun dönemli ışık eğrisine uygulanmış doğrusal sinüs fiti (üst panel). Elde edilen sinüs fitinden R gözlem verileri çıkartılmıştır (alt panel).



Şekil 3.10: CH Cyg sisteminin ~ 158 günlük (R filtresi) evrelendirilmiş ışık eğrisi. V filtresinde bu dönem ~ 157 gün elde edilmiştir.

3.5.3 X-ışın Gözlemleri

XMM-Newton Gözlemleri

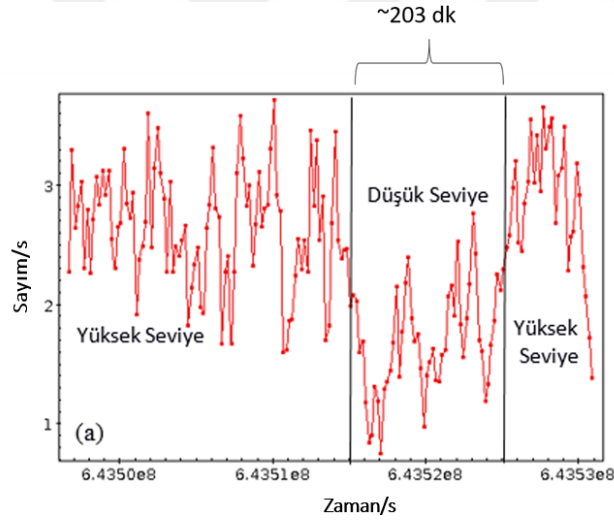
CH Cyg X-ışın tayfında belirgin iki salma yapısı gösteren β/δ -türü bir X-ışın kaynağıdır. Salma yapıları nedeniyle modellemek zordur. Wheatley and Kallman (2006) CH Cyg'nin X-ışın tayfını analiz ederken tayfı iki parçaya bölerek incelemiştir. Bu tez çalışmasında da aynı yöntemle başvurularak tüm enerji X-ışın tayfı yumuşak ve sert X-ışın tayfı olarak ayrı ayrı ele alınacaktır.

XMM-Newton arşivinde CH Cyg sistemine ait sadece bir gözlem zamanı bulunmaktadır (Mayıs 2018, Gözlem ID: 0830190801). Gözlem süresi yaklaşık ~ 36 ks'dir. Gözlem dar pencerede kalın filtrede gerçekleştirilmiştir.

Dar pencerede gerçekleştirildiğinden ve kaynak CCD'nin kenarına yakın olduğundan arka plan görüntüsü kaynağa yakın bir bölgeden alınmıştır.

3.5.3.1 X-ışın Işık Eğrisi

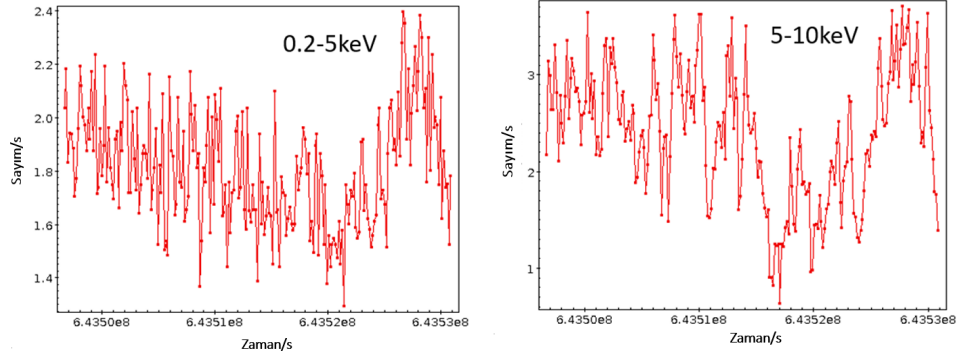
CH Cyg'nin X-ışın ışık eğrisinde ($0.2 - 12$ keV) inişli çıkışlı yapılar gözükmemektedir (Şekil 3.11). Gözlem başında X-ışın sayımları benzer seviyelerde devam ederken, sayımlar gözlemin ortalarında ani bir düşme göstermektedir. Ardından basamak yapılı bir artış görülmektedir. Bu artış sırasında iki tepeli yapı dikkat çekmektedir. Daha sonra X-ışın seviyesi tekrar gözlem başındaki seviyeye ulaşır ve tekrar ani bir düşüş gösterir. Bu nedenle ışık eğrisi Şekil 3.11'de görüldüğü gibi iki ayrı seviye ile tanımlanmıştır. Düşük seviye bölgesinin toplam gözlem süresi yaklaşık 3.5 saattir.



Şekil 3.11: CH Cyg sisteminin *XMM-Newton* 2018 gözleminin $0.2 - 12$ keV bandında X-ışın eğrisi.

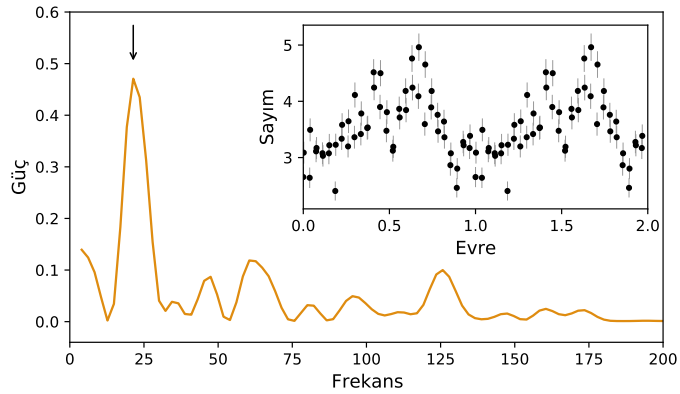
Işık eğrisindeki bu davranış nedeniyle ışık eğrisi farklı enerji ve zaman aralıklarında incelenmiş ve bu amaçla birçok enerji aralığına bölünmüştür: ($0.2 - 0.5$), ($0.5 - 2.5$), ($2.5 - 5$), ($2.5 - 10$), ($2.5 - 12$), ($5 - 7$), ($6 - 12$), ($7 - 10$) ve ($10 - 12$) keV. ($0.2 - 2.5$) ve ($10 - 12$) keV enerji aralıklarına düşen her bir enerji bandı kontrol edilmiş ve herhangi bir değişim gözlenmemiştir. ($2.5 - 10$) keV aralığında temel olarak flickering benzeri yapılar kendini göstermektedir. Bu enerji bandı daha küçük parçalara bölündüğünde ($5 - 7$) ve ($7 - 10$) keV bantlarının benzer davranışlar gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 3.12’de (2.5 – 5) keV (sol) ve (5 – 10) keV (sağ) bantlarına ait X-ışın ışık değişimleri görülmektedir.



Şekil 3.12: CH Cyg *XMM-Newton* 2018 gözleminin 0.2 – 5 keV (sol) ve 5 – 10 keV (sağ) enerji aralıklarındaki X-ışın ışık eğrileri.

X-ışın ışık eğrisi farklı enerji aralıklarına ayrıldığında tüm enerji aralığındakinden (0.2 – 12 keV) biraz daha farklı yapılar göstermektedir. 2.5 – 5 keV aralığında gözlemin başından ortasına doğru doğrusal bir azalma görülmektedir. Gözlemin ortasından itibaren başlayan iki tepeli yapı kendini bu enerji aralığında da gösterir. Ancak en belirgin görüldüğü enerji bandı 5 – 10 keV aralığıdır (Şekil 3.12 sağdaki grafik).



Şekil 3.13: CH Cyg’nin 2018 yılındaki *XMM-Newton* gözleminin 0.2 – 12 keV aralığındaki güç tayfı grafiği ve elde edilen 68 dk’lık değişim grafiği.

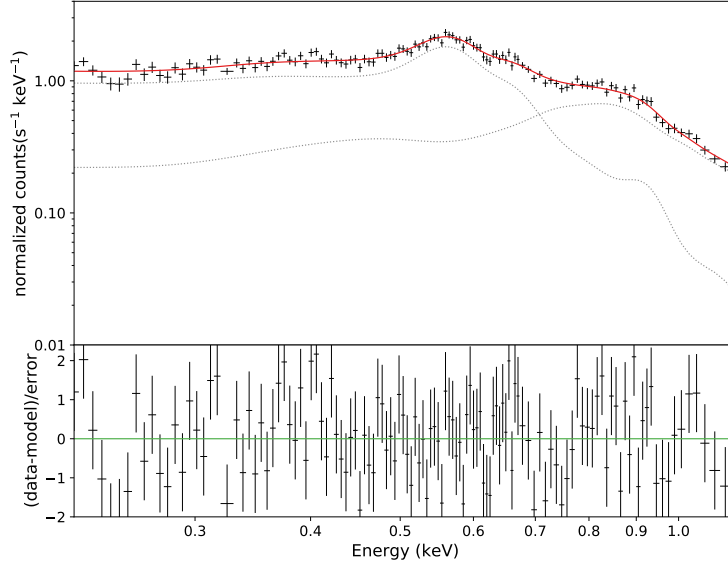
Işık eğrisinde dönemsel bir değişim olup olmadığını belirlemek için *astropy* paketi içindeki *Lomb Scargle Periodogram* kullanılmıştır. En belirgin değişim yaklaşık 0.34 günlük bir döneme sahiptir. Ancak gözlem süresi yaklaşık 0.41 gün (36100 saniye) olduğundan bu değişim gözlem süresi ile

ilişkili çıkmaktadır. Bir sonraki en belirgin frekans ~ 21.0415 gün $^{-1}$ 'dir (Bkz. Şekil 3.13'deki ok ile gösterilen yer). Bu frekans değeri ile dönemi ~ 68 dk'lık bir değişim belirlenmiştir. Şekil 3.13'de sağ üstteki kutucuk ~ 68 dk'lık değişim için evrelendirilmiş X-ışın ışık eğrisidir. Farklı enerji bantlarında ve farklı zaman aralıklarında çok benzer frekans değerleri elde edilmiştir.

Leahy and Taylor (1987) tarafından *EXOSAT* gözlemleri ile belirlenen 5-7 dk'lık flickering benzeri değişimler bu çalışmada belirlenmemiştir.

3.5.3.2 X-ışın Tayfı

CH Cyg sistemi en karmaşık X-ışın tayfına sahip olan simbiyotik sistemlerden biridir. Bu sistem hem yumuşak hem de sert X-ışın bölgesinde iki belirgin salma bileşenine sahiptir. Bileşenlere en uygun modelleri uygulayabilmek adına, salma bileşenlerinin tayfları ayrı ayrı incelenmiştir. Daha sonra modeller birleştirilerek tüm tayfa (0.2 – 15 keV bandına) uygulanmıştır.



Şekil 3.14: CH Cyg'nin *XMM-Newton* gözleminin modellenen yumuşak X-ışın tayfı (üst panel) ve modelle gözlem noktalarının sapma miktarı (alt panel). Gözlem noktaları hata barları ile birlikte verilmiştir. Üst panelde, sürekli çizgi model tayf çizgisinin gösterirken kesikli çizgiler model bileşenlerini ifade etmektedir.

Yumuşak X-ışın (0.2 – 1.2 keV) analizine başlangıçta tek sıcak plazma modeli *apec* ile başlanmıştır. Ancak CH Cyg'nin yumuşak X-ışın tayfının

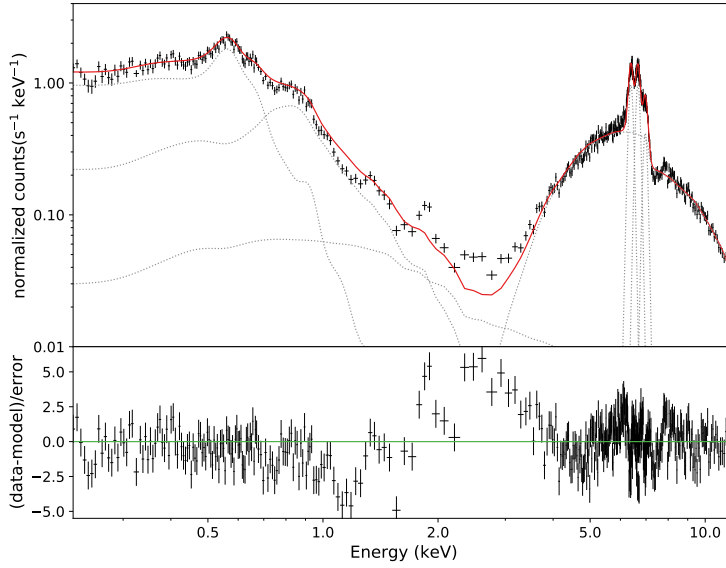
iki adet sıcak plazma bileşenine sahip olduğu belirlenmiştir ve **apec** model sayısı artırılmıştır. Böylece yumuşak bölge iki sıcak plazma modeli ile temsil edilmiştir. Elde edilen plazma sıcaklıkları sırasıyla 0.167 ± 0.003 ve 0.715 ± 0.013 keV'dir. **apec** modelini uygularken metal bolluğu standart güneş bolluğundan farklı elde edilmiş (0.101 ± 0.009) ve her iki **apec** modeli için bu değer sabitlenmiştir. Modellenen yumuşak X-ışın tayfı Şekil 3.14'te görülmektedir.

CH Cyg yakın bir kaynak olduğundan modeller galaktik kolon yoğunluğu serbest bırakılarak uygulanmıştır. **tbabs** soğurma modeli ile elde edilen n_H değeri $2.79 \pm 0.24 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ şeklindedir ¹³. Soğurma uygulanmış iki plazma bileşenine sahip bu model tayfin indirgenmiş χ^2 değeri 1.0832 (Null hipotez olasılığı yaklaşık % 25'tir).

CH Cyg'nin sert X-ışın bölgesinde (3 – 12 keV) oldukça belirgin bir salma ve ~ 6.4 keV civarında üçlü çizgi salması görülmektedir. Çizgilere ayrıntılı bakmadan önce tayfı genel olarak modelliyoruz. **tbabs** soğurmalı **apec** sıcak plazma ile modellenen tayfta elde edilen $n_H = 50.29 \pm 0.66 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ve $kT = 64 \pm 13.85$ keV'dir. Bu noktada elde edilen indirgenmiş χ^2 değeri hala güvenilir bir sonuç vermemektedir. Bunun nedeni tayfta baskın üçlü demir çizgisinin varlığıdır. Bu çizgiler **gauss** profilleri ile temsil edilerek çizgi bilgileri elde edilmiştir (Bkz. Bölüm 3.5.3.3).

Şekil 3.15 *XMM-Newton* gözleminin tüm enerji bandındaki modellenmiş X-ışın tayfını göstermektedir. Tüm enerji tayfında yumuşak ve sert X-ışın tayfını birleştiren bir köprü olduğu görülür. Aslında geçmiş çalışmalarda da yumuşak X-ışın tayfında sıcak plazma salmasını takip eden bir kuyruk yapısı olduğu belirtilmiştir. Leahy and Volk (1995) bu yapıyı kuvvet yasası modeli ile temsil etmiştir. Bu çalışmada da bu köprü kuvvet yasası (**power-law**) ile modellendi ve foton indeksi $\Gamma = 0.49 \pm 0.16$ olarak elde edildi.

¹³HEASARC arşivinde CH Cyg doğrultusundaki galaktik kolon yoğunluğu $5.95 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 'dir (HI4PI Collaboration et al., 2016).



Şekil 3.15: CH Cyg sistemine ait 2018 yılı *XMM-Newton* tüm enerji bandındaki (0.2 – 12 keV) X-ışın tayfı (üst panel) ve modelle gözlem noktalarının sapma miktarı (alt panel). Gözlem noktaları hata barları ile birlikte verilmiştir. Üst panelde, sürekli çizgi model tayf çizgisinin gösterirken kesikli çizgiler model bileşenlerini ifade etmektedir.

Yumuşak ve sert X-ışın bileşenlerinin modelleri daha sonra tüm enerji bandındaki tayf için birleştirilmiştir. Bunun sonucunda CH Cyg sisteminin *XMM-Newton* X-ışın tayfı, yüksek soğurmaya sahip ve güçlü üçlü demir çizgileri gösteren üç sıcak plazma bileşenine sahip çok bileşenli bir tayf olarak belirlenmiştir. Tayfa uygulanan modelin hata değeri indirgenmiş $\chi^2 = 2.065$ 'dir. Modellere ilişkin elde edilen parametre bilgileri Tablo 3.3'te yer almaktadır.

Tablo 3.3: CH Cyg sistemine ait 2018 yılı *XMM-Newton* X-ışın tayf model ve parametreleri. **Gaia* DR2'den elde edilen sistem uzaklığı $d \sim 205 \pm 3.6$ pc.

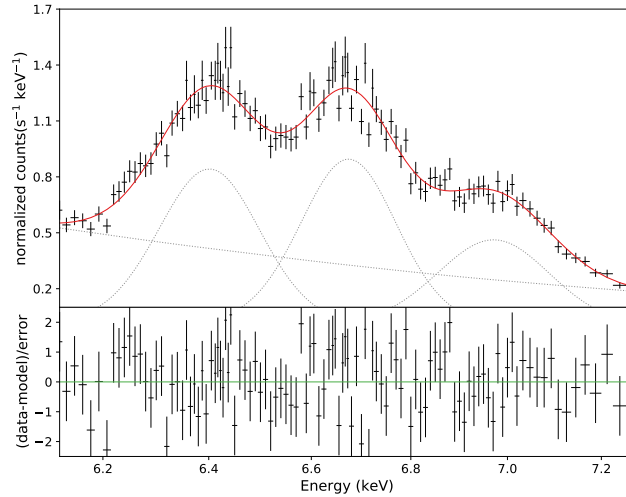
Gözlem Tarihi	χ^2	T_{apec1} (keV)	T_{apec2} (keV)	T_{apec3} (keV)	tbabs1 (10^{22}cm^{-2})	tbabs2 (10^{22}cm^{-2})	$F_X (\times 10^{11})$ ($\text{ergcm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$L_X (\times 10^{32})^*$ (ergs^{-1})
Mayıs 2018	2.065	0.167(3)	0.715(13)	64(14)	0.028(2)	50.29(66)	5.822	4.18

Aslında en başta tayf tüm enerji aralığında modellenmeye çalışılmıştır. Sert bölgedeki salma çizgileri nedeniyle modelleme mümkün olmamıştır. Ancak, 6.4 keV civarındaki demir çizgilerinin belirlenmesi ve sabitlenmesinden sonra modelleme gerçekleştirilmiştir.

3.5.3.3 Üçlü Demir Çizgisi

Sistemin sert X-ışın salma tayfında çok güçlü salma çizgileri kendini gösterir. Fe $K\alpha$ floresan çizgisi, 6.4 keV civarında yer alan nötr demir çizgisidir (Fe I). X-ışın tayfında sert salma bileşenine sahip RT Cru, T CrB, MWC 560 gibi diğer SySt’lerde de belirlenmiştir (Eze, 2014). Fe $K\alpha$ çizgilerinin yansıma kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Yansımanın beyaz cüce yüzeyinden ve/veya şok öncesi (pre-shock) toplanma kolonundan gerçekleşeceği düşünülmektedir (Ishida et al., 1994). Diğer çizgiler ise yüksek iyonlaşmış demir çizgileridir. He benzeri iyonlaşmış demir çizgisi ~ 6.67 keV’de yer alır (Fe XXV). H benzeri iyonlaşmış demir çizgisi ise ~ 6.97 keV civarındadır (Fe XXVI).

RGS tayfı dar ve X-ışının yumuşak bölgesinden alınan (slit tayfı) bir tayf olduğu için sert X-ışın bölgede bulunan demir çizgilerini inceleme imkanı vermez. Bu nedenle demir çizgilerinin analizi EPIC-pn verileri ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.16: CH Cyg’nin demir çizgilerinin model tayfı (üst panel) ve modelle gözlem noktalarının sapma miktarı (alt panel). Üçlü salma çizgileri sırasıyla Fe I, Fe XXV ve Fe XXVI’dır. Gözlem noktaları hata barları ile birlikte verilmiştir. Üst panelde, sürekli çizgi model tayf çizgisinin gösterirken kesikli çizgiler model bileşenlerini ifade etmektedir.

Bölüm 3.5.3.2’de bahsedildiği gibi modelleme sırasında ısısal plazma kaynakları için *apec* modeli kullanılmıştır. Ancak *apec* modeli ATOMDB ’den

çizgi bilgisi olarak çizgiyi modellemeye çalıştığından çizgi analizi sırasında bu model yerine sert X-ışın sürekli zemini için Bremsstrahlung (**bremss**) modeli kullanılmıştır. Demir çizgilerine odaklanmak için enerji aralığı daraltılmış ve çizgilere **gauss** profilleri uygulanmıştır. Sürekli zemin ve Gauss profilleri Şekil 3.16’da kesikli çizgilerle ifade edilmiştir. Demir çizgilerinin eşdeğer genişlik ve merkezi dalga boyları elde edilmiştir (Tablo 3.4). Elde edilen bilgiler doğrultusunda sert X-ışın bölgesi demir çizgileri sabitlenerek modellenmiştir. Sert X-ışın tayf bölgesi, yüksek *soğurmaya* sahip bir **apex** modeli ile uyumlu bir şekilde temsil edilmiştir (Bkz. Bölüm 3.5.3.2).

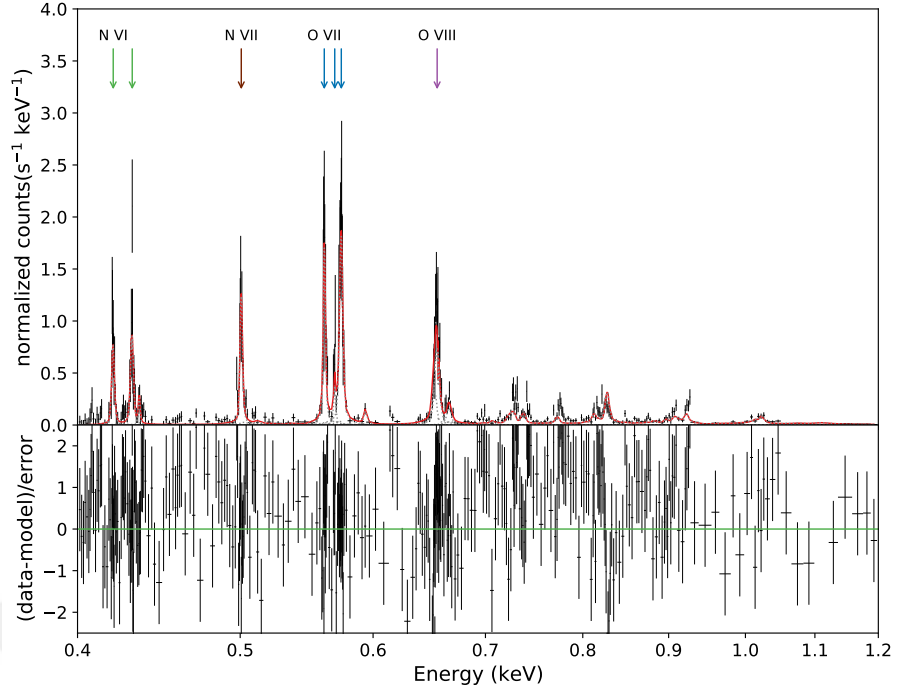
Tablo 3.4: CH Cyg’nin *XMM-Newton* X-ışın tayfındaki demir salma çizgilerinin merkezi dalga boyu ve eşdeğer genişlikleri. Parantez içindeki bilgiler son iki hane için hata değerlerini göstermektedir.

Çizgi Adı	Merkezi Dalgaboyu (keV)	Eşdeğer Genişlik (keV)
Fe I	$6.40144^{+(32)}_{-(12)}$	$0.291962^{+(19)}_{-(52)}$
Fe XXV	$6.67458^{+(16)}_{-(21)}$	$0.295776^{+(02)}_{-(01)}$
Fe XXVI $L\alpha$	$6.97254^{+(41)}_{-(22)}$	$0.267177^{+(54)}_{-(10)}$

CH Cyg’nin üçlü demir çizgileri *ASCA* gözlemlerinde de belirlenmiştir (Wheatley and Kallman, 2006). *ASCA* tayfında çizgiler ikili (dublet) haldedir. Mukai et al. (2007) çalışmasında incelenen *Suzaku* ve *Chandra* gözlemlerinde, floresan çizgileri diğer iki çizgiye göre daha güçlüdür. Gözlem sırasında soğurma ortamının yüksek iyonlaşması nedeniyle floresan çizgisinin daha parlak görünmesine neden olmuştur. Bu çalışmada, floresan (Fe I) ve He benzeri (Fe XXV) çizgilerin neredeyse benzer seviyelerde olduğunu görüyoruz.

3.5.3.4 RGS Tayfı

RGS (Reflection Grating Spectrometers) detektörü, 0.4–1.2 keV enerji aralığında yüksek çözünürlüklü çizgi tayflarını inceleme olanağı sunar. CH Cyg tayfı oldukça güçlü salma çizgilerine sahiptir. RGS verilerini analiz etmek için birinci ve ikinci mertebe (first and second order; RGS1 ve RGS2) tayflar birleştirilmiştir.



Şekil 3.17: CH Cyg'nin Mayıs 2018 *XMM-Newton* RGS tayfı (üst panel) ve modelle gözlem noktalarının sapma miktarı (alt panel). Ok işaretleri ilgili salma çizgilerinin yerlerini gösterir.

Tayfta çizgiler belirlenmeden önce süreklilik modellemesi yapılmıştır. Bunun için *soğurmalı mekal* modeli uygulanmıştır. EPIC-pn tayfının yumuşak X-ışın bileşeni modellenirken soğurma miktarı yukarıda elde edilen $n_H = 2.7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ değeri ile aynı alınmış ve bu değerde sabitlenmiştir. Daha sonra *gauss* profilleri salma çizgilerine tek tek uygulanmıştır. Elde edilen 0.4 – 1.2 keV aralığındaki RGS tayfı Şekil 3.17'de görülmektedir.

CH Cyg'nin RGS tayfının çizgi analizleri sonucunda güçlü iyonlaşmış azot (N) ve güçlü iyonlaşmış oksijen (O) çizgileri belirlenmiştir. 0.42 keV civarında N VI dublet ve 0.5 keV civarında N VII Ly- α çizgisi belirlenmiştir. Ayrıca, 0.57 keV civarında O VII He benzeri triplet ve 0.65 keV civarında O VIII Ly- α salma çizgisi belirlenmiştir. Çizgilerin eşdeğer genişlik ve maksimum dalgaboylarına ilişkin bilgiler Tablo 3.5'te verilmiştir.

Yumuşak bant aralığındaki O VII ve O VIII çizgileri yıldız rüzgârları ve gaz-toz yapılarının çarpışmasından kaynaklanır. O VII triplet çizgileri Tablo 3.5'te görüldüğü gibi sırasıyla 0.5600 (f), 0.5655 (i) ve 0.5720 keV (r)

Tablo 3.5: CH Cyg'nin *XMM-Newton* RGS tayfının çizgi analizi sonucu elde edilen merkezi dalgalaboyları ve eşdeğer genişlikleri.

Çizgi Adı	Merkezi Dalgalaboyu (keV)	Eşdeğer Genişlik (keV)	Çizgi Adı	Merkezi Dalgalaboyu (keV)	Eşdeğer Genişlik (keV)
N VI	0.419985	-	O VII	0.569250	0.0042005
N VI	0.431000	0.0218636	O VII	0.574321	0.0606816
N VII	0.500752	0.178825	O VII	0.594140	0.374877
			O VIII	0.654960	0.116621

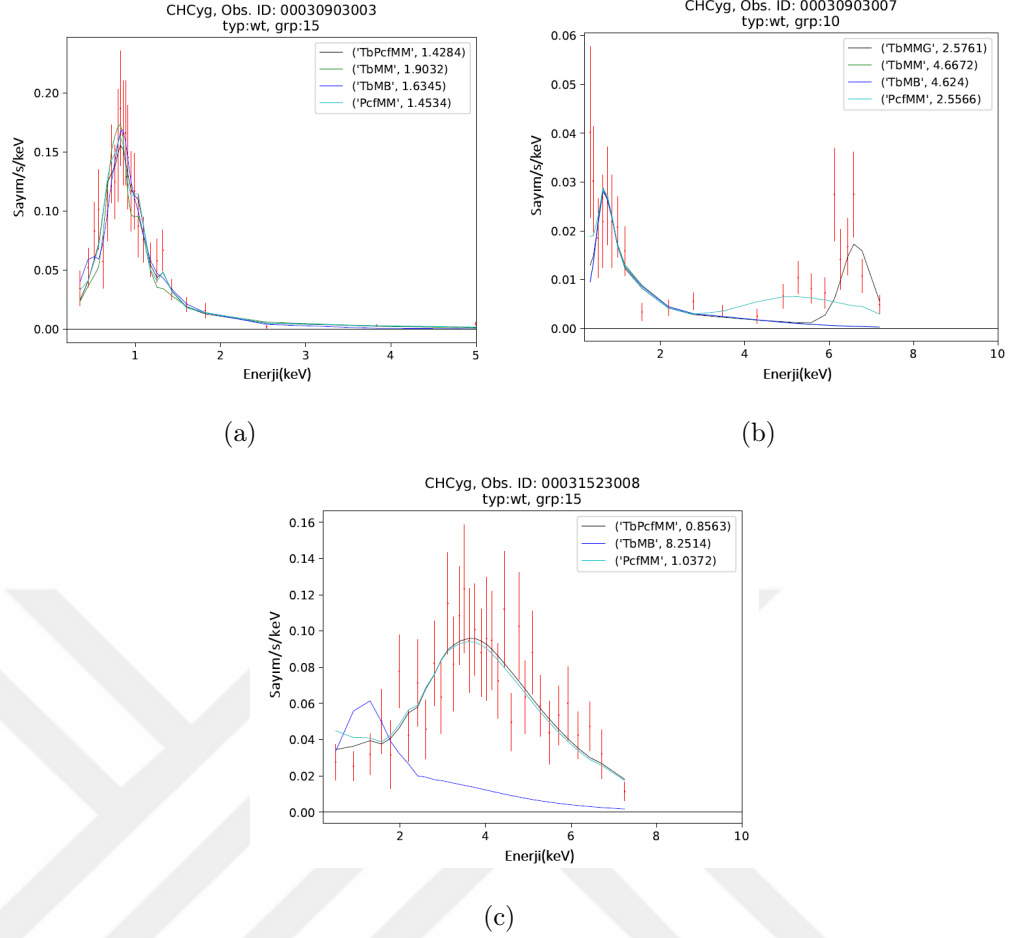
civarında yer alır¹⁴. Çizgi oranları plazma kaynağı hakkında bilgi vermektedir. Şekil 3.17'deki O VII çizgileri incelendiğinde akı şiddetlerinin $r > f > i$ olduğu görülür. Diğer çizgilere oranla rezonans çizgisinin baskın olması çarpışma baskın plazma kaynaklıdır (Porquet and Dubau, 2000). Çarpışma baskın plazma modelinde, atomlar elektron çarpışması ile iyonlaşır. Bu elektronlar dış bir kaynak tarafından ısıtılarak serbest hale gelmişlerdir. Uyarılma süreci elektron çarpışması ile yönetilirken, yeniden uyarılma süreci kendiliğinden salma ile gerçekleşir.

Swift Gözlemleri

Swift arşivinde CH Cyg sistemine ait 24 adet gözlem verisi bulunmaktadır (Bkz. Tablo 3.1). Ancak, bazı gözlemlerde ön indirgeme için gerekli bazı dosyaların bulunmaması ya da gözlemlerin foton sayım değerlerinin yetersiz olması nedeniyle gözlemlerin sadece 18 tanesi analiz edilebilmiştir. Tayf analizleri sonucunda sistemin 3 farklı tayf davranışı gösterdiği görülmüştür (Bkz. Şekil 3.18). Şekil 3.18(a)'da 0.2 – 2 keV aralığında baskın bir salma görülürken, (b)'de bu salmanın azaldığı ve ~6.4 keV civarında bir salmanın oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 3.18(c)'de ise diğer davranışlardan oldukça farklı olarak baskın salmanın 2 – 6 keV aralığında gerçekleştiği görülmüştür.

CH Cyg'nin *Swift* gözlemleri yaklaşık 2 yıllık bir zaman aralığını kapsamaktadır. Tablo 3.6 *Swift* gözlemlerinin X-ışın tayf analizi sonucunda

¹⁴Burada f, i ve r sırasıyla yasaklı (forbidden), kombinasyon (inter-combination) ve rezonans (resonance) çizgilerini ifade eder.



Şekil 3.18: CH Cyg sisteminin farklı zamanlarda alınmış *Swift* X-ışın tayflarındaki 3 farklı davranışı. Grafiklerin üstündeki başlıklar gözlem numarasını (Obs. ID), gözlem modunu (typ) ve verilerin gruplanma sayılarını (grp) gösterirken, grafikteki sağ üst kutucuk tayfa uygulanan deneme modellerinin kısaltması ve indirgenmiş χ^2 değerlerini içermektedir.

elde edilen en uyumlu modellerine ait parametreleri göstermektedir. Tabloda galaktik kolon yoğunluğu ("Tb":tbabs) $n_H = 6.04 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ alınarak sabitlenmiştir. Ek olarak, bazı gözlemlerde soğurma miktarının arttığı görülmüş ve bunun için parçalı soğurma modeli ("Pcf":pcfabs) kullanılmıştır. Genel olarak CH Cyg'nin *Swift* X-ışın tayfları *soğurmali* iki sıcak plazma kaynağı göstermektedir.

Elde edilen X-ışın tayflarında 3 farklı davranışın görülmesi, beyaz cüce üzerine düşen madde ve yıldızı saran simbiyotik bulutsu yapının durumu hakkında bilgi vermektedir. Şekil 3.18'de verilen tayfların gözlem tarihleri

sıralandığında $(a) < (b) < (c)$ olduğu görülür. Başlangıçta yumuşak X-ışın kaynağı baskın durumdadır. Daha sonra X-ışın tayfında hem yumuşak hem de sert X-ışın bölgesinde iki salma bileşeni göstermiştir. Sert X-ışın salma bileşeni ~ 6.4 keV civarındaki Fe $K\alpha$ floresan çizgisidir. Daha sonra ~ 4 keV civarında baskın X-ışın salması görülmektedir. Özetle yumuşak X-ışın bölgesindeki baskın salmanın bir kısmı zamanla sert X-ışın üretimine daha sonra da orta bant aralığındaki X-ışın üretimine kaymaktadır.

Tablo 3.6: CH Cyg sistemine ait *Swift* gözlem verilerinin analizi sonucunda elde edilen bazı parametreler. “ F ” ile gösterilen parametreler verilen X-ışın enerji aralığındaki erg/s/cm^2 biriminden akı ve L_x ile gösterilen parametre de erg/s biriminden X-ışın ışımasıdır.

Gözlem No	Poz Süresi (s)	MJD	Model	Red_chi	Pcf_nH	F1(0.2-2.5)	F2(0.2-10.)	F5(5.-10.)	Lx(0.2-10)
30903001	1985.334903	54166.83771	TbPcfMM	0.727325718	1.178796223	1.41131E-12	1.77093E-12	1.26526E-13	1.27189E+31
30903002	3042.071987	54169.79612	TbMB	0.930579027	-	2.64079E-12	2.77251E-12	5.53434E-15	1.99123E+31
30903003	3213.00817	54187.20547	TbPcfMM	1.075436008	0.726738287	2.23353E-12	3.52948E-12	8.07741E-13	2.5349E+31
30903004	3021.062103	54194.04709	PcfMM	1.121025495	1.42405596	2.71337E-12	2.85136E-12	7.37503E-15	2.04787E+31
30903005	2949.674244	54201.06783	PcfMM	0.983793806	1.491614203	2.27712E-12	2.32426E-12	5.77465E-16	1.6693E+31
30903006	2954.915042	54208.03033	TbMB	1.091881635	-	2.30382E-12	2.34552E-12	5.77747E-16	1.68457E+31
30903007	3306.080839	55049.02493	TbMMG	1.546259188	-	6.11794E-13	6.35775E-12	5.38456E-12	4.56618E+31
31523001	1007.866082	55124.10777	PcfMM	1.143508136	2.767231909	4.67187E-12	4.83341E-11	2.9247E-11	3.47139E+32
31523002	1087.968834	55125.12277	TbPcfMM	1.515994254	3.44812008	2.64478E-12	4.25076E-11	2.71661E-11	3.05292E+32
31523003	1082.980421	55126.98741	PcfMM	1.488259614	5.411931361	2.73179E-12	5.35255E-11	3.59532E-11	3.84424E+32
31523004	896.2502412	55127.12084	TbPcfMM	1.324842504	6.739305273	1.70417E-12	2.7289E-11	1.70594E-11	1.95992E+32
31523005	1030.016761	55128.05965	PcfMM	0.967995587	4.974144985	1.21145E-12	2.37134E-11	1.57991E-11	1.70311E+32
31523006	1029.391548	55129.00255	PcfMM	1.940094959	7.046656557	3.95858E-12	9.57667E-11	6.68036E-11	6.87803E+32
31523007	1546.453206	55129.93583	PcfMM	1.47606161	4.118349751	3.62033E-12	6.15218E-11	3.99725E-11	4.41853E+32
31523008	1134.714887	55131.15011	PcfMM	1.037162698	5.687310941	2.59427E-12	5.55035E-11	3.76357E-11	3.9863E+32
31523009	1263.544908	55132.15561	TbPcfMM	1.719744133	4.931795083	3.40382E-12	5.16505E-11	3.17628E-11	3.70958E+32
31523010	622.95121	55133.62671	TbPcfMM	1.341533555	6.497722131	2.36469E-12	5.15561E-11	3.53846E-11	3.70279E+32
31523012	3573.624426	55338.4069	TbMB	1.499937126	-	5.47762E-13	8.6523E-13	1.16087E-13	6.21414E+30

3.6 CI Cygni

3.6.1 Tarihçe

CI Cyg ilk keşfedilen simbiyotik sistemlerden biridir. 21 Ekim 1992 tarihinde Harvard Gözlemevi’nde elde edilen bir fotoğrafik tayfta Annie Jump Cannon tarafından sıra dışı bir cisim olarak tespit edildi (Bkz. Shapley, 1922). Daha sonra yıldızın RS Oph yıldızı ile benzer, tekrarlayan nova benzeri parlamalar gösterdiği belirlenmiştir (Shapley, 1922). Kenyon et al. (1991) moröte gözlem verilerini inceleyerek sıcak bileşenin kütlesini $0.5 M_{\odot}$ olarak belirlenmiş ve toplanma diskine sahip bir anakol yıldızı olarak önermiştir.

Ancak günümüzdeki yaygın düşünce sıcak bileşenin bir beyaz cüce olduğudur (Siviero et al., 2009). Sistemin soğuk bileşeni ise M5.5 III türü bir dev yıldızdır (Mürset and Schmid, 1999). Dev yıldızın Roche lobunu tamamen ya da neredeyse doldurduğu düşünülmektedir (Mikołajewska et al., 2003). Dev yıldızdan sıcak bileşene madde transferinin ana kaynağının RLOF olması beklenmektedir. Sistemin tayf gözlemlerinden elde edilmiş yörünge dönemi yaklaşık 853.8 ± 2.9 gündür (Fekel et al., 2000b).

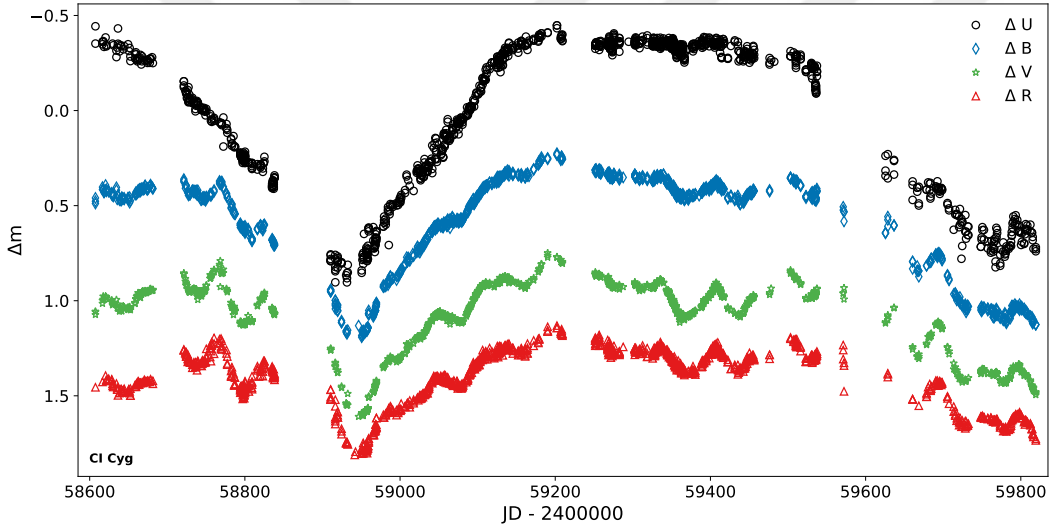
CI Cyg'nin optik tayf analizlerini yapan Kenyon et al. (1991), sistemde iki adet bulutsu bölgesi bulunduğunu önermiştir: (1) Toplanma gösteren cismin Roche lobunun içinde yer alan sıkışık bir bulutsu (compact nebula) ve (2) diskin toplanma düzlemine dik bipolar formda çarpışmalı iyonize düşük yoğunluklu bir bulutsu. Skopal (2005) bazı S-türü SySt'ler için yaptığı çok renk optik ve kızılöte çalışmasında diskin hemen altı ve üstünde tutulmaları etkileyebilecek düşük sıcaklığa sahip bulutsu varlığını önermektedir.

CI Cyg sistemi 30 yıllık sakin evrenin ardından 2008-2009 yıllarında şiddetli bir parlama evresi geçirmiştir (Siviero et al., 2009). İlgili çalışmada patlamanın ilk 200 gününde sıcak bileşenin yüzeyinde gerçekleşen nükleer yanma sonucu yaklaşık $\sim 10^{44}$ erg'lik bir enerji salması gözlenmiştir (madde transfer hızı yaklaşık $2 \times 10^{-8} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$). Sakin evrede beyaz cüce yüzeyinde hidrojen yanması gerçekleşirken, patlama sırasında kütle toplanma hızı artmaktadır. Bunun sonucunda beyaz cüce etrafındaki zarf genişler ve soğur (F3 II/Ib, $T_{\text{etkin}} \sim 6900 \text{ K}$, $R = 28 R_{\odot}$) (Siviero et al., 2009).

Sekeráš et al. (2019) CI Cyg sistemi için yaptığı fotometrik çalışmada şunlara değinmiştir: Sistem 2012'nin sonunda çift tepeli bir parlama göstermiştir. Daha sonra sakin evreye geçmiş ve 2015-2018 arasındaki geniş minimumların yeri bir miktar farklılık göstermiştir. Bu sırada ikinci minimumlar 0.6 evrede yer almaktadır. Tez çalışması kapsamında TUG T60 teleskobu ile gerçekleştirilen gözlemler, Sekeráš et al. (2019) çalışmasındaki uzun zaman aralıklı ışık eğrilerini neredeyse zamansal olarak takip eder.

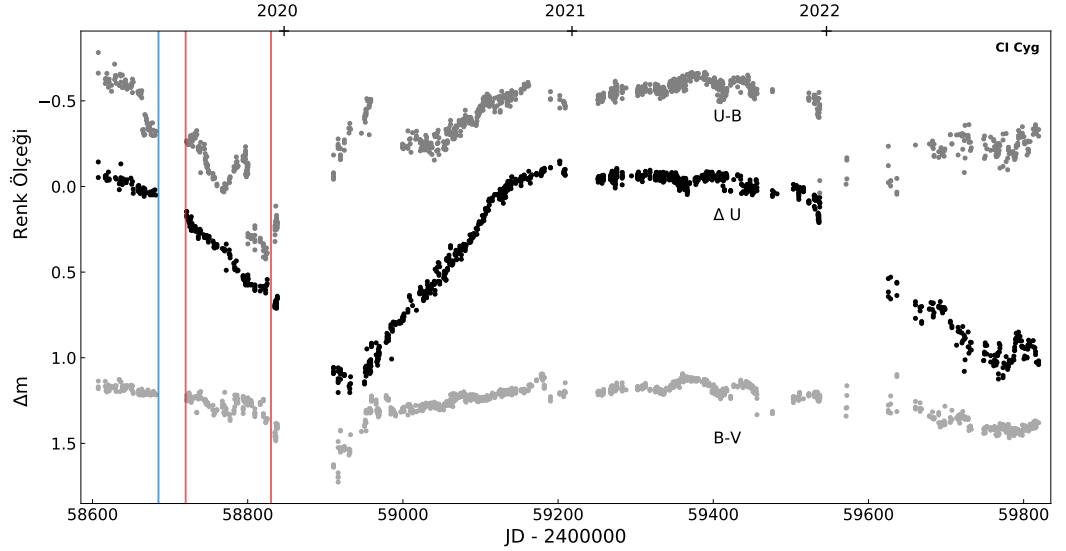
3.6.2 Optik Gözlemler

CI Cyg sisteminin uzun zaman aralıklı ışık eğrisi Şekil 3.19’de yer almaktadır. TUG T60 teleskobu ile elde edilen bu ışık eğrisi yaklaşık 1212 günlük zaman aralığına yayılır. Daha iyi karşılaştırmak için farklı filtrelerdeki parlaklık farklarına uygun sabit sayılar eklenmiştir: $\Delta U + 0$, $\Delta B + 0.15$, $\Delta V + 1.9$ ve $\Delta R + 3.5$. Işık eğrisinde küçük değişimlerin yanı sıra tutulma kaynaklı derin ışık kayıpları görülmüştür. Parlaklık değişimi en çok U filtresinde görülmüştür ve genliği ~ 1.5 kadirdir. Tüm filtreler için genlik büyüklükleri $\Delta U > \Delta B > \Delta V > \Delta R$ şeklinde bir sıra takip eder.



Şekil 3.19: CI Cyg’nin TUG T60 verileri ile elde edilen uzun zaman aralıklı ışık değişimi.

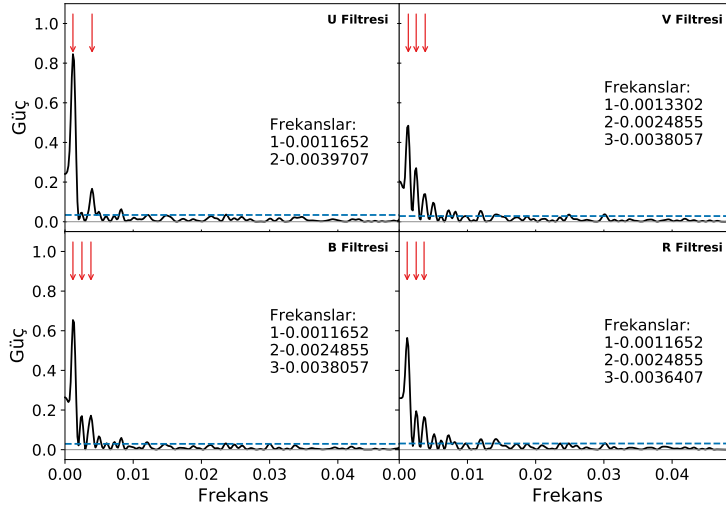
Gözlemin başlangıcından itibaren ışık eğrisinde derin bir parlaklık azalması görülmüştür. Bu azalmanın kaynağı sıcak bileşenin kırmızı dev bileşen tarafından örtülmeye başlamasıdır. Tutulmanın iniş kolu ile çıkış kolunun maksimum değerleri arasındaki geçen zaman U filtresi için yaklaşık 600 gündür. Tutulma minimum zamanı $JD_{min} \approx 2458945$ civarında belirlenmiştir. Daha sonra yaklaşık $JD \approx 2459600$ civarında yeni bir tutulma başlangıcı gözlenmiştir. Işık eğrisinde tutulma kaynaklı büyük genlikli parlaklık değişimlerin yanı sıra küçük genlikli değişimler de görülmektedir.



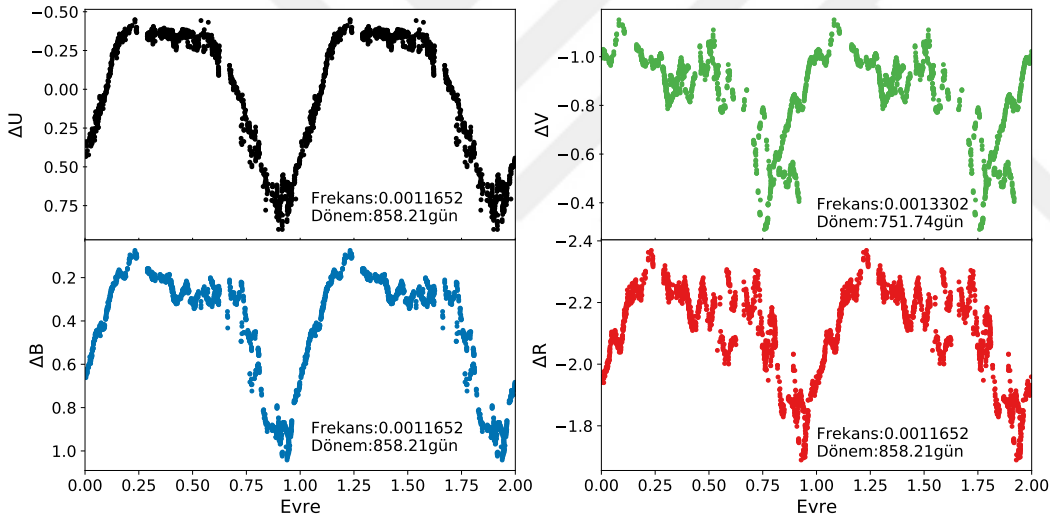
Şekil 3.20: CI Cyg sisteminin U bandı ışık değişimi ile $U - B$ ve $B - V$ renk değişimleri.

Şekil 3.20’de optik gözlemlerin renk ölçekleri verilmiştir. Burada, daha iyi bir kıyaslama için sadece U filtresi verisine ekleme yapılmıştır: $\Delta U + 0.3$. Gözlem başlangıcından itibaren ışık eğrisinde tutulmanın başladığı görülmektedir. Gözlemin başlangıcından mavi çizgiye (1. çizgi) kadar $B - V$ ’nin neredeyse sabit ilerlediği ancak $U - B$ ’deki değişimde ani düşmeler gösterdiği belirlenmiştir. Buna benzer bir davranış kırmızı çizgiler (2. ve 3. çizgi) arasında da görülmüştür ($2458720 \leq JD \leq 2458830$). İkinci tutulmanın başlangıcında $U - B$ ’de ani ancak devam eden bir düşüş gözlenirse de ($JD \sim 2459535$), tutulmanın devamında birinci tutulmanın iniş kolunda görülen zikzaklı iniş ve çıkışlar burada görülmemiştir.

TUG T60 gözlemlerinin her bir filtresi için ayrı ayrı dönem analizi uygulanmıştır. Dönem analizi sonucunda elde edilen güç tayfları ve elde edilen en baskın frekans değerleri Şekil 3.21’de verilmiştir. En baskın frekans yörünge dönemine denk gelen frekans olarak belirlenmiştir (Bkz. Şekil 3.22). U , B ve R filtrelerinde ~ 858.21 gün, V filtresinde ise ~ 751.74 günlük dönem değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.21’deki 1. frekans değerleri). Yörünge döneminden ayrı olarak ~ 402 ve ~ 252 gün civarında dönemler de tespit edilmiştir. Işık eğrilerinin evrelendirilmesinde $JD_{Ecl.} = (2441838.8 \pm 1.3) + (852.98 \pm 0.15) \times E$ ışık öğeleri zamanı kullanılmıştır (Skopal et al., 2012).

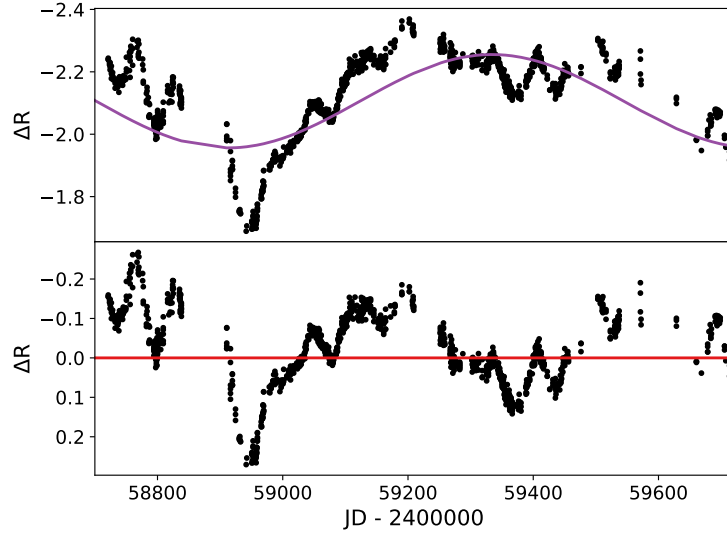


Şekil 3.21: CI Cyg sisteminin TUG T60 verilerinin frekans analizi sonucu elde edilmiş güç tayfları. Oklar soldan sağa sırayla 1, 2 ve 3 numaralı frekans değerlerinin yerini göstermektedir. Kesikli çizgi 5σ değerini ifade eder.

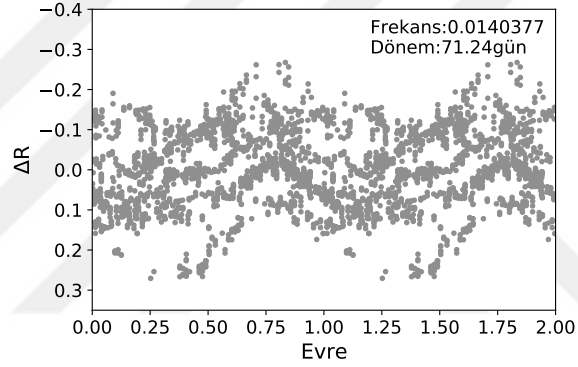


Şekil 3.22: CI Cyg cisminin yörünge dönemine göre evrelendirilmiş ışık eğrileri.

Büyük genlikli değişimleri eleayabilmek adına ışık eğrisine sinüs fiti uygulanmış ve veri setinden çıkarılmıştır. Şekil 3.23’de R filtresi için uygulamanın örneği verilmiştir. Büyük genlikten arındırılmış ışık eğrisine (Bkz. Şekil 3.23’deki alt panel) tekrar dönem analizi uygulanmış ve daha kısa süreli değişimler belirlenmiştir. Tüm filtrelerde ~ 71 günlük bir değişim elde edilmiştir (Bkz. Şekil 3.24). Sekeráš et al. (2019) çalışmasında V filtresi ışık eğrisinde ~ 73 günlük bir dönem belirlenmiştir.



Şekil 3.23: CI Cyg'nin uzun dönemli ışık eğrisine uygulanmış polinom fitleri.

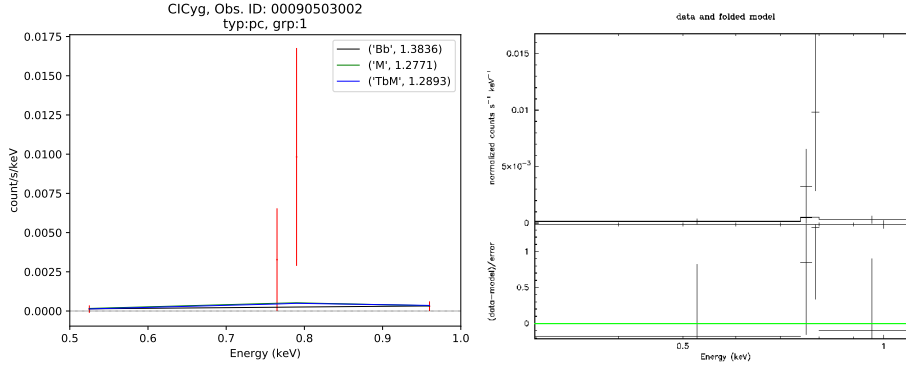


Şekil 3.24: CI Cyg sisteminin ~ 71 gün dönem ile evrelendirilmiş ışık eğrisi.

3.6.3 X-ışın Gözlemleri

CI Cyg sisteminin *XMM-Newton* arşivinde herhangi bir gözlem bilgisi bulunmamaktadır. *Swift* veri tabanında ise 12 adet gözlem verisi mevcuttur. Bunlardan yalnızca birinde işlenebilir veri bulunmaktadır.

Gözlem numarası 00090503002 olan bu gözlem 8 Haziran 2010 tarihinde yapılmıştır. Gözlemin poz süresi 10180 saniye civarındadır. Bu nedenle verileri gruplama ihtiyacı duyulmamıştır (grup numarası 1 alınmıştır). X-ışın tayfına 3 farklı model uygulanmıştır. Şekil 3.25'de uygulanan modeller görülmektedir. Bu modeller `blackbody(Bb)`, `mekal(M)` ve `tbabs*mekal(TbM)` şeklindedir.



Şekil 3.25: CI Cyg sisteminin *Swift* tarafından yapılmış 00090503002 gözlemine ait X-ışın tayfı. Sol grafik 00090503002 gözlemine uygulanan 3 farklı modelin fitlerini ve indirgenmiş χ^2 değerlerini göstermektedir (model kısaltmaları ve χ^2 değerleri sağ üst kutucukta yer almaktadır), sağdaki grafik ise **mekal** modelinin veri seti üzerindeki model fitini göstermektedir.

blackbody modeli (Bb modeli) $kT \sim 0.4631$ keV civarında bir karacisim sıcaklığı vermektedir. Uygulanan bu modelin indirgenmiş χ^2 değeri 1.3836'dır.

CI Cyg X-ışın tayfında tek sıcak plazma salması belirlenmiştir. Sadece **mekal** modeli uygulanan bu tayftan elde edilen plazmanın sıcaklığı $kT \sim 0.5381 \pm 0.0054$ keV'dir. Modelin indirgenmiş χ^2 değeri 1.2771'dir (Null hipotez olasılığı taklaşık %28'dir). Ek olarak, bu modele galaktik kolon yoğunluğu eklenmiştir. Soğurma modelinde galaktik kolon yoğunluğu $3.46 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}$ alınarak sabitlenmiştir¹⁵. Bu model sonucunda plazma sıcaklığı yaklaşık $kT \sim 0.3402 \pm 0.0034$ keV olarak elde edilmiştir. Gözlem noktası az olduğundan model sayısını artırmak indirgenmiş χ^2 değerini artırmıştır. Aslında bu gözlemden veri sayısının az olması ile birlikte verilerin sayım değeri hatalarının fazla olması modellemeyi zorlaştırmaktadır. Yine de, plazma sıcaklığını elde etmek adına tek sıcak plazma kaynağı gösteren modele burada yer verilmiştir. Uygulanan model sonucunda elde edilen parametreler Tablo 3.7'de verilmektedir.

¹⁵Bu değer HEASARC arşivinden elde edilmiştir ve CI Cyg doğrultusundaki galaktik kolon miktarıdır.

Tablo 3.7: CI Cyg sisteminin *Swift* 00090503002 numaralı gözleminin X-ışın tayf analizi sonucunda elde edilen bazı parametreler. “*F*” ile gösterilen parametreler verilen X-ışın enerji aralığındaki erg/s/cm² biriminden akı ve L_x ile gösterilen parametre erg/s biriminden X-ışın ısıtmasıdır.**Gaia* DR2’den elde edilen sistem uzaklığı $d = 1.7871 \pm 0.1467$ kpc.

Gözlem Adı	Poz Süresi (s)	MJD	Model	χ^2	$F_x(0.2-2.5\text{keV})$	$F_x(0.2-10\text{keV})$	$F_x(5-10\text{keV})$	$L_x(0.2-10\text{keV})$
90503002	10178.92	55355.2	M	1.277066	5.90E-15	5.93E-15	2.58E-19	3.14E+30

3.7 Z Andromedae

3.7.1 Tarihçe

Z Andromedae (Z And) sistemi simbiyotik yıldızların prototip sistemlerinden biridir. Sistemin tuhaf tayf özellikleri ilk kez 1901 yılında Williamina Fleming tarafında keşfedilmiş ve duyurulmuştur (Pickering, 1901). Bu sistemin ilk fotometrik gözlemleri ise 1887 yılına kadar dayanmaktadır (Bkz. Cannon et al., 1911). Optik ışık değişimlerinde sakın evrede yaklaşık 0.2-0.5 kadir ve aktif evrelerinde ise ani ve yaklaşık 2-3 kadirlik optik parlamalar gözlenir. *Gaia* DR2’den elde edilen sistem uzaklığı $d = 1.9521 \pm 0.1081$ kpc’tir.

Simbiyotik sistemlerin sakın evredeki optik tayflarında tipik olarak gözlenen TiO soğurma bantları ve belirgin H I, He II, [Ne V], ve [Fe VII] salma çizgileri görülür. Patlama sırasındaki tayfında ise bulutsu salma çizgileri ve M türü soğurma bantlarından ziyade A türü yıldızlara ait soğurma yapıları görülmektedir. Aslında bu davranış simbiyotik sistemlerin karakteristik özelliğidir (Kenyon, 1986).

Z And, optik değişimlerle güçlü manyetik bir beyaz cüceye sahip olduğu bilinen tek sistemdir. Sokoloski and Bildsten (1999) dönemi 1682 ± 0.6 saniye olan tekrarlı salınımlar belirlenmiştir. Bu salınımlar, beyaz cücenin dönme dönemini vermektedir. Ayrıca, eşevreli parlaklık değişimleri simbiyotik sistemlerde manyetik toplanmaya ilişkin bir göstergedir.

Sistemin yörünge dönemi yaklaşık olarak 759 gündür. Sakın evrede yapılan tayf gözlemleri yörünge dönemi ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Bu

değişimler baş yıldız olan kırmızı devin¹⁶ yörünge hareketi ile uyumludur. Ayrıca 656 gün dönemli oldukça parlak değişimler de görülmektedir (Formigini and Leibowitz, 1994). Bu değişimin sebebi sistemin parlaması sırasında yarı periyodik titreşimler göstermesidir. Z And gibi CI Cyg ve AX Per sistemleri de parlamalar sırasında benzer titreşimler göstermektedir. Bu üç sistemin de ışık eğrisi kataklismik değişenlerin bir alt türü olan SU UMa sınıfında görülen superhumplara benzer yapılar gösterir (Mikolajewska and Kenyon, 1992). Ancak, simbiyotik sistemlerdeki ışık değişimlerinin şiddeti SU UMa türündekilerden daha büyüktür.

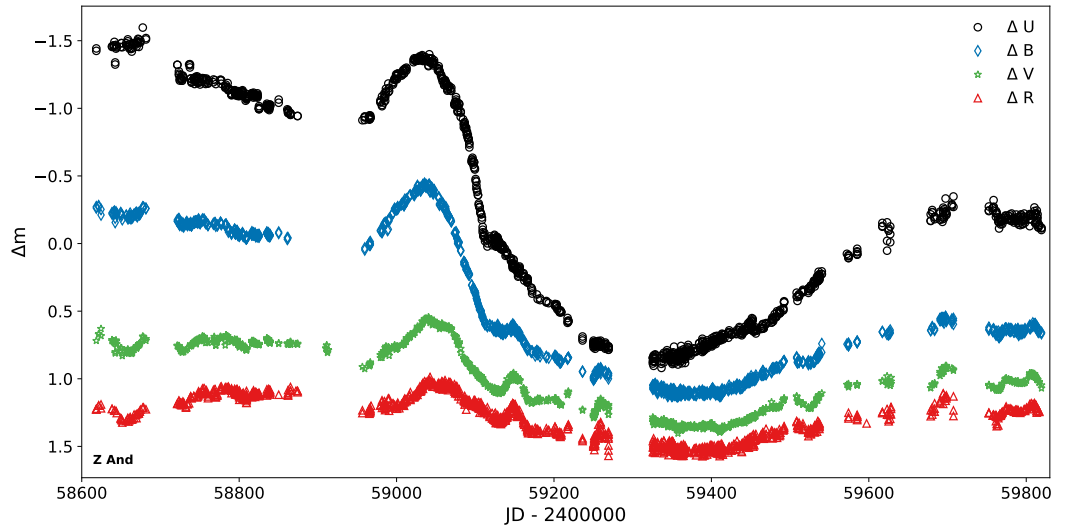
Sokoloski et al. (2006a) çalışmasında Kasım 2000 *Chandra* gözleminin yanı sıra, tez çalışmasında da analizi gerçekleştirilen (Bkz. Bölüm 3.7.3) *XMM-Newton* arşivindeki Ocak 2001 – Haziran 2001 EPIC-pn gözlemlerine ilk kez yer verilmiştir. Z And’ın optik patlamalarının fiziksel süreci cüce nova benzeri disk kararsızlığının ve nova benzeri nükleer kabuk yanmasının birleşimi olan bir süreç ile açıklanır (Combination Nova; Sokoloski et al., 2006a). Yukarıda bahsedilen X-ışın gözlemleri 2000-2002 yılları arasında gerçekleşmiş optik patlamalara denk gelmektedir. Kasım 2000 *Chandra* gözleminde ilk önce en iyi istatistiksel fit değerini veren *kuvvet yasası* (**power-law**) modeli denenmiştir; ancak model sonucunda elde edilen foton indeksi fiziksel olamayacak kadar büyüktür ($\Gamma = 5.9$). Bu modelle kolon yoğunluğu $N_H = 5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ bulunmuştur. Bu değer Dickey and Lockman (1990) tarafından önerilen galaktik $N_H = 1.5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ değerinden biraz fazladır. Ancak şunu söylemekte yarar var ki bazı simbiyotik sistemlerin sıfır yörünge evresi civarında kolon yoğunluğu $\sim 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ mertebesinde ölçülmüştür. Bu sırada kütle toplayan beyaz cüce kırmızı devin arka tarafına ilerlerken beyaz cüceden gelen ışınının daha yoğun dev rüzgârının olduğu katmandan geçmesi gerekecektir (Vogel, 1991). X-ışın kaynağı beyaz cüce olduğundan X-ışın akısı ve dolayısıyla X-ışın modeli etkilenecektir.

¹⁶SySt’lerde büyük kütleli yıldızın çoğunlukla kırmızı dev olması nedeniyle, baş bileşen yıldız kırmızı dev yıldız olarak yoldaş bileşen ise sıcak bileşen olarak ifade edilir. Ancak bazı sistemlerde durumun tam tersi olduğu unutulmamalıdır.

Ocak 2001 gözlemi Sokoloski et al. (2006a) tarafından incelenmiştir. Tayfin iki salma bileşeni bulunduğu belirtilmiştir. İkinci salma bileşeni oldukça zayıf ve yaklaşık 10 keV civarındadır. Bu nedenle kullandıkları tek sıcaklıklı plazma modeli olan *Raymond-Smith Modeli*'nin gözlemlerle iyi uyum sağlamadığını belirterek, bunun yerine kara cisim, kuvvet yasası ve iki soğurma kenarı (*edge*) ile tanımlanan bir model uygulamayı tercih etmiştir. Haziran 2001 gözleminde Sokoloski et al. (2006a) soğurma katkılı kara cisim modeli kullanmıştır. Burada sıcak plazma modeli olan *Raymond-Smith Modeli*'ni *kuvvet yasası* ile birleştirmiştir. Ancak model sonucunda foton indeksi Γ , fiziksel olamayacak kadar büyük bir değer (~ 10) çıkmıştır. Z And'ın doğası gereği oldukça belirgin yumuşak X-ışın salması yine de açıkça görülmektedir.

3.7.2 Optik Gözlemleri

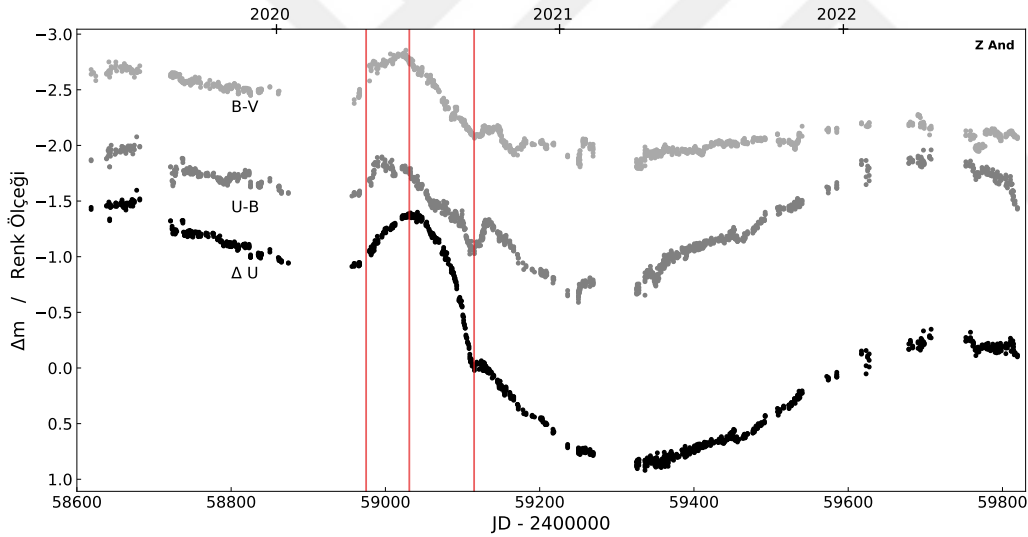
Z And sisteminin TUG T60 teleskobu ile elde edilen uzun zaman aralıklı fotometrik gözlemleri yaklaşık 1198 günü kapsamaktadır (Şekil 3.26). Her bir filtredeki ışık değişiminin daha iyi karşılaştırılması amacıyla fark fotometrisi uygulanan verilere sabit sayılar eklenmiştir. Bu sayılar, $\Delta U + 0$, $\Delta B + 0.3$, $\Delta V + 1.6$ ve $\Delta R + 2.8$ şeklindedir.



Şekil 3.26: Z And sisteminin TUG T60 verileri ile elde edilmiş uzun dönemli ışık eğrisi.

Şekil 3.26'da Z And sisteminin TUG T60 gözlemlerinden elde edilen

UBVR dört bant ışık eğrileri görülmektedir. TUG gözlemlerinin zaman başlangıcı neredeyse Sekeráš et al. (2019) çalışmasında sunulan ışık eğrisinin devamı niteliğindedir. İlgili çalışmada yer alan Şekil 4'te Nisan 2018 civarında genliği $\Delta U \geq 1.5$ kadir olan bir parlama görülmüş¹⁷ ve ardından parlaklık azalmaya başlamıştır. Benzer olarak Şekil 3.26'da $JD_{max} = 2459035$ (Temmuz 2020) civarında bir parlaklık artışı meydana gelmiştir. Parlama öncesinde özellikle U filtresinde bir parlaklık azalması görülür. Parlama sonrasında ise parlama öncesi başlayan parlaklık azalmasının devam ettiği görülmektedir. Yaklaşık $JD_{min} = 2459350$ civarında bu parlaklık azalmasının minimum değere ulaştığı belirlenmiştir. Gözlemin başından minimum zamanına kadar sistemde ~ 2.5 kadirlik (U filtresinde) bir azalma tespit edilmiştir. Daha sonra tekrar parlaklık yavaşça artmıştır.

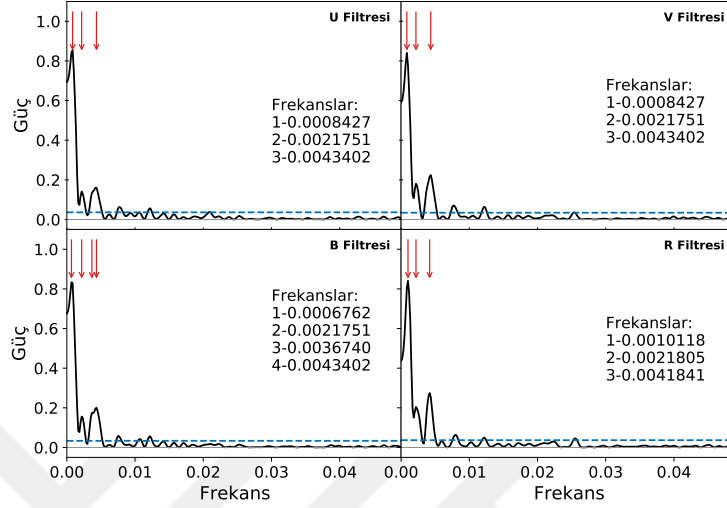


Şekil 3.27: Z And sisteminin U bandı ışık değişimi ile $U - B$ ve $B - V$ renk değişimleri.

Optik gözlemlerin $U - B$ ve $B - V$ renk değişimleri Şekil 3.27'de verilmiştir. ΔU parlaklığına herhangi sayısal eklem yapılmamışken, renk ölçekleri değerlerine $(U - B) - 1$ ve $(B - V) - 3$ şeklinde sayısal eklemeler yapılmıştır. Gözlemin başından itibaren sistem tutulma evresine girmektedir. $JD = 2458975$ değerinden itibaren (soldan 1. dikey çizgi) tutulma içinde par-

¹⁷Simbiyotik sistemlerde en büyük genlik U filtresinde görüldüğünden literatürdeki parlaklık genliği U filtresiyle ifade edilir.

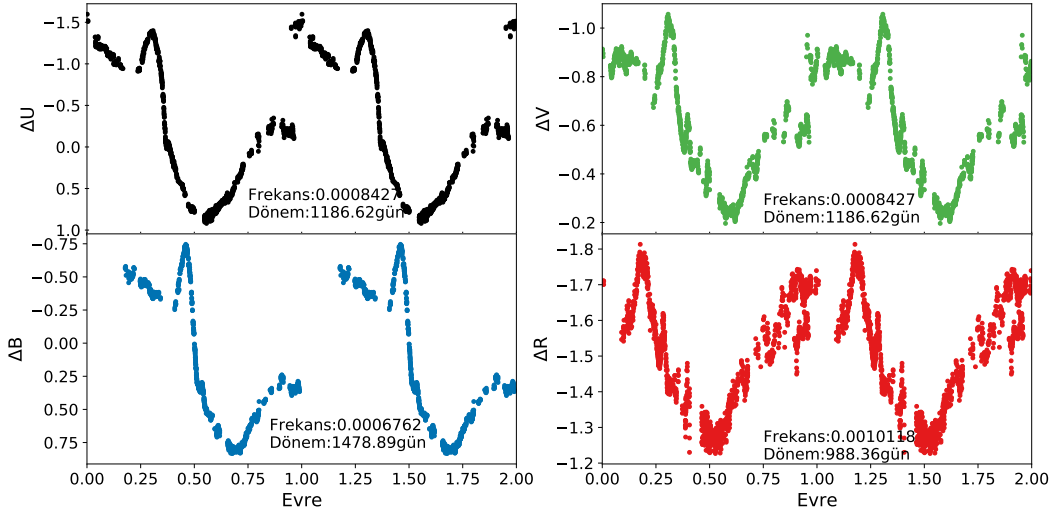
laklık artışı görülmekte ve yaklaşık 56 gün sonra tepe noktasına ulaşmaktadır (soldan 2. dikey çizgi). Parlamamanın iniş kolu yaklaşık 84 gün sonra ışık eğrisinin temel seviyesine ulaşmaktadır (solda 3. dikey çizgi).



Şekil 3.28: Z And sisteminin dönem analizi sonucu elde edilmiş güç tayfları. Oklar soldan sağa sırayla 1, 2, 3 ve 4 numaralı frekans değerlerinin yerini göstermektedir. Kesikli çizgi 5σ değerini ifade eder.

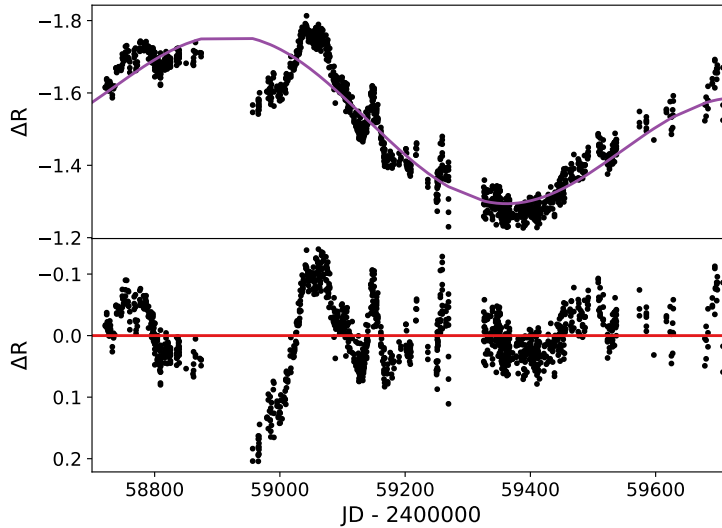
Yapılan dönem analizlerinin en baskın frekans değerleri ve güç tayfları Şekil 3.28'de verilmiştir. Tüm filtreler için elde edilen en baskın frekans değerleri yörünge döneminden daha uzun bir döneme karşılık gelmektedir. Bu dönemler, U ve V filtreleri için ~ 1187 gün iken B için ~ 1479 ve R filtresi için 988 gündür (frekans değerleri dönem değerleri ile birlikte Bkz. Şekil 3.29). Ayrıca, tüm filtrelerde ~ 459 gün ($f = 0.0021751 \text{ gün}^{-1}$) ile ~ 230 günlük ($f = 0.0043402 \text{ gün}^{-1}$) bir değişim belirlenmiştir. Ek olarak, B filtresinde ~ 237 günlük ($f = 0.0036740 \text{ gün}^{-1}$) bir değişim tespit edilmiştir.

Şekil 3.29'da en baskın frekanslara karşılık gelen dönem değerleri ile evrelendirilmiş ışık eğrileri yer alır. Işık eğrilerinin evrelendirilmesi sırasında kullanılan T_0 zamanı için $JD_{min} = 2442666(\pm 10) + 758.8(\pm 2) \times E$ ışık ögeleri zamanındaki değer kullanılmıştır (Formiggini and Leibowitz, 1994). Daha sonra büyük genlikli değişimi arındırmak için ışık eğrisine sinüs fiti uygulanmıştır (Şekil 3.30). Sinüs fit değerleri ile veri seti farkı alınarak elde



Şekil 3.29: Z And'ın dönem analizi sonucu elde edilen en baskın dönem değeri ile evrelendirilmiş ışık eğrileri.

edilen yeni verilere dönem analizi uygulanmıştır. Sonuç olarak, R filtresinde ~ 398 ve ~ 150 günlük değişimler elde edilmiştir. Bu değişimleri R filtresi için gösteren evrelendirilmiş ışık eğrileri Şekil 3.31'de verilmektedir. Aynı mertebedeki dönemsel değişimler U ve V filtrelerinde de belirlenmiştir.

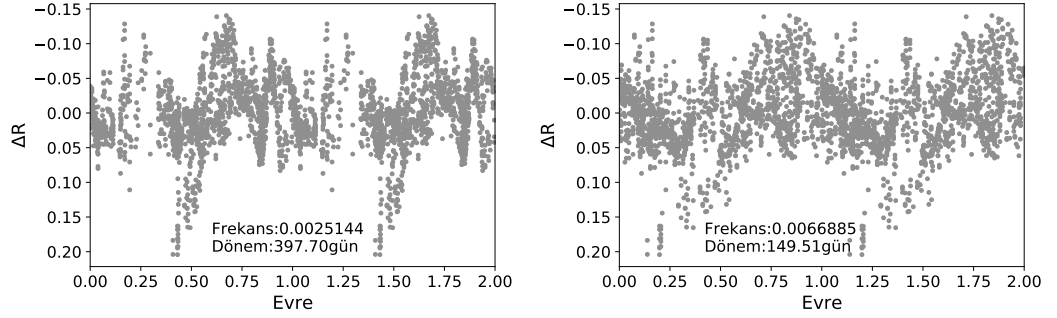


Şekil 3.30: Z And'ın uzun dönemli ışık eğrisine uygulanmış sinüs fiti.

Sekeráš et al. (2019) $AAVSO$ ¹⁸ veri tabanından elde edilen verilerle V filtresinde ~ 58 gün döneme sahip bir değişim belirlediklerini rapor etmişlerdir. Tez kapsamındaki dönem analizi sonucunda R filtresinde ~ 39 günlük değişim

¹⁸ $AAVSO$: The American Association of Variable Star Observers

belirlenmiştir.

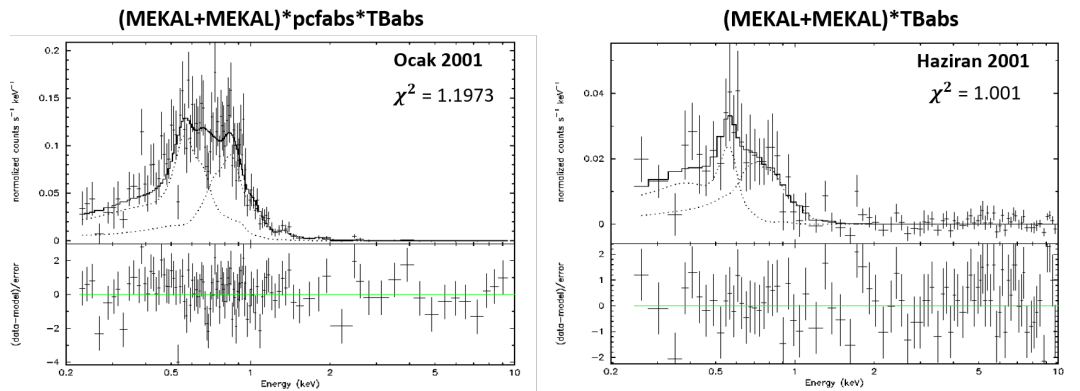


Şekil 3.31: Z And'ın R filtresindeki ~ 398 (sol) ve ~ 150 gün (sağ) dönemlerle evrelendirilmiş ışık eğrileri.

3.7.3 X-ışın Gözlemleri

XMM-Newton Gözlemleri

XMM-Newton arşivinde Z And sistemine ait beş gözlem verisi mevcuttur. Bunların üçü analize uygundur (Obs ID: 0093552701, 0093552801, 0656780501). Gözlem tarihleri sırasıyla, Ocak 2001, Haziran 2001 ve Haziran 2010'dur. Ocak 2001 – Haziran 2001 gözlemleri Sokoloski et al. (2006a) tarafından da incelenmiştir.



Şekil 3.32: Z And *XMM-Newton* Ocak (sol) ve Haziran 2001 (sağ) tarihli gözlemlerine uygulanan model tayfları.

Ocak 2001 (Gözlem ID: 0093552701) gözlemi yaklaşık 25 ks'lik bir gözlem süresine sahiptir. X-ışın ışık değişimini elde etmek için indirgeme

sonrasında farklı “binning” sayıları (10, 50 ve 100) ile X-ışın ışıık eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen tam zamanlı ışıık eğrilerinde bir değişim belirlenememiştir.

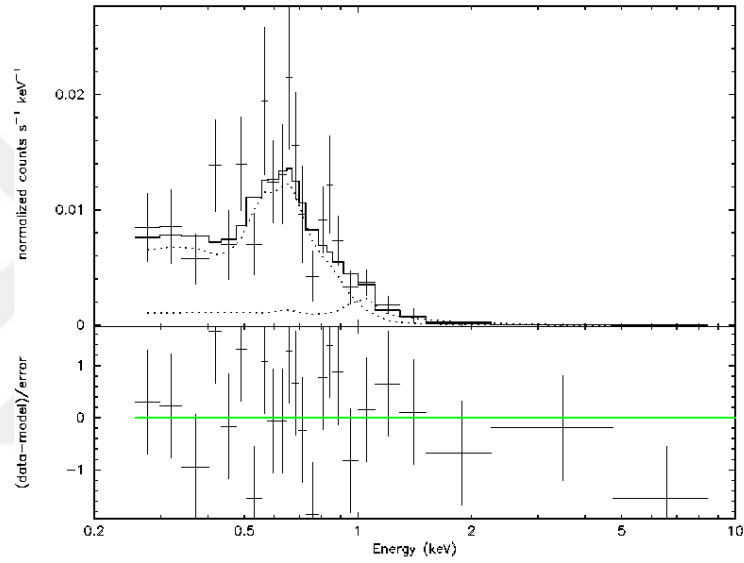
Sistemin Ocak 2001 gözleminin X-ışın tayfı iki salma bileşeni göstermektedir (Bkz. Şekil 3.32). Sokoloski et al. (2006a) yaptıkları tayf analizinde ikinci salmanın ~ 10 keV civarında olduğunu belirtmişlerdir. Ancak bu salma gürültü dağılımı içinde kalmaktadır. Yine de bu tayfın iki salma bileşeni olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır. Yapılan analiz sonucunda her iki salma bileşeninin de yumuşak X-ışın bölgesinde bulunduğu tespit edilmiştir. Plazma sıcaklıkları ~ 0.19 ve ~ 0.56 keV olarak elde edilmiştir. Oluşturulan modelde iki salma bileşeni için de **mekal** sıcak plazma modeli kullanıldı. Modele yıldızlararası hidrojen kolon yoğunluğunu (**tbabs**) ve ayrıca sistem kaynaklı olabilecek (**pcfabs**) bir soğurma kaynağı da eklendi. Yıldızlararası hidrojen kolon yoğunluğu sabitlenerek $(1.39 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2})^{19}$ sisteme ait olabilecek kolon yoğunluğu elde edildi ($3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$).

Haziran 2001 (Gözlem ID: 0093552801) tarihinde yaklaşık 21.6 ks’lik bir gözlem gerçekleştirilmiştir. Bu gözlemin sinyal/gürültü oranı düşük ve arka plan gürültüsü görece yüksektir. Bu X-ışın tayfı da Ocak 2001 gözlemlerine benzer olarak *soğurma* katkılı iki sıcak salma kaynağını işaret eder (Bkz. Şekil 3.32). Sıcak salma kaynakları burada da **mekal** modeli ile temsil edilmiştir. Bu gözlemin plazma sıcaklıkları bir miktar farklı belirlenmiştir (Bkz. Tablo 3.8). Modelde galaktik kolon miktarı sabitlenmiş ($1.39 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$) ve sistem kaynaklı soğurma katkısı olmadığı görülmüştür.

Yaklaşık 34 ks süreli **Haziran 2010** (Gözlem ID: 0656780501) gözleminde arka plan çok gürültülü olmamasına karşın gözlem verisi saçılmalıdır. Ancak X-ışın tayfını en iyi fit değerlerinde analiz etmek mümkündür. Bu gözlemden diğere gözlemlerin aksine *soğurmali* tek sıcak plazma kaynağında olduğu tahmin edilen bir X-ışın tayfı görülmektedir (Bkz. Şekil 3.33). Bu

¹⁹Bu değer HEASARC arşivinden alınmıştır ve Z And doğrultusundaki galaktik kolon miktarıdır.

nedenle hem iki sıcak plazma kaynağı hem de tek plazma kaynağı için farklı modeller oluşturulmuştur (Sıcak plazma kaynakları *mekal* modeli ile temsil edilmektedir). *Soğurmalı* tek plazma kaynağı gösteren bu tayfın analizi sonucunda elde edilen *mekal* sıcaklığı 0.23 keV'dir. Analiz sırasında galaktik kolon yoğunluğu sabitlenmiş ve ek bir soğurma kaynağı belirlenememiştir. Ek olarak, iki plazma kaynağı için yapılan tayf analizinde elde edilen sıcaklıklar ~ 0.25 ve ~ 1.37 keV'dir (indirgenmiş $\chi^2 = 0.9992$). Z And sisteminin *XMM-Newton* X-ışın tayf analizlerinin sonuçları Tablo 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.33: Z And sisteminin *XMM-Newton* Haziran 2010 tarihli X-ışın tayfı.

Tablo 3.8: Z And sisteminin *XMM-Newton* gözlemlerinin X-ışın tayf analizleri sonuçları. *Sistem uzaklığı $d = 1.9521 \pm 0.1081$ kpc'tir (*Gaia* DR2).

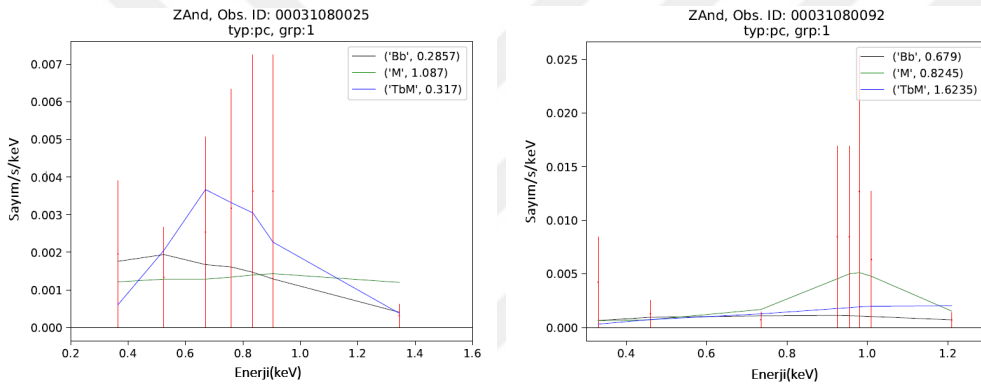
Gözlem Tarihi	χ^2	$T_{MEKAL,1}$ (keV)	$T_{MEKAL,2}$ (keV)	pcfabs (10^{22}cm^{-2})	CvrFact (pcfabs)	TBabs (10^{22}cm^{-2})	$F_X(\times 10^{31})$ ($\text{ergcm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$L_X(\times 10^{31})^*$ (ergs^{-1})
Ocak 2001	1.1973	0.186528	0.560771	3.02345	0.584462	0.139	1.1137×10^{-13}	5.0754
Haziran 2001	1.001	0.108955	0.315852	-	-	0.139	2.5078×10^{-14}	1.1428
Haziran 2010	0.9999	0.231252	-	-	-	0.139	1.0429×10^{-14}	0.4753

Swift Gözlemleri

Swift arşivinde Z And sistemine ait 126 adet gözlem bulunmaktadır. Bunların 24 tanesi analize uygundur. Ancak bu gözlemlerin poz süreleri düşük olduğundan (Bkz. Tablo 3.9) sistemden alınan foton sayısı düşüktür. Tüm

gözlemlerde fotonların grup sayısı 1 alınmıştır.

Yukarıda *XMM-Newton* gözlem verilerinin çok bileşenli modellerle temsil edildiği görülmektedir. Ancak *Swift* X-ışın tayfları, foton sayısının az olması nedeni ile daha basit modeller ile temsil edilmeye çalışılmıştır. Kullanılan modeller kara cisim (BB), sıcak plazma modeli (M) ve soğurmalı sıcak plazma (TbM) modelidir. Burada galaktik kolon yoğunluğu $1.41 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ olarak alınmıştır. Şekil 3.34'te soldan sağa sırasıyla 00031080025 ve 00031080092 numaralı gözlemlere uygulanan X-ışın tayf modelleri örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.34: Z And sisteminin bazı *Swift* gözlemlerine uygulanan X-ışın tayf modelleri.

Tayf analizi sonucunda en iyi uyum gösteren modeller belirlenmiş ve bunların akı değerleri elde edilmiştir (Bkz. Tablo 3.9). Sayım değerlerinin az olması uygulanan modellerin indirgenmiş χ^2 değerinin genellikle en uygun değerden küçük olmasına neden olmuştur.

Literatürdeki bilgiler ve bu çalışmada gerçekleştirilen *XMM-Newton* X-ışın tayf analizleri ışığında cismin iki sıcak salma bileşenine sahip bir X-ışın tayfına sahip olduğu bilinmektedir. Ancak gözlemlerde foton sayısının az olması nedeniyle tayfta ikinci sıcak plazma bileşeni belirlenememiştir. Buna karşın, uyguladığımız tüm modeller sonucunda farklı gözlemlerden elde ettiğimiz plazma sıcaklık değerleri ~ 0.2 ve ~ 0.6 keV civarındadır.

Tablo 3.9: Z And sistemine ait *Swift* gözlem verilerinin analizi sonucunda elde edilen bazı parametreler. “*F*” ile gösterilen parametreler verilen X-ışın enerji aralığındaki erg/s/cm² biriminden akı ve L_x ile gösterilen parametre de erg/s biriminden X-ışın ısıtmasıdır.**Gaia* DR2’den elde edilen sistem uzaklığı $d = 1.9521 \pm 0.1081$ kpc’tir.

Gözlem Adı	Poz Süresi (s)	MJD	Model	χ^2	$F_x(0.2-2.5\text{keV})$	$F_x(0.2-10\text{keV})$	$F_x(5-10\text{keV})$	$L_x(0.2-10\text{keV})$
31080002	3508.715209	54468.03793	Bb	0.64551348	4.40E-14	4.40E-14	1.98E-23	2.22E+31
31080003	2739.524243	54481.0231	M	0.832785041	6.25E-14	6.35E-14	4.15E-17	3.21E+31
31080004	2921.824648	54482.01937	Bb	0.466866808	7.12E-14	7.97E-14	8.25E-17	4.03E+31
31080005	3760.908925	54483.0303	Bb	0.51206935	3.86E-14	4.23E-14	2.57E-17	2.14E+31
31080005	3760.908925	54483.0303	TbM	0.40920801	4.19E-14	4.39E-14	1.22E-16	2.22E+31
31080006	1723.131893	54488.92598	TbM	0.613584946	1.70E-13	1.84E-13	1.42E-15	9.30E+31
31080007	3346.363271	54490.06628	Bb	0.626985323	1.03E-13	1.05E-13	3.04E-18	5.33E+31
31080008	2727.034216	54491.07115	Bb	0.659969177	1.64E-13	1.93E-13	5.12E-16	9.77E+31
31080009	6383.04665	55111.6743	Bb	0.693333702	3.83E-14	5.46E-14	8.93E-16	2.76E+31
31080015	3835.846712	55117.5794	Bb	1.5165443	9.62E-14	5.49E-12	4.75E-12	2.78E+33
31080019	4320.29603	55132.76551	TbM	1.186362145	2.35E-14	2.67E-14	4.85E-16	1.35E+31
31080021	3671.008038	55138.04676	M	0.803913267	4.50E-14	5.81E-14	3.90E-15	2.94E+31
31080023	3940.712392	55145.80926	M	1.399672825	4.50E-14	4.50E-14	1.80E-26	2.28E+31
31080025	3940.712628	55152.03565	TbM	0.316953257	4.62E-14	4.62E-14	1.29E-21	2.34E+31
31080027	3858.312678	55159.66412	TbM	0.492107362	5.83E-14	6.56E-14	1.01E-15	3.31E+31
31080031	3880.7783	55173.18287	Bb	0.426992829	5.80E-14	5.89E-14	4.88E-19	2.98E+31
31080033	4033.111135	55180.08009	TbM	0.914082054	6.39E-14	6.39E-14	1.44E-20	3.23E+31
31080035	4060.580999	55195.73634	TbM	0.767192783	2.47E-13	1.05E-12	5.00E-13	5.29E+32
31080037	3830.862894	55201.02176	M	1.599501956	1.37E-13	4.37E-13	1.87E-13	2.21E+32
31080041	3950.721147	55215.67662	Bb	0.858714406	5.52E-14	5.65E-14	1.47E-18	2.86E+31
31080079	4208.891629	55428.28912	Bb	0.400713507	6.38E-14	6.38E-14	2.03E-23	3.22E+31
31080087	4070.569884	55505.98773	Bb	0.303150368	1.21E-13	1.54E-13	9.91E-16	7.78E+31
31080090	4090.548631	55519.16481	Bb	0.321937883	3.18E-14	3.21E-14	6.29E-20	1.62E+31
31080092	3940.712157	55533.01412	M	0.824545964	6.33E-14	6.59E-14	2.39E-16	3.33E+31

3.8 AX Persei

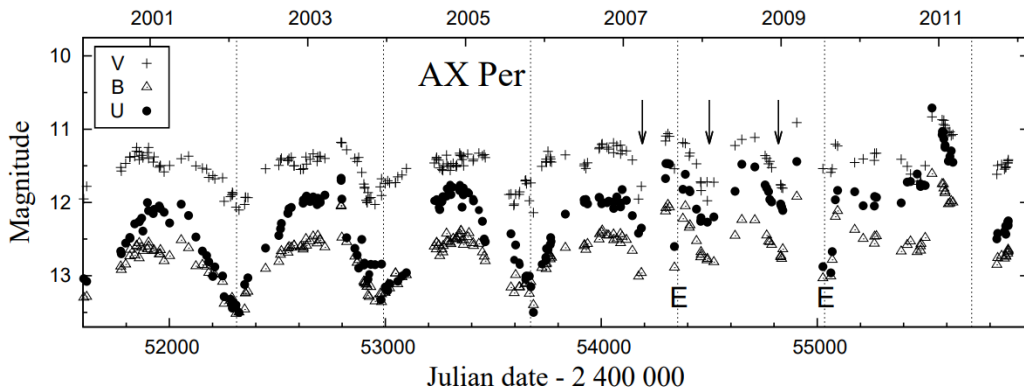
3.8.1 Tarihçe

AX Per, eş potansiyel yüzeyini doldurmuş kırmızı dev bileşenden ($M_{dev} \sim 1 M_{\odot}$) yoldaş bileşenine madde transferi gerçekleştiren bir SySt’dir. Mikolajewska and Kenyon (1992), yoldaş yıldızı anakol yıldızı ($\sim 0.4 M_{\odot}$) olarak önermiştir. Günümüzde ise yoldaş bileşeninin bir beyaz cüce olması daha yaygın bir görüştür (Sekeráš et al., 2019; Skopal et al., 2011). Özellikle ışık eğrilerindeki değişimler sıcak bileşenin bir beyaz cüce olduğunu gösterir. Soğuk bileşen ise M4.5 III tayf ve ısıtma türünden bir dev yıldızdır (Mürset and Schmid, 1999).

Tutulma gösteren bu sistem yaklaşık 682.1 ± 1.4 günlük yörünge dönemine sahiptir (Fekel et al., 2000a). Düşük kütleli sıcak bileşenin etrafında

madde transferi ile beslenen bir toplanma diski bulunmaktadır. Sistemin evrim basamağının ortak zarf evresine geçiş döneminde olduğu önerilmektedir (Mikolajewska and Kenyon, 1992). Mikolajewska and Kenyon (1992) 2.5 kpc uzaklık için disk ısıtmasının sakin evrede $100 L_{\odot}$ ve parlama sırasında $5700 L_{\odot}$ değerlerine yükseldiğini bulmuştur. Yüksek enerjili fotonlar disk ve merkezi cisim arasında bulunan sınır tabakasından yayılmaktadır. Bu fotonlar, sistemi saran bulutsu yapıyı iyonlaştırır ve sonuç olarak güçlü He II gibi çizgi yapılarını görmek mümkün olur. Bunun yanı sıra [Fe VII] gibi yüksek dereceden iyonlaşmış yasaklı çizgiler genişleme sırasında ve şok uyarılma bölgesinde oluşur. Bu çizgilerin kökeni diskteki kütle kaybıyla ilişkili olabilir.

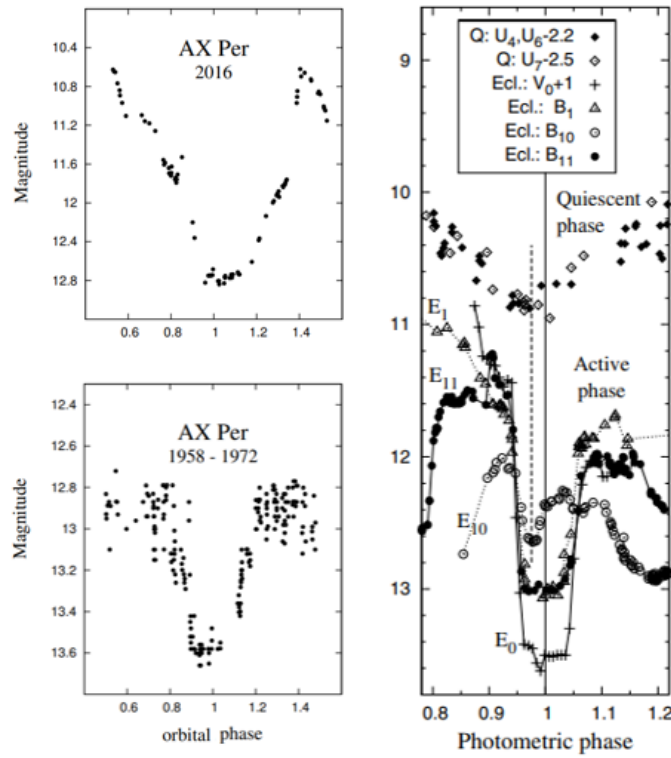
Simbiyotik sistemlerde fotometrik ışık eğrilerinde dalga benzeri yapılar görülür (Skopal, 1998). Bu olguya AX Per'in aktif evre aşamasında rastlanır. Şekil 3.35'te AX Per sisteminin 2000-2012 yılları arasındaki uzun zaman aralığındaki ışık değişimi görülmektedir. Burada dikey kesikli çizgiler tutulma zamanlarını belirtirken, oklar aktif evre sırasında ortaya çıkan dalgaların minimumlarını gösterir (Skopal et al., 2012). Bu yapı yeni başlayan aktif evrenin sonucu olarak, çiftin iyonlaşma yapısındaki güçlü bir değişiklikten kaynaklanır.



Şekil 3.35: AX Per sisteminin aktif evrede ışık dalgalanması olayı (Skopal et al., 2012, Şekil 16).

Aktif evreden sakin evreye geçiş sırasında ışık eğrisinde ani parlaklık artışı görülebilir. Aslında bu simbiyotik sistemlerde sıkça görülen bir durumdur. Bu ani parlamaların devamında dalga-benzeri yapılar oluşabilir (Skopal

et al., 2012). Bu geçiş evresi sistemin geometrisindeki bir değişime işaret eder. Optik bölgeye katkı sağlayan ana kaynağın yeri değişiyor olabilir. Genellikle bu değişim sıcak bileşen tayfının enerji dağılımındaki değişimi ile bağlantılıdır (Skopal, 1998). Parlama sırasında sıcak yıldız etrafında soğuk bir kabuk oluşur. Bu kabuk zamanla seyrelir. Seyrelme sonucu kısa dalgaboylu ışınının optik ışınımına katkısı azalmaya başlar. Yani optik ışık eğrisinde seviye düşer ve sıcak yıldızın yüzey sıcaklığı artar (Skopal et al., 2001). Böylece iyonlaşmış foton üretimi artarak HII bölgesinin genişlemesine neden olur. Optikçe kalın olan bu bölge ışık eğrisinde karmaşık yapılara neden olabilir. Ya da yörünge evresinin bir fonksiyonu olarak dönemsel dalga-benzeri değişimler gözlenebilir (Skopal, 1998; Skopal et al., 2001).



Şekil 3.36: AX Per sisteminin farklı zamanlarda elde edilmiş parlaklık-evre grafikleri. Bu grafikler sol ve sağ kolon olmak üzere, sırasıyla Sekeráš et al. (2019, Şekil 31) ve Skopal et al. (2011, Şekil 2) çalışmalarından alınmıştır.

Sekeráš et al. (2019) tarafından yapılmış fotometrik gözlemlerde genliği yaklaşık 2 kadir olan dalga şeklinde değişimler gözlenmiştir. Şekil 3.36’da farklı zaman aralıklarında evrelendirilmiş ışık eğrileri görülmektedir. Sol taraftaki

grafikler sistemin, 2016 yılındaki aktif (üst) ve 1958-1972 yıllarında sakin evredeki (alt) tutulma şekillerini göstermektedir. Sağdaki grafik ise seçilmiş bazı minimum profilleri sunmaktadır (ayrıntılar için Bkz.; Skopal et al., 2011). Grafikteki düz ve kesikli dikey çizgiler sırasıyla aktif ve sakin evredeki minimum yerini göstermektedir. Şekillerden görüleceği gibi aktif ve sakin evrelerde minimumun sadece genliği değil aynı zamanda şekli ve evre yeri de değişmektedir.

AX Per'in farklı zamanlardaki tutulma minimumları farklı davranışlar sergilemektedir (Bkz. Şekil 3.36). Sakin evrede minimum yerlerinin değişmediği görülürken, aktif durumdaki minimumlar aynı davranışı sergilememektedir.

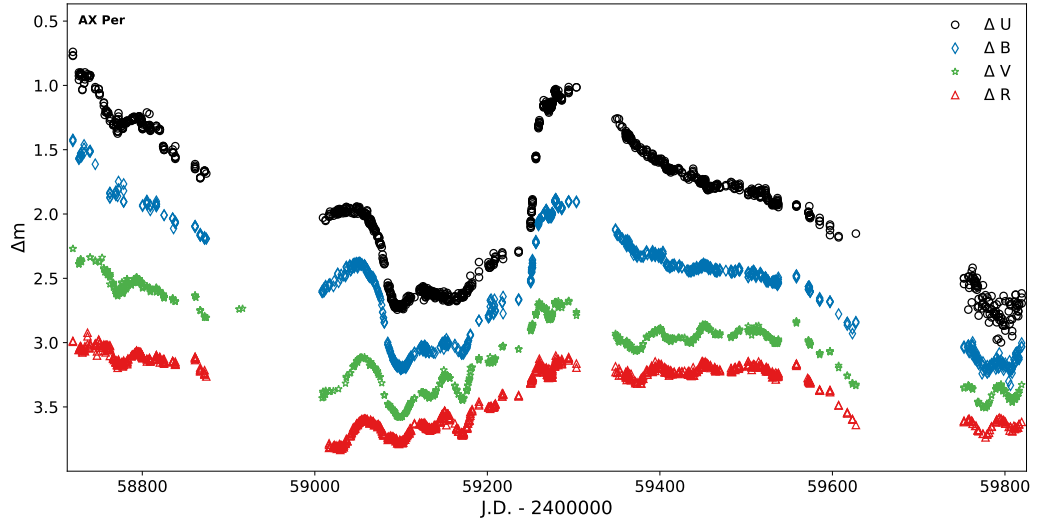
Sistemin 2007-2010 yılları arasındaki aktif evre durumunda yapılan UBV gözlemlerinde, 0.5 yörünge dönemine sahip belirgin bir ışık dalgalanması belirlenmiştir. Bu dalgalanma 0.2 ve 0.7 evre civarında minimumlar göstermektedir. Bu minimum noktaları Şekil 3.36'in sağ grafiğinde E_{10} ve E_{11} eğrileri için açıkça görülür. Genliğin değişim aralığı 0.6–0.8 kadir civarındadır. Tüm filtrelerde kendini gösteren bu olay bir simbiyotik sistem için ilk kez gözlenmiştir (Skopal et al., 2011).

3.8.2 Optik Gözlemleri

AX Per sistemi yaklaşık 680 günlük bir döneme sahip tutulma gösteren bir simbiyotik sistemdir (Mikolajewski et al., 1992). Gözlemlerimiz kabaca 1.7 yörünge çevrimini kapsar. Burada sunulan ışık eğrilerinin gözlem süresi yaklaşık 1176 gündür.

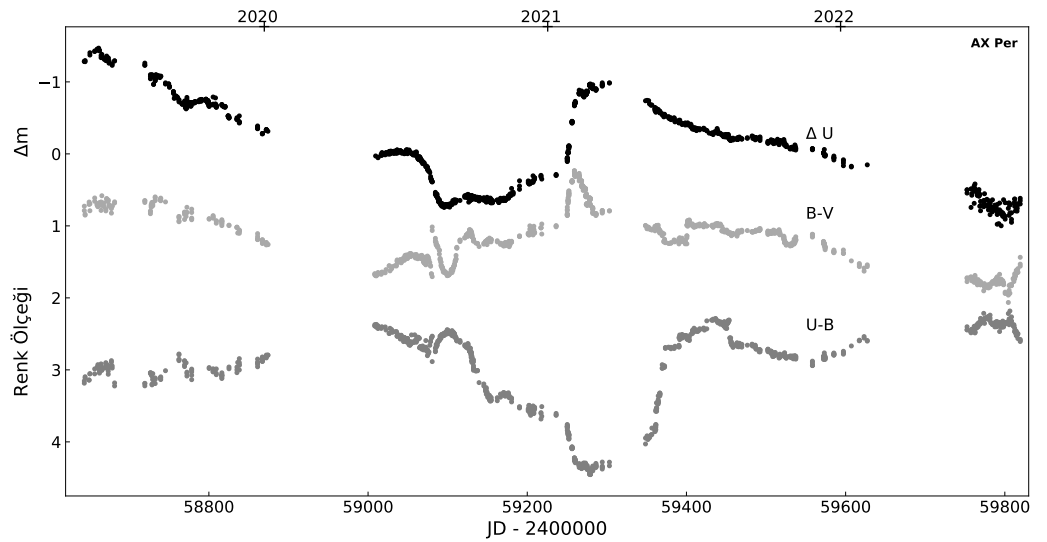
AX Per sisteminin TUG T60 teleskobu ile gerçekleştirilen gözlemlerinden elde edilen uzun zaman aralığındaki ışık değişimi Şekil 3.37'de görülmektedir. Işık değişimlerinde parlaklık farklarına eklenen sabit değerler $\Delta U_0 + 0$, $\Delta B_0 + 0.3$, $\Delta V_0 + 1.9$, $\Delta R_0 + 3.5$ şeklindedir.

AG Dra sisteminin ışık değişimlerinde görülen dalga benzeri yapılar bu sistemde de görülür (Bkz. Şekil 3.35). Sistem aktif evreye girdiği zaman



Şekil 3.37: AX Per'in TUG T60 gözlemlerinden üretilmiş UBVR ı ışık değişimleri.

bu geniş dalga benzeri yapılar yerlerini daha dar ve hızlı değişimlere bırakır (Bkz. Skopal et al., 2012; Sekeráš et al., 2019). Bu aşamada dalganın frekansı azalır ve dalga genliği ~ 0.5 kadire kadar düşer. Bu davranış en son 2007-2011 yılları arasında görülmüş ve bu tarih aralığını takiben ışık değişimleri tekrar büyük genlikli geniş dalga yapılarına dönüşmüştür. Gözlemlerimizde bu değişimin genliği yaklaşık 2 kadir civarındadır. Ek olarak, özellikle minimum bölgesinde görülen küçük genlikli değişimler mevcuttur.

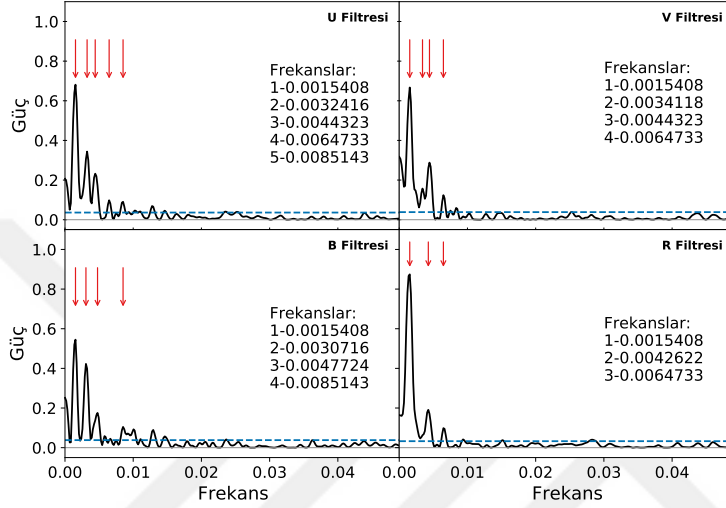


Şekil 3.38: AX Per'in TUG T60 verileri ile elde edilmiş renk değişimleri.

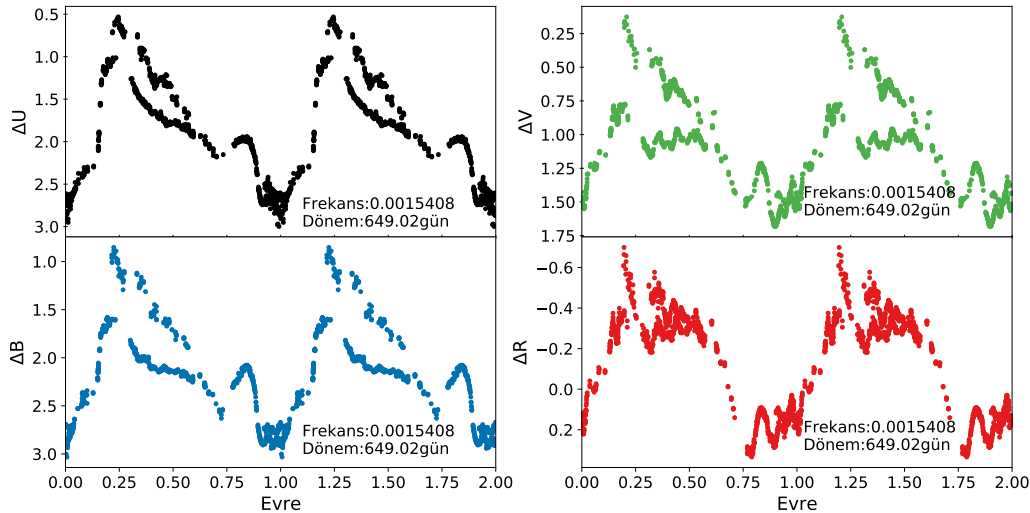
Şekil 3.38'de AX Per'in TUG T60 verileri ile elde edilen renk ölçekleri ΔU parlaklığı ile birlikte verilmiştir. Şekil 3.38, ışık değişimlerine $\Delta U - 2$,

$(U - B) + 3.4$ ve $(B - V) + 0$ sabit sayıları eklenerek oluşturulmuştur.

AX Per sisteminin evrelendirilmiş ışık değişimlerinde kullanılan T_0 zamanı $JD_{tutulma} = 2447551.26(\pm 0.3) + (680.83 \pm 0.11) \times E$ ışık ögelerindeki ile aynı alınmıştır (Skopal et al., 2011). Dönem analizi sonucunda elde edilen güç tayfları ve bazı frekans değerleri Şekil 3.39'de verilmektedir.



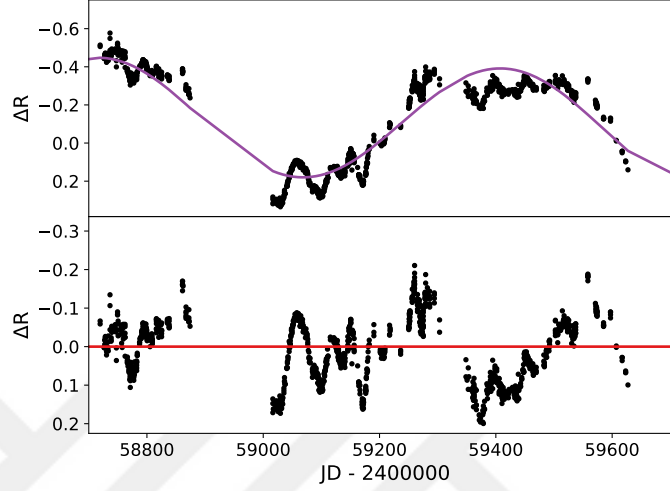
Şekil 3.39: AX Per sisteminin dönem analizi sonucu elde edilmiş güç tayfları. Oklar soldan sağa sırayla 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı frekans değerlerinin yerini göstermektedir. Kesikli çizgi 5σ değerini ifade eder.



Şekil 3.40: AX Per'in 649 günlük dönem değeriyle evrelendirilmiş ışık eğrileri.

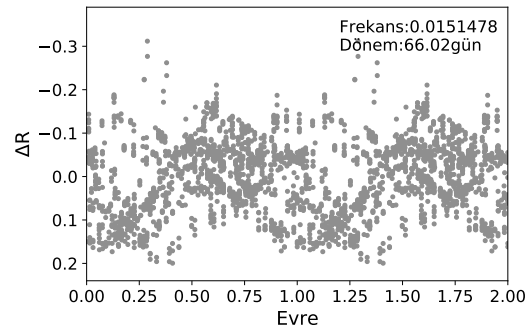
Tüm filtreler için en baskın frekans değeri ~ 0.0015408 gün⁻¹'dir ve yö-rünge dönemine karşılık gelir. İlgili frekans değeri ile elde edilen evrelendirilmiş

ışık eğrileri Şekil 3.40'te verilmiştir. U , B ve V filtrelerinde yaklaşık 300 güne (~ 0.003 gün $^{-1}$); U , V ve R filtrelerinde yaklaşık 150 güne (~ 0.064 gün $^{-1}$); son olarak, U ve B filtresinde ise yaklaşık 120 güne (~ 0.085 gün $^{-1}$) karşılık gelen dönemler de belirlenmiştir.



Şekil 3.41: AX Per'in uzun dönemli ışık eğrisine uygulanmış sinüs fiti.

AX Per'in uzun zaman aralıklı değişiminden de görüldüğü gibi genliği oldukça yüksek sinüs benzeri değişimler bulunur. Büyük genlikli değişimleri elemek ve böylece daha kısa zaman ölçekli değişimleri belirlemek amacıyla Şekil 3.37'deki ışık değişimine sinüs fiti uygulanmıştır. Şekil 3.41'de üst panelde orjinal ışık eğrisine uygulanmış sinüs fiti görülmektedir. Fit değerleri veri setinden çıkarıldıktan sonra elde edilen ışık değişimi Şekil 3.41'in alt panelinde bulunmaktadır. Büyük genlikli değişimden arındırılmış veri setinin dönem analizi sonucunda yaklaşık 66 günlük bir değişim belirlenmiştir (Şekil 3.42).



Şekil 3.42: AX Per sisteminin 66 günlük evrelendirilmiş ışık eğrileri.

3.8.3 X-ışın Gözlemleri

AX Per sisteminin *XMM-Newton* arşivinde gözlem verisi bulunmamaktadır. *Swift* veri tabanında ise sadece 3 adet gözlem bilgisi mevcuttur. Gözlem verileri incelendiğinde, ilgili kaynağın koordinatlarında bir X-ışın kaynağı belirlenememiştir.

3.9 AG Draconis

3.9.1 Tarihçe

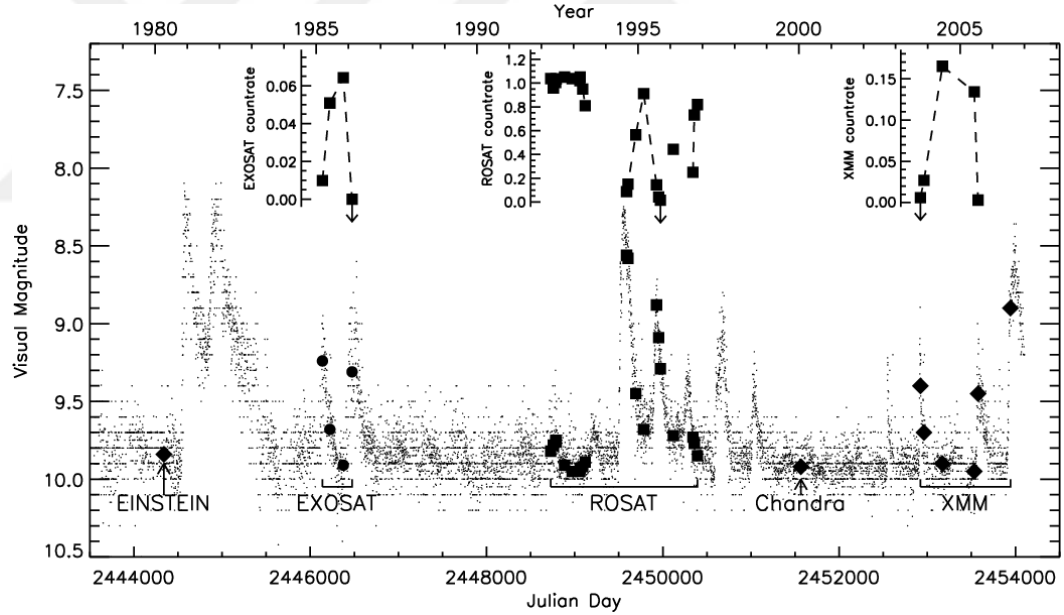
K2-3 III dev yıldızına sahip sarı simbiyotik çiftidir (Mürset and Schmid, 1999; Smith et al., 1996). Soğuk bileşen metalce fakir bir dev yıldız olup standart III. ısıtma sınıfındakilere kıyasla daha yüksek ısıtma değerine sahiptir. Sistemin yörünge dönemi 549 gündür ve dev yıldız rüzgârları ile beyaz cüceye madde aktarımı gerçekleşir. Gaia DR2 verilerinden elde edilen uzaklık değeri yaklaşık $d = 4.7596 \pm 0.5384$ kpc'tir. Yapılan çalışmalarda tutulma olduğuna dair herhangi bir kanıt bulunamamıştır.

Uzun süreli fotometrik ve tayfsal gözlemlerin dönem analizlerinde iki farklı dönem bulunmuştur. Uzun olanı yörünge dönemi iken, kısa olanı simbiyotik sistemlerde görülen soğuk bileşenin zonklama dönemidir (yaklaşık 355 gün, Gális et al., 1999; Friedjung et al., 2003). Yörünge dönemi özellikle kendini sakın evrede gösterirken (U bandı), zonklama dönemi hem sakın hem de aktif evrede görülür (B ve V bandı).

AG Dra'nın fotometrik gözlemleri 1890'lı yıllara kadar dayanmaktadır (Robinson, 1969). Işık eğrilerinde patlamalar sırasında V , B ve U filtreleri için sırayla 1.4, 2.3 ve 3.6 kadirlik değişimler görülür. Moröte ve X-ışın gözlemleri iki tür parlama olduğunu söyler: soğuk ve sıcak parlama (González-Riestra et al., 1999). Aktif aşamada başlayan büyük parlamalara soğuk, küçük ölçeklilere ise sıcak parlama adı verilir. Soğuk parlama denmesi sıcak beyaz cücenin atmosferinin genişlemesinden ötürü sıcaklığının azalması ve He II Zanstra sıcaklığının düşmesi sebebiyledir. Sıcak patlamada ise He II Zanstra sıcaklığı artar ya da aynı kalır.

AG Dra'nın geçmiş gözlemlerinde çift tepeli parlamalar görülmüştür. Bu yapının $U - B$ ve $B - V$ renk ölçekleri incelendiğinde, 2006 yılındaki parlamada $U - B$ değişiminin düz bir yapı gösterdiği belirlenmiştir (Bkz. Sekeráš et al. (2019)'daki Şekil 20). $U - B$ 'nin sabit kalması, U ve B bandında sistem etrafındaki gaz ve toz yapının ışımasının baskın olması şeklinde yorumlanmaktadır (Sekeráš et al., 2019; Skopal, 2005).

AG Dra düzensiz ışık eğrileri ile bilinir. Uzun dönemli sakin evrelere sahip olabilirken (on yıldan uzun süreli) birkaç yüz gün arayla bir ya da daha fazla patlamayla aktif evrede bulunabilir. 9-15 yılda bir optik bölgede aktif duruma geçer ve yaklaşık 1 yıl gibi bir sürede birkaç patlama gerçekleştirir (Gális et al., 2017). Aktif evre başlangıcında şiddetli bir parlama görülür ve bunu küçük parlamalar takip eder.



Şekil 3.43: AG Dra'nın X-ışın ve optik bölgedeki ışık değişimleri (González-Riestra et al., 2008). Şeklin alt bölümündeki noktalar görsel bölge verilerini, yukarı kısımdaki noktalar ise X-ışın verilerini göstermektedir.

AG Dra çok yumuşak X-ışın kaynağıdır. Bu sistemin moröte/optik parlaklıkları X-ışın ile ters ilişkilidir (Bkz. Şekil 3.43). Sistemin X-ışındaki parlaklığı azalırken görsel parlaklıkları ve moröte akısında artış görülür. Bu durumun sebebinin yüksek enerji kaynağının sönümlenmesinden ziyade patlama sırasında kütle toplayan kaynağın yarıçapındaki artış nedeniyle oluş-

tuğu düşünülmektedir (González-Riestra et al., 2008). Böylece yüzey sıcaklığı düşecek ve maksimum enerji salımı yumuşak X-ışından moröte ve optik bölgeye kayacaktır.

AG Dra galaktik haloda bulunan yüksek hıza sahip bir SySt'dir. Galaktik düzlemin 1 kpc üzerinde yer alır. AG Dra'nın X-ışındaki en belirgin özelliği yüksek X-ışın ısıtmasına sahip yumuşak X-ışın kaynağı olmasıdır (Greiner et al., 1996). Aslında bu davranış çok yumuşak X-ışın kaynakları için tipiktir.

Bu sistem X-ışınlarında ilk kez *Einstein Observatory* tarafından 1980 yılında gerçekleşen parlama öncesinde gözlenmiştir. Bunun yanı sıra *EXOSAT*, *ROSAT* ve *XMM-Newton* gibi birçok X-ışın teleskobu ile de gözlemleri yapılmıştır.

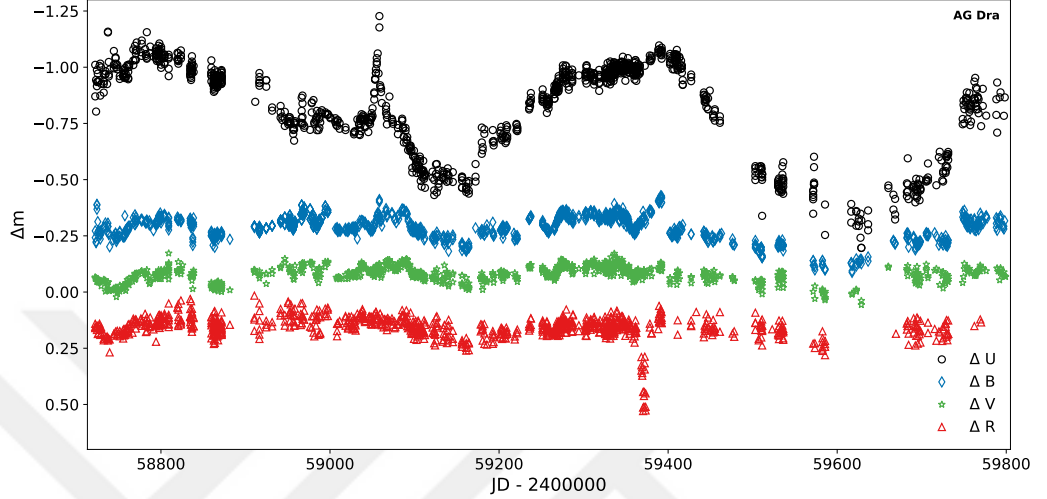
X-ışın alan görüntülerinde oldukça sönük olan bu kaynak bir yumuşak X-ışın kaynağıdır. Daha önce yapılan X-ışın tayf analizlerinde *kara cisim* tayfi ile uyum gösterdiği belirlenmiş ve kara cisim sıcaklığı $\sim 1.86 \times 10^6$ K olarak elde edilmiştir (Kenyon, 1988). Ayrıca Anderson et al. (1981) ek bir *Bremsstrahlung* kaynağının ($kT \sim 0.1$ keV) olabileceğine dikkat çekmiştir. Geçmiş çalışmaları genel olarak özetlersek sistemi tanımlamak için *soğurma* katkılı *kara cisim* modeli yeterli olmuştur.

3.9.2 Optik Gözlemleri

AG Dra çok çalışılan simbiyotik sistemlerden biridir. Kırmızı dev bileşeni güçlü yıldız rüzgârları ile beyaz cüce üzerine madde aktaran bu sistemin yörünge dönemi ~ 549 gün civarındadır (Fekel et al., 2000a). Gális et al. (1999), K-türündeki dev bileşenin zonklama dönemini ~ 355 gün, dev yıldızın dönme dönemini 1160 gün olarak tespit etmiştir. Aynı çalışmada sistemin ~ 373 günlük patlama çevrimi gösterdiği belirtilmiştir. Bu sistemle ilgili yapılan çalışmalarda henüz tutulma ile ilgili bir kanıt bulunamamıştır.

TUG T60 teleskobu ile gerçekleştirilen gözlemlerin sonucunda elde edilen ışık eğrisi Şekil 3.44'te görülmektedir. Işık değişimleri parlaklık farkı

alınarak oluşturulmuştur. İlgili şekilde tüm filtreleri daha kolay kıyaslamak adına B , V ve R parlaklık farklarına sabit sayılar eklenerek bunlar U filtresi referansında konumlandırılmıştır. Eklenen sayı değerleri şu şekildedir: $\Delta U + 0$, $\Delta B + 0.9$, $\Delta V + 2.1$, $\Delta R + 2.85$.



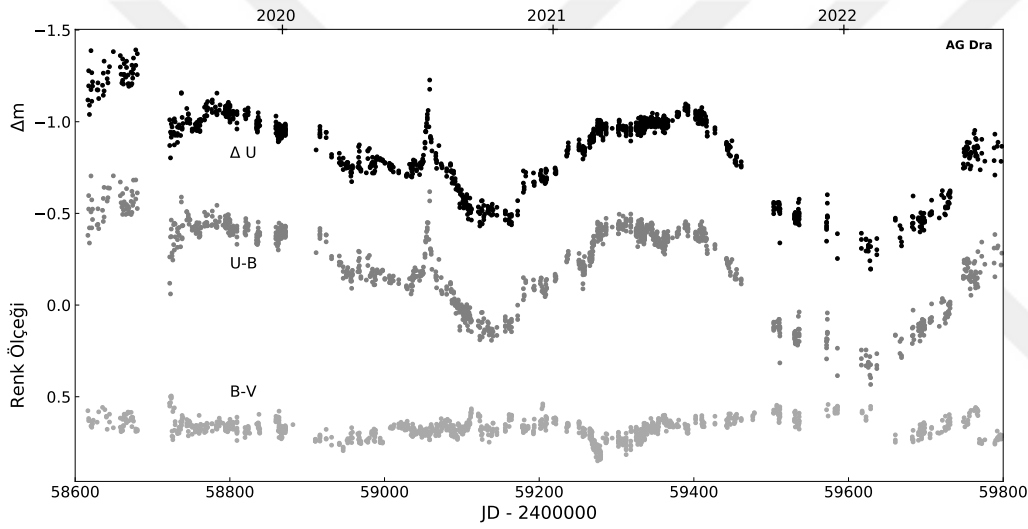
Şekil 3.44: AG Dra’nın TUG T60 verileri ile elde edilmiş uzun zaman aralığına dağılmış ışık değişimi.

AG Dra’nın uzun zaman aralıklı ışık değişimlerinde düzensiz yapılar sıkça görülür. Özellikle U bandında genliği yüksek parlaklık değişimleri görülmektedir. Bölüm 3.9.1’de bu sistem için tanımlanan soğuk ve sıcak parlamalardan bahsedilmişti. Soğuk parlama en son 2006-2007 yılları arasında görülmüştür (Sekeráš et al., 2019). Bu yılları takiben sistem sakin evreye girerek yaklaşık 400 günlük sıcak parlamalar göstermiştir. Şekil 3.44’te maksimum parlaması $JD - 2400000 \approx 59059$ değerine denk gelen ve yaklaşık 70 gün süren bir sıcak parlama görülmektedir. Bu parlamanın genliği yaklaşık 0.6 kadirdir.

Soğuk parlama sonrasında özellikle U filtresinde uzun dönemli bir parlama ($JD - 2400000 \approx 59170$ ’ten itibaren) ardından uzun dönemli bir parlaklık azalması görülmektedir. Bu tepenin ardından yaklaşık 280 gün süren 0.8 kadirlik bir sönükleşme görülür.

Şekil 3.44’te U filtresinde belirgin bir şekilde görülen sıcak parlamayı daha yakından inceleyelim. Bu parlamanın B ve V filtresinde iki tepeli bir parlama olduğu açıkça görülmektedir. Sekeráš et al. (2019) çalışmasında benzer

ancak genliği büyük çift tepeli parlamalar 1982, 1994 ve 2007 yıllarında tespit edilmiştir. Bunlardan 2007 yılına ait parlamada $U - B$ 'de değışim belirlenmemiştir (Bkz. Bölüm 3.9.1). Benzer olarak bu çalışmada bu durum $B - V$ rengine tespit edilmiştir. şekil 3.45'te TUG T60 gözlemlerinden elde edilen verilerle oluşturulan $U - B$ ve $B - V$ renk değışimleri verilmiştir. İki kırmızı çizgi arasında $B - V$ rengine düz bir yapı olduğu dikkat çekmektedir. Bu sırada $U - B$ 'de ise kızılalaşma olduğu görölmektedir. U filtresindeki değışimin bu kadar baskın olması ve V ile B filtresinin benzer değerlerde olması bu parlamanın disk ve/veya beyaz cüce kaynaklı olabileceğini düşündürmektedir.

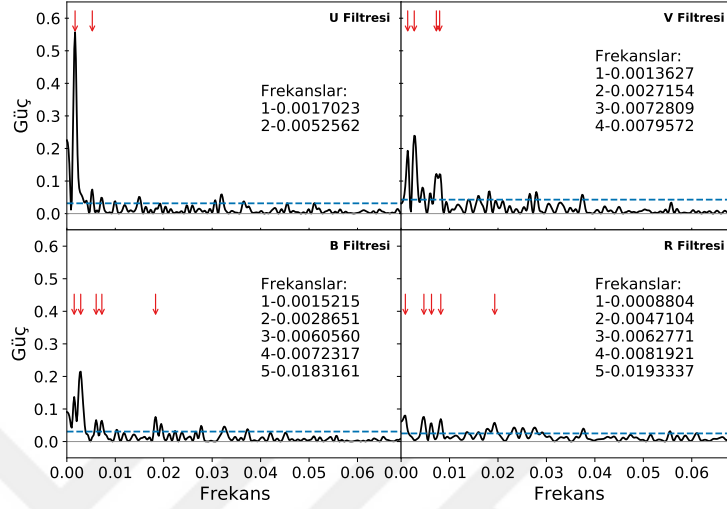


şekil 3.45: AG Dra'nın TUG T60 verileri ile elde edilmiş renk değışimleri.

$JD - 2400000 \approx 59170$ değerinden itibaren U filtresinde uzun süreli bir parlama göröölür. Parlamanın U filtresinde belirgin bir şekilde görölmesi disk ve/veya beyaz cüce kaynaklı bir parlama olduğunu göstermektedir. $B - V$ rengine bu süreçte bir değışim olmaması bunu desteklemektedir.

Işık eğrisinde $59170 \lesssim JD - 2400000 \lesssim 59780$ arası sinüs dalgası benzeri bir değışim göröölür. Schmid and Schild (1997) yörünge eğikliğini yaklaşık $i = 60^\circ \pm 8^\circ.2$ olarak belirlemiştir. Bu değışim yörüngeye bağlı bir harekettir. Sinüs dalgası benzeri değışimde parlaklık artışının olduğu kısım diskin en fazla görööldüğu, parlaklık azalmasının olduğu kısım diskin en az görööldüğu kısımdır.

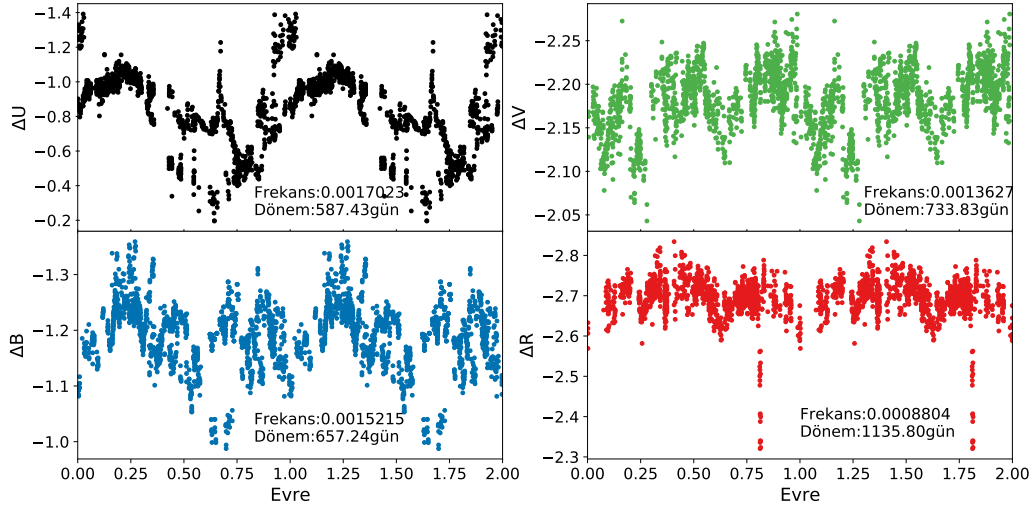
Lomb-Scargle Periodogram'ı ile gerçekleştirilen dönem analizi sonucunda U , B , V ve R bantları için elde edilen güç tayfları ve bazı frekans değerleri Şekil 3.46'da verilmektedir.



Şekil 3.46: AG Dra'nın TUG T60 verilerinin dönem analizi sonucu elde edilmiş güç tayfı grafikleri. Oklar soldan sağa sırayla 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı frekans değerlerinin yerini göstermektedir. Kesikli çizgi 5σ değerini ifade eder.

Dönem analizi sonucu U filtresinde 587.43 günlük bir dönem belirlenirken, B ve V filtrelerinde sırasıyla 657.24 ve 733.83 günlük dönemler bulunmuştur. R filtresinin dönem analizinde en belirgin değişim 1135.80 günlük bir dönem değerine denk gelmektedir. Buna karşılık B ve V filtrelerinde sırasıyla yaklaşık 349.03 (~ 0.0028651 gün $^{-1}$) ve 368.26 günlük (~ 0.0027154 gün $^{-1}$) dönem değerleri belirlenmiştir. Bu dönemler kırmızı devin zonklama dönemi ile ilgili olabilir. Kırmızı devin zonklama dönemi olarak belirlenen 355 günlük dönemin radyal olmayan bir zonklama olabileceği önerilmiştir (Gális et al., 1999).

Şekil 3.47'de TUG T60 verilerinden elde edilerek UBVR filtreleri için evrelendirilmiş ışık eğrileri görülmektedir. Evrelendirilmiş ışık eğrilerinde T_0 değeri için, Gális et al. (1999) tarafından fotometrik minimum ile belirlenmiş ışık öğeleri zamanı kullanılmıştır: $JD = (2443629.17 \pm 2.30) + (549.73 \pm 1.59) \times E$.



Şekil 3.47: AG Dra'nın TUG T60 verileri kullanılarak evrelendirilmiş ışık eğrileri.

Dönem analizi sonucu elde edilen yörünge dönemi literatürde belirtilenlerden uzun çıkmıştır. TUG T60 gözlemlerinin zaman aralığı ~ 1180 gün olduğundan henüz yaklaşık 2 çevrim elde edilmiştir. Daha hassas dönem çözümleri için gözlemlere devam edilmektedir.

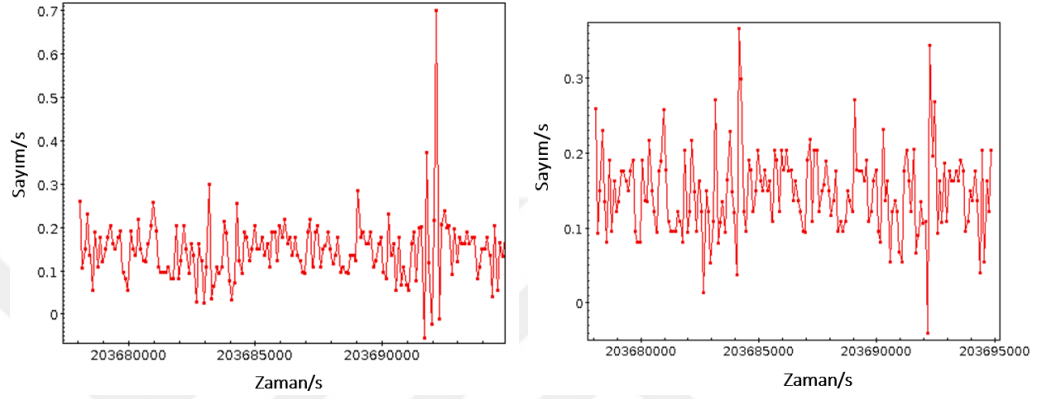
3.9.3 X-ışın Gözlemleri

XMM-Newton Gözlemleri

AG Dra'nın *XMM-Newton* arşivinde 6 adet gözlem verisi bulunmaktadır (Ekim 2003, Kasım 2003, Haziran 2004, Haziran 2005, Temmuz 2005 ve Temmuz 2006). EPIC-pn kamerası ile Ekim 2003 ve Temmuz 2006 gözlemi dar pencerede ve orta (medium) filtre ile, Kasım 2003, Haziran 2004 - 2005 ve Temmuz 2005 gözlemleri geniş pencerede ince filtre ile gözlenmiştir.

XMM-Newton gözlemlerinin iki tanesi (Haziran 2004 ve Haziran 2005) sakın evreye, geri kalanı optik patlama evrelerine yakın zamanlara denk gelmektedir. **Temmuz 2006** (Gözlem ID: 0151530501) gözlemi ise şiddetli bir parlama evresinin maksimumuna yakın bir zamanda gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 28 ks'lik bir gözlem süresine sahiptir. Sistemin X-ışın tayfını oluşturacak yeterli foton elde edilemediğinden Temmuz 2006 gözleminin analizi yapılamamıştır.

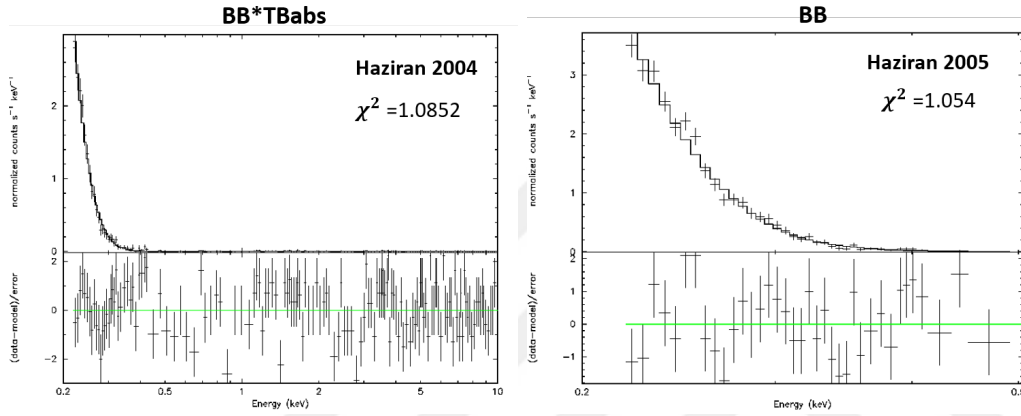
Sisteme ait gözlemlerin X-ışın ışık eğrileri elde edilmiştir. Örnek olarak Şekil 3.48’de Haziran 2004 gözlemine ait 0.2-10 keV (sol grafik) ve 0.2-2 keV (sağ grafik) aralığındaki X-ışın ışık eğrileri görülmektedir. Özellikle yumuşak X-ışın kaynağı olduğundan yumuşak X-ışın enerji aralığında ışık eğrilerine de bakılmıştır. Işık değişimlerinin incelenmesi sonucunda belirgin bir değişim belirlenmemiştir.



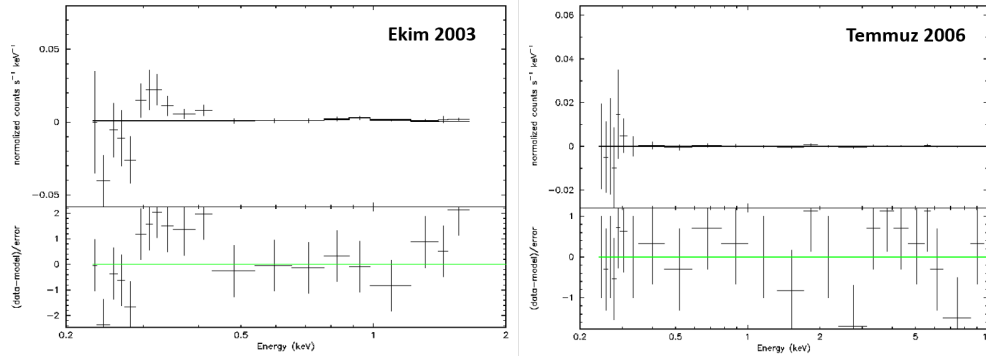
Şekil 3.48: AG Dra’nın Haziran 2004 tarihli *XMM-Newton* gözleminin tüm enerji bandında (sol: 0.2 – 10 keV) ve yumuşak enerji bandında (sağ: 0.2 – 2 keV) X-ışın ışık değişimi.

Sakin evredeki Haziran 2004 - 2005 (sırasıyla, Gözlem ID: 0147130101 - 0147130901) gözlemlerinde tipik çok yumuşak X-ışın kaynağı davranışı görülmektedir. **Haziran 2004** (Gözlem ID: 0147130101) gözleminin gözlem süresi yaklaşık 18.7 ks’dir. X-ışın tayfını modellemek için tek bir *kara cisim* (BB) modeli yeterli olmuştur. Elde edilen kara cisim sıcaklığı ~ 0.018 keV’dir. Burada indirgenmiş χ^2 değeri 1.0177’dir (Null hipotez olasılığı yaklaşık %43). Ek olarak, sistem doğrultusundaki galaktik kolon yoğunluğu ($4.02 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$) dikkate alınarak *soğurma* katkılı *kara cisim* modeli uygulanmıştır. Burada elde edilen kara cisim sıcaklığı ~ 0.013 keV’dir. Bu model için indirgenmiş χ^2 değeri 1.0852’dir (Null hipotez olasılığı yaklaşık %23). χ^2 değerleri oldukça birbirine ve optimum değere yakın olsa da, Null hipotez olasılığı tek *kara cisim* modeline daha iyi bir istatistiksel sonuç vermektedir. Ancak sistemin çok uzak bir kaynak olması ve galaktik kolon yoğunluğundan etkilenmesi nedeni ile n_H değerini dikkate almak gerekir. Aynı gözlemlerin X-ışın analizini gerçekleştiren González-Riestra et al. (2008), galaktik hidrojen kolon yoğunluğunu $2.7 \times$

10^{20} cm^{-2} olarak dikkate almıştır. Farklı kolon yoğunluklarına karşın benzer modeller ve model çıktıları elde edilmiştir. **Haziran 2005** (Gözlem ID: 0147130901) tarihinde gerçekleştirilen gözlemin süresi yaklaşık 22 ks'dir ve Haziran 2004 gözlemi ile oldukça benzer X-ışın tayflarına sahiptir. Tek *kara cisim* modeli ile elde edilen sıcaklık 0.022 keV'dir (indirgenmiş $\chi^2 = 1.054$). Şekil 3.49 sırasıyla modellenen Haziran 2004 ve Haziran 2005 gözlemlerini göstermektedir.



Şekil 3.49: AG Dra'nın Haziran 2004 (sol) ve 2005 yılı (sağ) *XMM-Newton* tayf analizi. 2004 yılı verisine soğurma kaynaklı kara cisim modeli ($\text{BB} \times \text{TBabs}$) uygulanırken, 2005 yılı verisine karacisim (BB) modeli uygulanmıştır.

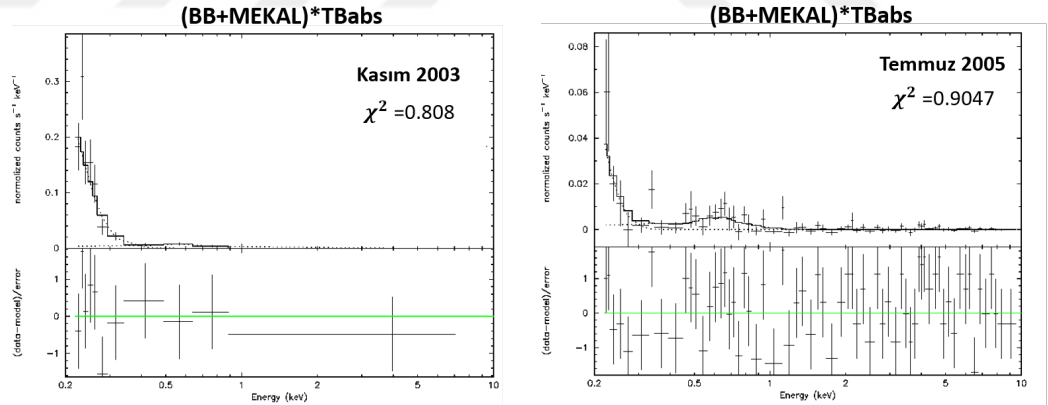


Şekil 3.50: AG Dra'nın Ekim 2003 ve Temmuz 2006 gözlemlerinin model tayfı.

Ekim 2003 (Gözlem ID: 0151530401) gözlemi sistem optik rejimde aktif evrede iken yapılmıştır. Poz süresi yaklaşık 25 ks'dir. Gözlemin X-ışın tayf analizi sonucunda elde edilebilen tek bilgi yumuşak X-ışın kaynağının varlığıdır. Tayfta negatif sayım değerleri belirlenmiştir (Şekil 3.50'deki sol grafik). Farklı arkaplan alanları seçilip tayf analizi tekrarlınsa da negatif sayım değerleri her

defasında karşımıza çıkmıştır. Arka planın kaynaktan daha parlak değerler vermesi nedeniyle tayfin modellenmesi sağlıklı bulunmamıştır. Negatif sayım değerleri González-Riestra et al. (2008) tarafından yapılan tayf analizinde de görülmüştür.

Kasım 2003 (Gözlem ID: 0147131101) gözlemi aktif evrede gerçekleştirildiğinden X-ışın bölgesinde sönük bir kaynak olarak görülür (Şekil 3.51’de sol grafik). Gözlemin süresi yaklaşık 42.7 ks’dır. Işık eğrisinde belirgin herhangi bir değişim belirlenememiştir. Elde edilen modelde, *soğurma* katkılı ~ 0.017 keV düşük sıcaklığa sahip bir *kara cisim* kaynağı ve 0.2 keV değerinde bir *sıcak plazma* kaynağı elde edilmiştir (bu model kısaca $(BB+mekal)*TBabs$ olarak kodlanmıştır). İndirgenmiş χ^2 değeri 0.808 civarındadır ve optimum değerden biraz düşüktür. Aslında González-Riestra et al. (2008) tayfı sadece tek bir *kara cisim* ile modellemiştir. Tayf analizi sırasında çok belirgin olmayan bir sıcak plazma salması görülmektedir. Sıcak plazma salması için *mekal* modeli kullanılmıştır.



Şekil 3.51: AG Dra sisteminin Kasım 2003 (sol) ve Temmuz 2005 (sağ) gözlemlerinin X-ışın tayfı. Uygulanan modellerin kısaltması grafiklerin üstünde görülmektedir.

Sıcak plazma salması **Temmuz 2005** (Gözlem ID: 0147131001) gözleminde daha net görülür (Şekil 3.51’de sağ grafik). Bu gözlemin süresi yaklaşık 25.8 ks’dır. Temmuz 2005 gözlemi de Kasım 2003 gözlemi gibi *soğurma* katkılı *kara cisim* kaynağı ve bir *sıcak plazma* kaynağı göstermektedir. Modelin indirgenmiş χ^2 değeri 0.9047’dir. İki gözlemden de elde edilen *kara cisim* ve *mekal* sıcaklıkları yakın değerler vermiştir (Bkz. Tablo 3.10).

AG Dra'nın *XMM-Newton* X-ışın gözlemlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.10'da verilmektedir.

Tablo 3.10: AG Dra sisteminin *XMM-Newton* verilerinden elde edilmiş model sonuçları. **Gaia* DR2'den elde edilen sistem uzaklığı $d = 4.7596 \pm 0.5384$ kpc.

Gözlem Tarihi	χ^2	T_{BB} (keV)	T_{MEKAL} (keV)	TBabs (10^{22}cm^{-2})	$F_X(\times 10^{31})$ ($\text{ergcm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$L_X(\times 10^{31})^*$ (ergs^{-1})
Ekim 2003	-	-	-	-	-	-
Kasım 2003	0.808	0.0168	0.2021	4.0209E-02	1.1971E-13	32.431
Haziran 2004	1.0852	0.0126	-	4.0209E-02	1.3914E-12	377.65
Haziran 2005	1.054	0.0215	-	-	1.7151E-12	464.65
Temmuz 2005	0.9047	0.0108	0.2407	4.0209E-02	3.3617E-14	9.1073
Temmuz 2006	-	-	-	-	-	-

Swift Gözlemleri

Swift arşivinde AG Dra sistemine ait 103 gözlem bilgisi bulunmaktadır (Bkz. Tablo 3.1). Bu gözlemlerin ön indirgeme işlemleri, Bölüm 3.3'te bahsedilen ve tez kapsamında oluşturulan python betikleri ile gerçekleştirilmiştir. Gözlemlerin 20 tanesinde indirgeme için gerekli EVENTFILE bulunmaktadır. Geriye kalan 83 verinin ön indirgemesi yapılmıştır. Analiz sonucunda verilerin yaklaşık 26 tanesinde indirgeme için gerekli *arf* dosyasının bulunmadığı tespit edilmiştir. Analiz edilebilir 57 gözlem verisi incelendiğinden kaynağın X-ışın tayfını üretmek için yeterli sayıya sahip olmadığı belirlenmiştir.

4 SİMBİYOTİK YILDIZLARIN NÜMERİK ÇÖZÜMLERİ

Simbiyotik sistemlerde disk, rüzgâr ve jet ile ilgili sorulara yanıt bulmak için oluşturulacak jet ve disk simülasyonları hidrodinamik veya manyetohidrodinamik bağlamda incelenebilir. Literatüre bakıldığında genel olarak simbiyotik yıldızların simülasyonları hidrodinamik bağlamda ele alınmıştır (García-Arredondo and Frank, 2004; Stute and Sahai, 2007; de Val-Borro et al., 2017; Lee et al., 2022). Bu nedenle bu sistemlerin (özellikle jet yapılarına sahip olanların) manyetohidrodinamik olarak ele alınması literatürdeki açığı doldurmak açısından önemli olabilir.

Simbiyotik yıldızlar birçok astrofiziksel yapıyı (yıldız rüzgârları, toplanma diski, sistemi saran gaz ve toz yapısı, jet ve jet benzeri yapıları vb.) bir arada barındırır. Böylece bir sistemde farklı süreçlerin çalışmasına olanak sağlar. Büyük yörünge ayrıklıklara sahip olmaları sistem bileşenlerinin daha ayrıntılı incelenmesi açısından yarar sağlayabilir. Bu yapıları daha iyi anlayabilmek için, nümerik çözümleri öğrenmek amacı ile TÜBİTAK 2214-A “Doktora Sırası Yurt Dışı Burs Programı” kapsamında Almanya *Max Planck Institut for Astronomy* ziyaret edilerek ortak çalışmalar yapılmıştır.

Nümerik simülasyonlar grid yöntemi kullanan, astrofiziksel problemleri hem hidrodinamik (HD) hem de manyetohidrodinamik (MHD) açıdan inceleme imkanı sunan PLUTO kodu (versiyon 4.3) ile gerçekleştirilmiştir (Mignone et al., 2007, 2012). Kodu öğrenmek amacıyla deneme simülasyonlarının yanı sıra bir başlangıç projesi gerçekleştirilmiştir. Bu proje bükülmüş jet yapılarının (M)HD simülasyon çalışmalarına dayanmaktadır.

Simbiyotik sistemlerin hem sıcak hem de soğuk bileşenlerinin yıldız rüzgârları bulunmaktadır. Yıldız rüzgârlarının toplanma disklerinin ve eğer varsa jet yapılarının beslenmesinde önemli bir etkisi vardır. Bu nedenle sıkışık bileşenden çıkan bir jet akışı ile soğuk bileşen yıldız rüzgârları etkisi araştırılmaya başlanmıştır.

4.1 PLUTO Kodu

PLUTO, astrofiziksel problemleri hem hidrodinamik (HD) hem de manyetohidrodinamik (MHD) açıdan inceleme olanağı sunar (Mignone et al., 2007, 2012). PLUTO dinamik kararsızlıklar, şok üretimi ve MHD çözümleri için iyi sonuçlar veren grid (ızgara) yöntemini kullanır. Bu yöntemde akışkan hareketlerinin çözümü, Euler grid aracılığı ile gerçekleşir. Grid metodu hücreler boyunca bilginin hesaplanması ve taşınması ile akışkan denklemlerin çözülmesini sağlar. Böylece sınırlı bir çerçeve içinde hesaplama yapılmasına olanak verir. Çalışma bölgeleri, yani gridler ne kadar artırılırsa simülasyon çözünürlüğü ve dolayısıyla simülasyon süresi de grid sayısına bağlı olarak artar. Bu kod, temel olarak C dilinde yazılmıştır. Çalıştırılması için C++ ve Fortran dillerine ihtiyaç duyar.

PLUTO'nun fiziksel çözümleri aşağıda ifade edilen korunum denklem sisteminin integrasyonu ile gerçekleşir:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = -\Delta \cdot \mathbf{T}(\mathbf{U}) + \mathbf{S}(\mathbf{U})$$

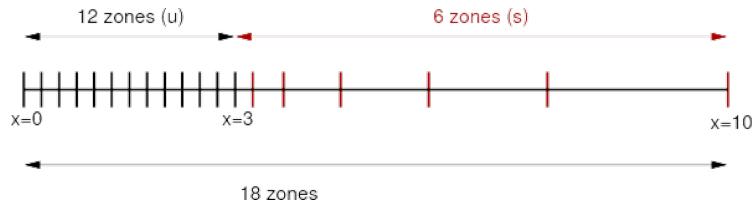
Burada U korunum niceliklerini, $T(U)$ akı tensörünü ve $S(U)$ kaynak fonksiyonunu ifade eder. Bu niceliklerin açık biçimi seçilen fizik modülüne bağlıdır. PLUTO kodunda kullanılabilecek fizik modülleri, (1) Newtonian hidrodinamik, (2) manyetohidrodinamik (ideal ve resistif), (3) özel görelilik hidrodinamiği, ve (4) özel görelilik manyetohidrodinamiğidir.

Akışkan nicelikleri dikdörtgensel sınırlar ile çevrelenen hesaplama alanlarıyla ayrıştırılır. Verilen hesaplama şablonunda sınır durumlarının sağlanması için koruma (guard) ya da hayalet (ghost) hücreleri ile hesaplama alanı genişletilebilir. Hesaplamalar çift etkili hassasiyet aritmetiği (double precision arithmetic) kullanılarak yapılır.

Belirli bir problemin çözümü için yapılacak ilk adım PLUTO'yu yapılandırmak ve kurulumu hazırlamaktır. Bunun için kurulum bilgilerinin kayıtlı tutulacağı 4 ana dosyaya (**definition.h**, **makefile**, **pluto.ini** ve **init.c**)

ihtiyaç vardır. **definition.h**, nümerik çözümün fiziksel tanımlarını içerir. Bu tanımlar fizik modülü, simülasyon boyutu, kullanılmak istenen koordinat sistemi, dinamik zaman çözümlerinin gerçekleştirileceği yöntem gibi kodun temel fizik tanımlarıdır. **makefile**, C tabanlı kaynak kodu dosyalarının derlenmesi için gerekli olan komutları içerir. Kodun derleme seçimi burada yapılır ve kod, seri ya da paralel olarak çalıştırılabilir. Kodun grid bilgisini, çalışma zaman parametrelerini ve PLUTO'nun makrolarını içeren başlangıç dosyası **pluto.ini** olarak adlandırılır. Son olarak problem kurulumu, sınır koşulları ve başlangıç parametreleri **init.c** dosyasında tanımlanır.

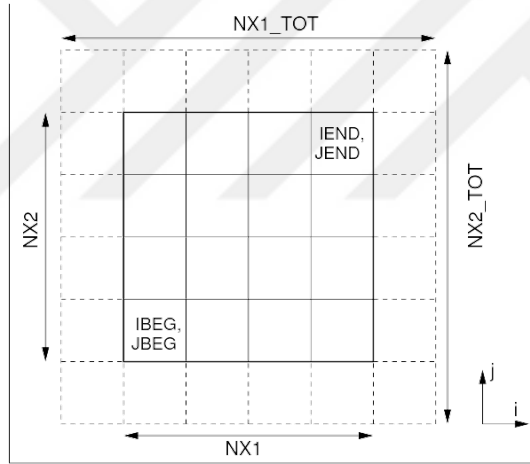
PLUTO, uniform ve uniform olmayan grid türlerinin kullanılmasına izin verir. Böylece fiziksel etki alanı farklı grid türleri ile tanımlanabilir. Bu grid türleri uniform (u), uzatılmış (stretched) (s) ve logaritmik ($\pm l$ mesh boyu koordinatla birlikte artar ya da azalır) olarak üç farklı türdedir. Gridler tek bir grid türü ile ya da ardışık farklı grid türleri ile tanımlanabilir. Ardışık grid türleri, düğümler aracılığı ile birbirine bağlanır. Şekil 4.1'de sadece x ekseninde örneklendirilmiş ardışık iki farklı grid türünün oluşturduğu grid yapısı görülmektedir. $x = 3$ noktası, iki farklı grid türünü ayıran düğüm noktasıdır. Sol tarafta uniform grid yapısı 12 bölge ile tanımlı iken, sağ tarafta uzatılmış grid yapısı 6 bölge ile tanımlanmıştır. Şekilde sadece x eksenı boyunca oluşturulan grid tasarımı görülmektedir. Her eksen için grid tasarımı amacına uygun olarak ayrı ayrı yapılır. Böylece hesaplama alanlarının yönetimi grid yapısının oluşturulması ile gerçekleşir. Farklı grid türlerinin kullanımı ile simülasyon için gerekli zaman kısaltılabilir.



Şekil 4.1: 1 boyutta uygulanan, $x = 0$ ile 10 arasında ardışık uniform ve uzatılmış grid türleri kullanılarak elde edilmiş grid tasarımı. Bu görsel PLUTO kodu kullanıcı rehberinden alınmıştır (PLUTO Team, 2021).

Her doğrultudaki hesaplama alanı tam sayı değişkenleri ile tanımlanır.

Örneğin, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi i tam sayısı etki alanının başlangıç ve bitiş aralığında yer alır ($IBEG \leq i \leq IEND$). Sınırlardaki şablonun tamamlanması için alanın etrafına hayalet hücreler tanımlanır (Bkz. Şekil 4.2’deki kesikli çizgiler). Bu alanlar sayesinde başlangıç ve bitiş sınırlarına belli özellikler verebilmek mümkündür. Bu özellikler birçok farklı seçenekle oluşturulabilir, ancak burada sadece 3 tanesine yer verildi. Sınırlar “outflow” seçeneği ile tanımlanabilir, böylece sınırlardan madde giriş ve çıkışına izin verilir. Bunun anlamı akışkanın herhangi bir gradyentten etkilenmeden sınırın dışına kolayca hareket edebilmesidir. Bu sınırlar “reflective” olarak tanımlanabilir; akış sınırlara ulaştığında, hesaplama kutucuğunun/alanının içine geri yansıtacaktır. Eğer sınırlar kullanıcı tarafından özel olarak tasarlanmak isteniyorsa, “userdef” kontrolü ile özel olarak oluşturulabilir.



Şekil 4.2: 2 boyutlu koordinat sistemindeki $NX1 \times NX2$ uzayı için oluşturulan grid alanı (düz çizgi) ve onu çevreleyen grid yapısının sınırlarını oluşturan hayalet hücreler (kesikli çizgiler). Bu görsel PLUTO kodu kullanıcı rehberinden alınmıştır (PLUTO Team, 2021).

Yukarıda bahsedilen 4 dosyanın oluşturulması ile kod çalıştırılmaya hazır hale gelir. Simülasyonun fiziksel zamanı seçilen fizik modülüne ve grid yapısına, yani çözünürlüğüne bağlıdır. Simülasyonun kurulumu kadar görselleştirme aşaması da önemlidir. Görselleştirme işlemi tercih edilen bir araç ile yapılabilir (gnuplot, python, IDL vb.). Bu çalışmada *python* aracı tercih edilmiştir.

4.2 Bükük Jet Yapı Simülasyonları

Simbiyotik yıldızların yaklaşık %10'u jet ve jet benzeri bipolar yapılar göstermektedir. Birçok çift yıldızda ve genç yıldızimsı cisimlerin (Young Stellar Objects; YSOs) jet yapılarında görülen bükük (C- ya da S-şekilli) jet akışları simbiyotik yıldızlarda da görülen bir olgudur. Simbiyotik sistem olan R Aqr'nin optik ve moröte gözlemleri (Bkz. Bölüm 2.5.2), bu sistemin oldukça belirgin bir S-şeklindeki jet yapısına sahip olduğunu göstermektedir (örneğin, Melnikov et al., 2018).

SySt'de gözlenen jet yapıları özellikle çift/çoklu yıldız sistemlerinde ve yüksek presesyon açıları gösteren mikrokuasarlar ile benzerlik göstermektedir. Çoklu yıldız sistemlerindeki yörünge hareketi ve/veya yüksek presesyon açıları ile maddeden çıkan yüksek hızlı (simbiyotik sistemler için yaklaşık 1000 km s^{-1}) jet yapıları eğrilerek S- ya da C-şeklinde uzaya yayılır.

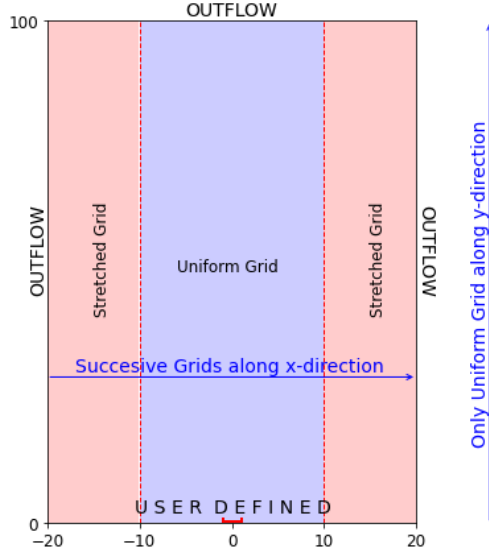
Bu çalışma kapsamında, yüksek hızlı bükük jet yapıları için simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlar farklı tasarımlar ve başlangıç değerleri içermektedir.

4.2.1 Simülasyon Kurulumu ve Sınırları

Bükük jet yapılarının tasarımı için iki farklı kurulum gerçekleştirilmiştir. Birincisi belli bir yörünge döneminde jet çıkış noktasının (*nozzle*) hareketi sonucu jet davranışının incelenmesini içerir (*orbiting jet - oj*). İkinci ise belli bir noktada sabitlenmiş merkezi cismin presesyon hareketi sonucu jet akışının davranışını incelemek için tasarlanmıştır (*precessing jet - pj*).

Simülasyonlar 2 boyutlu kartezyen düzlemde basit bir jet akışı üreten bir kurulumla sahiptir. Kodun sınırlarının tanınması açısından fiziksel parametrelere (jet hızı, ortam ve jet yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, vb.) farklı değerler verilmiştir. Böylece jet yapısının farklı fiziksel değerlerdeki davranışı ile ortam ve jet arasındaki etkileşimler yorumlanmaya çalışılmıştır. Daha sonra bu kurulumla yıldız rüzgârı eklenerek çalışma genişletilmiştir.

4.2.2 Hesaplama Alanı



Şekil 4.3: 2 boyutlu kartezyen koordinat sistemindeki sınır durumları ve hesaplama alanının yapısı. x eksenı boyunca, kırmızı bölge stretched grid bölgesini gösterirken, mavi bölge uniform grid bölgesini göstermektedir. y eksenı sadece uniform grid hücreleri ile tanımlanmıştır. x eksenı sıfır noktasında görülen kırmızı yapı jet akışının üretildiği çıkış noktasını göstermektedir ve yarıçapı 1 birimdir.

Hesaplama alanının sınırları $-80 \leq x \leq 80$ ve $0 \leq y \leq 200$ değerlerine kadar uzanmaktadır. Hesaplama alanı tasarımının bir örneği Şekil 4.3'te verilmiştir. Burada verilen uzunluk değerleri kod birimindedir²⁰ ve jet yapıçapı (r_{jet}) 1 birim kabul edilmiştir. Jet çıkış noktası $x = 0$ noktasında yer almaktadır ve Şekil 4.3'te kırmızı bir kapı ile temsil edilmiştir. y eksenı boyunca *uniform* 2000 grid hücresi tanımlanmıştır. x eksenı boyunca ise iki farklı ardışık grid türü kullanılmıştır; *uniform* ve *uzatılmış* gridler. Jet ana akışının içinde kaldığı alan *uniform* tanımlararak dış alanlar hesaplama zamanından kazanmak için *uzatılmış* olarak belirlenmiştir. *Uniform* ve *uzatılmış* grid

²⁰PLUTO genel olarak boyutsuz birimlerle çalışır (yazı içinde kod birimi olarak yer verilmektedir). Bu sayede parametreler uygun değerlere ölçeklenebilir. Prensipde doğrudan cgs birim sisteminde çalışmak mümkün olsa da, bu durum nümerik çözümlerin çok büyük ve küçük sayılar üretmesine neden olabilir. Bu değerler algoritma tarafından yanlış yorumlanabileceğinden, kodun geliştiricileri kod biriminde çalışılmasını şiddetle tavsiye etmektedir.

alanların sınırları jet ana akımının genişliğine göre simülasyondan simülasyona değişiklik göstermektedir. Örneğin, Şekil 4.3'te x doğrultusu $-20 \leq x \leq 20$ ve y doğrultusu $0 \leq y \leq 100$ sınır değerlerine sahip hesaplama alanında uygulanmış grid türleri ve hesaplama alanının sınır koşulları görülmektedir. $-10 \leq x \leq 10$ aralığı (mavi alan) *uniform* hücreler şeklinde tanımlanırken, $|\pm 10| < x$ bölgelerinde *uzatılmış* grid hücreleri tanımlanmıştır (kırmızı bölge). Gridlerin sınır değerleri değişse de *uniform* grid alanlarının çözünürlükleri hem x hem de y doğrultusunda $\Delta x = \Delta y = 0.05$ tutulmuştur.

Sınır durumları, jet çıkışının kontrolünü gerçekleştirmek üzere y ekseninin tabanı "*userdef*" kontrolü ile özel olarak tanımlanmış, diğer sınırlar ise açık (yani, "*outflow*" kontrolü) bırakılmıştır (Bkz. Şekil 4.3). $r_{jet} = 1$ olmak üzere, jet çıkışı $-1 \leq x \leq 1$ arasında gerçekleşir. Jet çıkış yeri Şekil 4.3'te $x = 0$ civarındaki kırmızı "kapı" ile gösterilmiştir.

4.2.3 Başlangıç Koşulları

PLUTO genel olarak kod biriminde çalıştığından, simülasyonlar kod biriminde ifade edilmektedir. Böylece simülasyon sonuçları birçok astrofiziksel cisim için ölçeklendirilebilecektir. Kolaylık sağlaması açısından jet yarıçapı 1 birim olarak tanımlanmıştır ($r_{jet} = 1$). Jet hızı, kod biriminde tüm simülasyonlar için 10 birim alınmıştır ($v_{jet} = 10$). Böylece dinamik zaman ölçeği $t_{dyn,jet} = v_{jet}/r_{jet}$ olur. Jet ve ortam yoğunluğu da kod biriminde sırasıyla $\rho_{jet} = 1$ ve $\rho_{ortam} = 0.1$ alınmıştır. Jet akışının yoğunluğu ortam yoğunluğundan 10 kat fazladır, $\eta = \rho_{jet}/\rho_{ortam} = 10$. Basınç jet içinde ve dışında $P_{jet} = P_{ortam} = 0.6$ alınarak aynı kabul edilmiştir. Bahsedilen bu başlangıç parametreleri hem yörünge hareketi hem de presesyon yapan jet kurulumları için ortaktır ve Tablo 4.1'de özetlenmiştir.

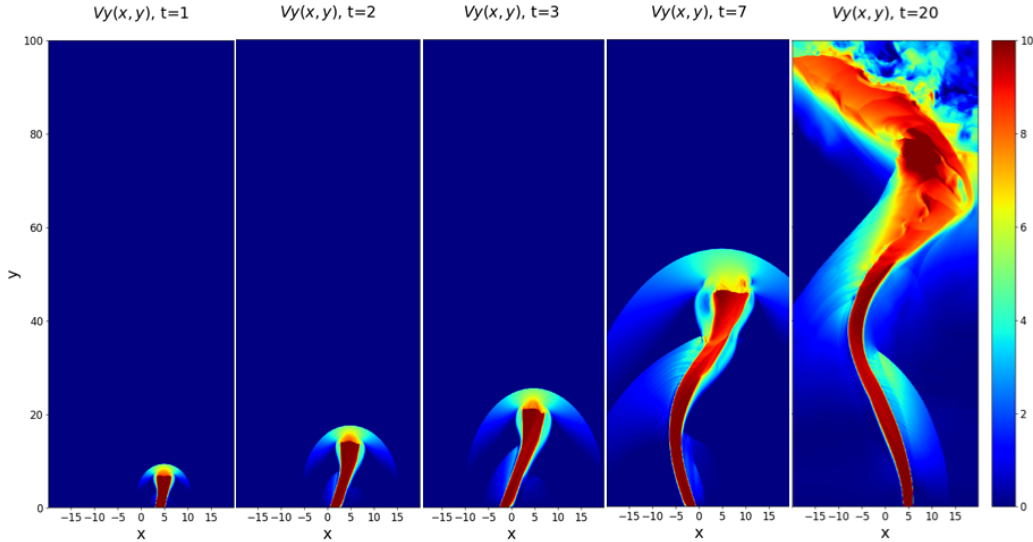
Her iki kurulum da öncelikle hidrodinamik (HD) sınırlarda incelenmiş ve daha sonra plazma beta (β) değeri 100, 10, 1 verilerek simülasyonlar manyetohidrodinamik koşullara genişletilmiştir.

Tablo 4.1: Yörünge hareketi yapan jet çıkış noktası ile belli bir noktada sabitlenen jet çıkış noktasının kurulumları için jet ve ortam başlangıç değerleri (tüm parametreler kod birimindedir).

	Ortam	Jet
Yoğunluk	0.1	1.0
Basıç	0.6	0.6
Hız	0.0	10.0
Plazma β	HD-100-10-1	HD-100-10-1

4.2.4 Yörünge Hareketinde Jet Simülasyonları

Bu kurulumla jet çıkış noktasının bir yörünge hareketi boyunca zamana bağlı olarak değişiminin çalışılması amaçlanmıştır. Jet kaynağının yörünge hareketi $x_{jet}(t) = a_0 \cos(\omega t)$ ile tanımlanmıştır. Burada a_0 çift arasındaki yörünge ayrıklığı ve P dönem olmak üzere $\omega = 2\pi/P$ 'dir. Böylece jet çıkış noktası $x_{jet}(t) + r_{jet}$ ve $x_{jet}(t) - r_{jet}$ arasında hareket eder. Seçilen zaman adımlarında jet çıkışının davranışı Şekil 4.4'te verilmektedir. Burada yörünge ayrıklığı kod biriminde 5 ve dönem 10 olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.4: Seçilen zaman adımlarında jet akışının yörünge hareketi boyunca davranışı. Renkler dikey hız bileşeninin (V_y) kod birimindeki değerlerini göstermektedir ve maviden kırmızıya hız değeri artmaktadır.

Yörüngeli jet kaynağı için oluşturduğumuz kurulumla, jet çıkışının

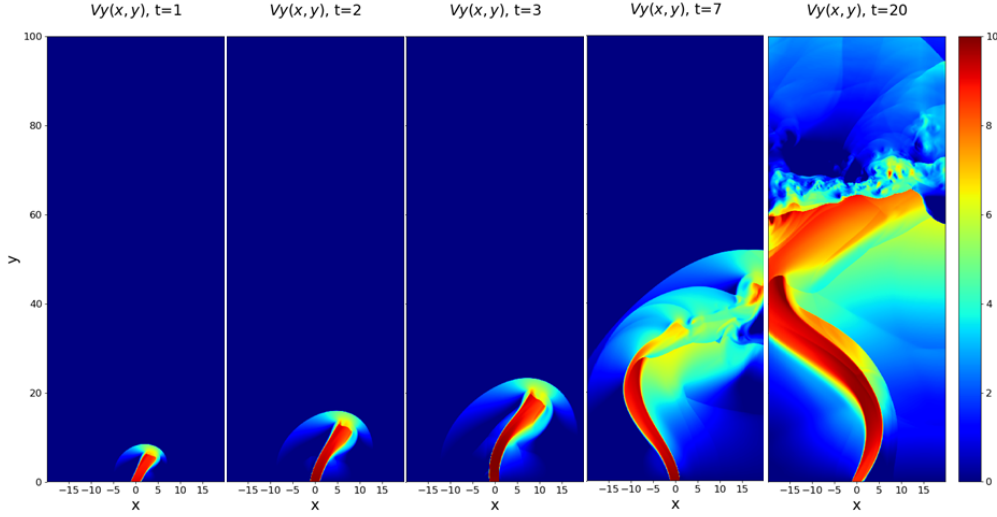
yörüngesel hareketinin jet yayılımını nasıl etkilediği ve bu etkilerin gözlenip gözlenemeyeceği incelenmiştir. Bunun yanı sıra jet yayılımına engel olacak sistem parametrelerinin olup olmadığı araştırmıştır.

Jet akışının evriminde bazı parametrelerin etkisi daha baskındır; (i) yörünge ayrıklığı, (ii) yörünge dönemi ve (iii) jet hızı. Jet hızını aynı tutarak, farklı yörünge ayrıklığı ve dönemleri için simülasyonlar gerçekleştirildi. Bunlar, $(P_{yör}, a)$ olmak üzere kod biriminde (10,5), (25,10) ve (25,5) değerleridir. Şekil 4.4 $(P_{yör}, a) = (10, 5)$ için çalıştırılan simülasyonun zaman evrimini göstermektedir. Diğer simülasyonların karşılaştırmaları için Fendt and Yardımcı (2022) çalışmasına bakılabilir.

4.2.5 Jet Presesyon Simülasyonları

Bükülmüş jet yapılarının oluşmasına diğer bir sebep, sıkışık cismin ya da toplanma diskinin presesyon hareketi yapmasıdır. Bu etkinin simüle edilmesinde jet çıkış noktasının hareket edebileceği dönme ekseninden bir açı tanımlanmıştır (α_{jet}). Jet hızı bu açının bir fonksiyonudur ve toplam jet hızı zamanda sabittir ($v_{jet}^2 = v_{x,jet}^2 + v_{y,jet}^2$). Jet hızları $v_{x,jet} = v_{jet}\sin(\alpha_{jet})$ ve $v_{y,jet} = v_{jet}\cos(\alpha_{jet})$ olarak tanımlanmıştır. Böylece jet çıkış noktası belli bir maksimum açı ($|\alpha_{max}|$) değeri arasında hareket ederek hesaplama alanına madde çıkışı sağlar. Burada P_{preses} presesyon periodu olmak üzere, $\alpha_{jet} = \alpha_{max}\cos(\Omega t)$ ve $\Omega = 2\pi/P_{preses}$ 'dir. Bu kurulumda jet kaynağının uzaysal hareketi yoktur, $x_{jet}(t) = 0$. Presesyon periyodunun başlangıç değeri kod biriminde 10 olarak tanımlanmıştır.

Simülasyonlar $\alpha_{max} = 10, 30, 45, 60$ ve 75° değerleri için uygulanmıştır. Tüm simülasyon karşılaştırmaları için Fendt and Yardımcı (2022) çalışmasına bakılabilir. Presesyon açısının $< 45^\circ$ olduğu değerlerde, erken zaman adımlarında C-şeklinde jet yapıları görülmüştür. İlerleyen zaman adımlarında bu yapılar S-şeklindeki yapılara dönüşmüştür (Bkz. Şekil 4.5). Ancak daha büyük presesyon açı değerlerinde sadece C-şeklinde bir jet çıkışı gözlenmiş ve jet çıkışları merkezi kaynaktan çok uzak bölgelere taşınamamıştır.



Şekil 4.5: Seçilen zaman adımlarında $\alpha_{max} = 30^\circ$ için elde edilen jet presesyon simülasyonları. Renkler dikey hız bileşeninin (V_y) kod birimindeki değerlerini göstermektedir ve maviden kırmızıya hız değeri artmaktadır.

4.2.6 Normalizasyon

Simülasyonlarda kullanılan tüm fiziksel nicelikler kod birimindedir. Bu nedenle bu parametrelerin astrofiziksel değerlere dönüştürülmesi gerekir. Parametrelerin yeniden ölçeklendirilmesi için astrofiziksel nesnelerin (SySt, YSO vb.) tipik değerleri ile karşılaştırmak gerekir.

Simülasyonlarda $r_{jet} = 1$ olarak alınmıştır. Bu durumda dinamik zaman ölçeği $t_{dyn} = 1/v_{jet}$ olur. Tüm kurulumlarda başlangıç jet hızı $v_{jet} = 10$ olarak alınmıştır. Böylece kod biriminde dinamik zaman ölçeği $t_{dyn} = 0.1$ olarak elde edilir.

Simbiyotik yıldız gözlemleri, jet hız değerlerinin 200 km s^{-1} 'den daha büyük olduğunu göstermektedir. Bu sistemlerin yörünge ayrıklıkları ise birkaç astronomik birimden (AB) birkaç 10 AB ölçeklerine değişmektedir. SySt'lerin çoğunluğu birkaç AB ölçeklerinde yörünge ayrıklığına sahiptir. Bu bilgiler doğrultusunda yörünge ayrıklığı 5 AB ve jet hızı 250 km s^{-1} kabul edilirse, dinamik zaman ölçeği $t_{dyn} = 5 \text{ AB}/250 \text{ km/s} = 0.2 \text{ yıl}$ olur. Bu durum $(P_{yör}, a) = (10, 5)$ kurulumu üzerinden ele alınırsa, sistemin toplam kütlesi

aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$M_{\star} = 34 M_{\odot} \left(\frac{a}{5 \text{ AB}} \right)^3 \left(\frac{P_{yör}}{2.38 \text{ yıl}} \right)^{-2}$$

Simbiyotik sistemlerde bu kütle değeri fiziksel açıdan imkansızdır. Simbiyotik yıldızların sıkışık bileşenleri genel olarak Chandrasekhar kütle limitini ($\sim 1.44 M_{\odot}$) aşamayan beyaz cücelerdir (nötron yıldızı barındıran birkaç SySt bulunmaktadır, örn. Hinkle et al., 2009a). Bu sistemlerde beyaz cücelerin çoğunluğu $< 1 M_{\odot}$ kütle değerlerinde olmasına rağmen, bipolar madde çıkışı gösteren simbiyotik sistemlerin sıkışık cisim kütlesi Chandrasekhar kütle limitine yakın kütleli beyaz cücelerdir. Soğuk bileşen ise ortalama olarak yaklaşık birkaç $M_{\odot}$ değerine sahiptir.

Simülasyonlarda yörünge dönemini artırmak simbiyotik yıldızlardaki bileşenlerin toplam kütle değerlerine yaklaşmaya yardımcı olur. Bu durumda, $(P_{yör}, a) = (25, 5)$ kurulumu ele alındığında $t_{dyn} = 1.25 \text{ AB}/250 \text{ km/s} = 0.05 \text{ yıl}$ olarak hesaplanır. Böylece sistem bileşenlerinin toplam kütle değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$M_{\star} = 1.38 M_{\odot} \left(\frac{a}{1.25 \text{ AB}} \right)^3 \left(\frac{P_{yör}}{1.2 \text{ yıl}} \right)^{-2}$$

Bu şekilde tüm kurulumların kod parametreleri sadece SySt'ler için değil birçok astrofiziksel sistem için yeniden ölçeklendirilebilir.

4.3 Jet ve Yıldız Rüzgârları Etkileşim Simülasyonları

Simbiyotik yıldızların soğuk bileşeni evrimleşmiş bir kırmızı devdir. Dev yıldızların güçlü yıldız rüzgârlarına sahip olduğu bilinmektedir (tipik rüzgâr hızları $< 100 \text{ km s}^{-1}$, Espey and Crowley, 2008). SySt'lerin sıkışık bileşenden çıkan jet akışları yıldız rüzgârları ile beslenebilir ve etkileşebilir. Bu nedenle, jet akışlarının yıldız rüzgârı ile nasıl etkileştiğini araştırmak bir motivasyon kaynağıdır.

Yıldız rüzgârları simülasyonu için 2 boyutlu kartezyen koordinat sisteminde hem x hem de y doğrultusunda uniform gridler tanımlanmıştır.

Gridlerin sınırları $-40 \leq x \leq 40$ ve $0 \leq x \leq 200$ şeklindedir. n , grid sayısı olmak üzere, $n_x = 800$ ve $n_y = 2000$ adet grid kullanılmıştır. Böylece simülasyonlar, her iki doğrultuda $\Delta x = \Delta y = 0.1$ olan eşit çözünürlük değerine sahiptir. Aynı zamanda simülasyonlar daha yüksek çözünürlüklü değerlerde de çalıştırılmaktadır ($\Delta x = \Delta y = 0.05$).

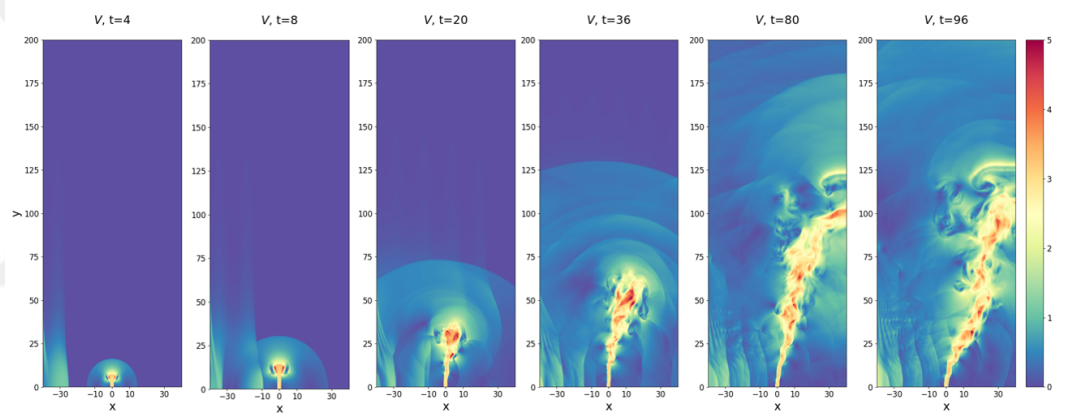
Jet yarıçapı bükük jet simülasyonları ile aynı birimde alınmıştır. Kod biriminde $r_{jet} = 1$ yarıçapından hesaplama alanına jet akışı yayılmaktadır (dinamik zaman ölçeği $t_{dyn} = 1/v_{jet}$). Jet hızının başlangıç değeri, yıldız rüzgâr değerine bağlı olarak tanımlanmıştır. Jet hızı rüzgâr hızının 3 katı olarak tanımlanmıştır ($v_{jet} = 3v_{rüzgar}$). Buradaki jet tasarımında, iki farklı jet çıkış geometrisi kullanılmıştır. İlki, uzaysal olarak sabit jet çıkış noktasının tek doğrultuda çıkış yapması şeklinde tanımlanmıştır. İkincisi ise, bir önceki bükük jet simülasyonlarında presesyon yapan jet akış tasarımının aynısıdır (Bkz. Bölüm 4.2.5).

Yıldız rüzgâr etkisi, kodun hesaplama alan sınırının ötesindeki hayalet bölge adı verilen yerden gelecek şekilde tasarlanmaktadır. Buna yan-rüzgâr adı verilmektedir. Güçlü rüzgâra sahip dev yıldız hayalet bölgede hesaplama alanına $a_{rüzgar}$ uzaklığında yer almaktadır. Bu uzaklık yörünge ayrıklığını temsil etmez. Yörünge ayrıklığını hesaplamak için bu uzaklığa, jet ve x-eksen sınır değerinin eklenmesi gerekir. Bu durumda yörünge ayrıklığı $a_{yör} = a_{rüzgar} + |x|$ 'dir. “ $-x$ ” noktasında yer alan dev yıldızın rüzgârı için küresel yayılan madde çıkışı tanımı yapılmıştır.

Hesaplama alanı ve hayalet bölge arasındaki sınırlar farklı şekillerde tanımlanabilir (Bkz. Bölüm 4.1). Bükük jet simülasyonlarındaki kurulumlardan farklı olarak simülasyonlara yan-rüzgâr eklenmesi için x başlangıç sınırı “kullanıcı tanımlı” olarak ayarlanmıştır.

Küresel yayılan yıldız rüzgârının başlangıç yoğunluğu uzaklıkla doğru orantılı olarak azalmaktadır. $r = \sqrt{y^2 + |x|^2}$ ve ρ_0 başlangıç yoğunluk değeri olmak üzere, rüzgâr yoğunluğu $\rho_{rüzgar} = \rho_0/r$ şeklindedir. Başlangıç rüzgâr hızı, başlangıç kütle kayıp hızına $\dot{M}_0$ bağlıdır, $v_{rüzgar} = \dot{M}_0/4\pi\rho_0$.

Simbiyotik yıldızların kırmızı dev bileşenleri Mira-türü yıldızlar olabilir (Whitelock, 1987). Özellikle kızılöte bölgede D-türü simbiyotik yıldızlar olarak adlandırılan, sistemi saran gaz ve toz bakımından zengin olan sistemlerde bulunurlar. Bunun yanı sıra Mira değişenine sahip S-türü simbiyotik yıldız örneği de bulunmaktadır (Gaġan et al., 2019). Bu tür yıldızlar yaklaşık 100 gün mertebesinde zonklama dönemine sahiptir. Ek olarak, yıldız rüzgâr simülasyonlarına zonklama etkisi yaratacak dönemsel atımlar tanımlanmıştır. Şekil 4.6 düz jet çıkışı gösteren jet ile zonklayan yıldız rüzgârı deneme simülasyonlarının zaman evrimini göstermektedir.



Şekil 4.6: Zonklayan yıldız rüzgârının düz jet çıkışına etkisini gösteren simülasyonunun hız haritasının zaman evrimi. Renkler toplam hız bileşeninin ($V = (V_x^2 + V_y^2)^{1/2}$) kod birimindeki değerlerini göstermektedir ve maviden kırmızıya hız değeri artmaktadır.

PLUTO kodu birçok ışımsal soğuma fonksiyonları kullanmaya imkan verir (Teşileanu et al., 2008). Bu fonksiyonlardan kuvvet yasası ve tablo girdili soğuma fonksiyonu (tabulated cooling function) modülleri simülasyonlara uygulanmaktadır. Kuvvet yasasından farklı olarak “tabulated” modülü, analitik bir çözüm yapmaz. Burada fonksiyon girilen tablo sayesinde belirlenir. PLUTO’nun içinde yer alan soğuma tablosu 11. dereceden bir polinom fonksiyonu içermektedir.

4.4 Simülasyon Sonuçları

PLUTO kodunun ve simülasyon kontrollerinin öğrenilmesi için planlanan başlangıç projesi olan bükük jet simülasyonları geliştirilerek yayına dönüştürülmüştür (Fendt and Yardımcı, 2022). Böylece, farklı yörünge parametre değerleri ve farklı presesyon açıları ile yörünge hareketi ve presesyon sonucu jet çıkışının parametre çalışılması gerçekleştirilmiştir. Jet püskürme bölgesinin yörünge hareketi gerçekleştirdiği simülasyonlarda C-şekilli, presesyon yaptığı simülasyonlarda S-şekilli jetlerle karşılaşmıştır. Yapılan simülasyonlarda uzun zaman ölçeklerinde jetin uzun mesafelere yayıldığını ve eğrilğe sebep olan yanal (lateral) hareketin sönümlendiğini böylece geniş jet kanallarının oluştuğu görülmektedir. Böylece yıldızlararası ortam, yüksek hızlı jet malzemesi ile beslenmektedir. Buna benzer bir yapı R Aqr'nin gözlemleri ile uyum göstermektedir (Melnikov et al., 2018). R Aqr'nin 900 AB'ye varan geniş bipolar yapısı az uyartılmış gaz ile doludur. Melnikov et al. (2018) gazın kökeninin Mira bileşeninden gelen soğuk yıldız rüzgârları ve jetin yıldızlararası ortama fırlattığı madde olabileceğini önermiştir. R Aqr'in Hubble Uzay Teleskobu gözlemleri, bu geniş bipolar yapının merkez kaynağına yakın ~ 530 yıl presesyon dönemine sahip S-şeklindeki jetin ayrıntılı gözlemlerini sunar. Bu çalışmada verilen sistem parametreleri şu şekildedir: Sıcak bileşenin kütlesi $M_{WD} = 0.8 M_{\odot}$, M_{dev} soğuk dev bileşenin kütlesi olmak üzere kütle oranı $M_{dev}/M_{WD} = 1.65$, sistemin ortalama yarı büyük eksen uzunluğu, $a = 15.5$ AB, basıklığı ise $e = 0.25$ 'tir. Böylece presesyon dönemi $T = 530$ yıl olarak bulunmuştur. Simülasyonlarımızda jet akışının dalgalanması ile her dönme noktasında üretilen şok gazları geniş jet konisini beslemeye destek olur.

Bükük jet simülasyonları *Max Planck Institute for Astronomy* bünyesinde bulunan 72 çekirdekli *astro-node* sunucusu kullanılarak yapılmıştır. Jet ve dev yıldız rüzgârlarının etkileşimi ile ilgili olan simülasyon çalışması devam ettiğinden, bu simülasyonlar hala aynı sunucu ile gerçekleştirilmeye devam etmektedir.

5 SONUÇ

Simbiyotik yıldızlar karmaşık ışık eğrilerine sahiptir. Uzun dönemli sakin evrenin ardından aktif evrede düzenli ya da düzensiz parlamalar gösterebilirler. Aktif evrenin başlaması ile şiddetli parlamalar ve onları takiben küçük genlikli parlamalar belirlenebilir.

Sistemlerde ani parlamaların yanı sıra birden fazla dönemsel değişim saptanmıştır. Bu değişimler yörünge dönemi, dev yıldızın zonklama dönemi, dev yıldızın dönme dönemi, patlama dönemi vb. olabilir. Bu sistemlerde değişimler genel olarak U bandında daha belirgin şekilde görülür.

AG Dra sisteminde $JD - 2400000 \approx 59059$ civarında genliği yaklaşık 0.6 kadir olan bir parlama belirlenmiştir. Parlama iki tepeli bir yapıya sahiptir. Bu parlamanın renk-parlaklık değişimleri incelendiğinde parlamanın disk veya beyaz cüce üzerine yığılan madde miktarının artması sonucu olduğu tespit edilmiştir. Gözlemin devamında yaklaşık 300 günlük uzun bir parlama dönemi görülür. Bu sırada sistem, diski ve beyaz cüceyi en fazla gördüğümüz evreye girmektedir.

AG Dra sisteminin X-ışın ışık eğrilerinde herhangi bir değişim belirlenmemiştir. X-ışın tayf analizleri sistemin çok yumuşak X-ışın kaynağı olduğunu söylemektedir. Sakin evrede gerçekleştirilen gözlemlerin X-ışın tayfında sadece bir *kara cisim* kaynağı belirlenmiştir. X-ışın tayf analizi ile elde edilen kara cisim sıcaklığı ~ 0.01 keV'dir. Aktif evrede gerçekleştirilen gözlemlerin (örneğin, Kasım 2003 ve Temmuz 2005 gözlemleri) X-ışın tayfında ~ 0.7 keV civarında bir salma yapısı görülür. Sadece aktif evrede kendini gösteren bu sıcak plazma mekal ile temsil edilmiştir ve sıcaklığı $\sim 0.2 - 0.24$ keV civarındadır.

AX Per sisteminin TUG T60 gözlemleri tutulmanın başlangıcına denk gelmektedir. Tutulmanın minimumunda yaklaşık 35 günlük periodik değişimler görülmektedir. Ayrıca tüm ışık eğrisinin dönem analizi sonucunda yaklaşık 66 günlük bir değişim daha belirlenmiştir. Bu sistemin analize uygun X-ışın verisi bulunmamaktadır.

CH Cyg'nin optik değişimlerinde büyük genlikli bir parlama sonrası küçük genlikli dönemsel parlamalar tespit edilmiştir. Parlamaların dönemi yaklaşık 35 gündür ve bu değer λ ile tanımlanmıştır. Bu parlamalar ilerleyen gözlem zamanlarında kendilerini 1.6λ katları şeklinde göstermektedir. Büyük parlama sonrası gerçekleşen bu dönemsel parlamaların kaynağının beyaz cüce üzerine madde transferi sırasındaki flickeringler olduğu düşünülmektedir. Kütle transferinin gerçekleşme sıklıklarının değişimi Roche lobunu dolduran kırmızı devin dinamik kararsızlığı olabilir (Bath, 1984).

CH Cyg sistemi çok değişken bir X-ışın kaynağıdır. X-ışın tayfının karmaşık yapısının yanında, tayfin yumuşak ve sert bölgesinde ayrı salma yapıları görölmektedir. Ayrıca yumuşak X-ışın bölgesi iki sıcak plazma kaynağı bileşeninden oluşmaktadır. Özetle CH Cyg'nin X-ışın tayfı 3 salma bileşeninden oluşan bir X-ışın kaynağıdır.

CH Cyg'nin *XMM-Newton* 2018 yılı gözleminde elde edilen X-ışın ışıık eğrisi değişimler göstermektedir. Yumuşak enerji bandında gözlemin başından ortalarına kadar bir enerji kaybı görölr. Ancak sert X-ışın bölgesinde bu süre içinde enerji üretimi sabit kalmıştır. Söz konusu enerji kaybı yumuşak X-ışın üretiminin azalması sonucu oluşmuştur. Yıldız/disk rüzgârlarının çarpışması yumuşak X-ışın üretimine katkı sağlar. Yumuşak bölgede enerji kaybı rüzgâr çarpışmalarının azaldığını gösterir. Gözlem ortasında hem yumuşak hem de sert X-ışın bölgesinde enerji kaybı görölr. Gözlemin ortasındaki bu düşüş, sınır tabakasından beyaz cüce üzerine madde transferinin azaldığını gösterir. Bu enerji düşüşlerinin yaşandığı sırada ~ 68 dk'lık döneme sahip atımlar belirlenmiştir. Bu dönemin beyaz cüce dönme dönemi olabileceği önerilmektedir.

CH Cyg'nin X-ışın tayf analizinde soğurmalı 3 salma bileşenine sahip güçlü üçlü demir çizgileri gösteren tayfa sahip olduğu görölmüştür. Yumuşak bölgede 2 sıcak plazma kaynağı belirlenmiştir. Diğer salma bileşeni ise sert X-ışın bölgesindedir ve üçlü demir çizgilerini içerir. CH Cyg'nin X-ışın gözlemlerinde baskın demir çizgileri görölmektedir. Bunlardan biri 6.4 keV civarında yer alan Fe $K\alpha$ çizgisidir. Ishida et al. (2009) cüce nova çalışmasında geniş 6.4 keV çizgisinin toplanma diski üzerinde yer alan korona

yapısından kaynaklandığını önermiştir. Bu yapının yüksekliği disk yarıçapı ile kıyaslandığında çok küçüktür ki bu da bizi optikçe ince ısısal plazma tanımına götürmektedir. Ayrıca He benzeri 6.67 keV çizgisi için daha kalın bir ortama ihtiyaç olabilir, böyle bir ortamda bu salma Compton saçılması ile üretilebilir.

CH Cyg sisteminin 2018 yılı *XMM-Newton* gözlemi ile yüksek çözünürlüğe sahip RGS tayfını analiz etmek mümkündür. RGS sayesinde yumuşak X-ışın bölgesindeki çizgi tayfı incelenmiştir. Çizgi analizi sonucunda H ve He benzeri N ve O çizgileri elde edilmiştir. Özellikle He benzeri çizgilerin oranları çarpışma baskın plazma kaynağına işaret eder.

Swift veri arşivinde yaklaşık 2 yıllık X-ışın verisi bulunmaktadır. Bu süre boyunca sistemin başlangıçta yalnızca yumuşak X-ışın kaynağı olarak görüldüğü belirlenmiştir. Zaman ilerledikçe gözlemlerinde diskin ve beyaz cücenin görülmeye başlandığı görülmektedir. Daha sonra madde miktarının artması sonucunda orta sertlikteki X-ışın üretiminin arttığı belirlenmiştir.

CI Cyg'nin TUG T60 gözlemlerinin başlangıcı sistemin tutulma evresinin başlangıcına denk gelmektedir. *U* filtresinde yaklaşık 600 gün süren tutulmanın minimum noktası yaklaşık 1.5 kadirlik genliğe sahiptir. Işık eğrilerinin dönem analizi sonucunda yörünge dönemi dışında yaklaşık 400 ve 70 gün civarı dönemler de belirlenmiştir.

CI Cyg sisteminin *XMM-Newton* ve *Swift* arşivlerinde analiz edilebilir tek bir gözlem bulunmaktadır. Gözlem verisi az olduğundan cismin X-ışın tayfından elde edilebilen tek bilgi yumuşak bölgede salma gösteren bir plazma kaynağının belirlenmesidir. Elde edilen plazma sıcaklığı $kT \sim 0.5381$ keV'dir.

Z And sisteminin optik gözlemlerinde *U* filtresinde yaklaşık 2.5 kadirlik bir parlaklık azalması belirlenmiştir. Bu azalma büyük olasılıkla Z And türü parlama olarak adlandırılan büyük genlikli parlamanın iniş koludur. Bu azalmanın başlarında özellikle *U* ve *B* filtresinde yaklaşık 0.5 kadirlik genliğe sahip olan bir parlama görülmüştür. Dönem analizlerinde yaklaşık 398 ve 150 günlük dönemler de belirlenmiştir.

Z And sisteminin X-ışın tayfları yüksek *soğurmaya* sahip iki sıcak plazma kaynağına işaret eder. Galaktik kolon yoğunluğunun da dikkate alındığı X-ışın tayf analizlerinde bazı zamanlar X-ışın kaynağının yaklaşık 10^{22} cm^{-2} mertebesinde yoğun bir bölgeye sahip olduğu belirlenmiştir.

Simbiyotik sistemler beyaz cüceye sahip jet yapıları gösteren çift yıldız sistemleridir. Bu sistemlerin sadece %10'unda jet ve jet benzeri yapılar gözlenmiştir. Bu nedenle jet oluşumunu ve devamlılığını anlamak için ideal astrofiziksel laboratuvarlardır. Simbiyotik sistemlerin bipolar madde atımlarının gözlemleri bükük jet yapılarına işaret eder. Bu tür jet çıkışları birçok astrofiziksel cisimde de görülmektedir. Yörünge hareketi ve presesyon yapan jet kaynağı dikkate alınarak jet simülasyonları yapılmıştır. Fendt and Yardımcı (2022) jet kaynağının uzaysal hareketini dikkate alarak bükük jet yapılarını araştırmıştır. Daha sonra simülasyonlara yıldız rüzgârı etkisi eklenmiştir. Simülasyonlara ait sonuçlar Bölüm 4.4'te yer almaktadır.

6 TARTIŞMA

Simbiyotik sistemlerin geometrilerini, fiziksel yapılarını ve evrimlerini anlamak için uzun zaman aralığına dağılmış gözlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemlerin karmaşık fiziksel yapıları sayesinde farklı dalga boylarında bu yapıları bir bütün halinde incelemeye olanak verir. Ayrıca yörünge ayrıklığının büyük ve yörünge dönemlerinin uzun olması sayesinde bu yapıların etkileşimi görece daha kolay izlenebilir. Bunun için farklı dalga boylarında gerçekleştirilen gözlemlerin eş/yakın zamanlı yapılması sistemi bir bütün olarak incelemek için yarar sağlayacaktır. Yer konuşlu optik gözlemevlerinden uzun dönemli gözlem zamanı almak mümkündür. Ancak uzay konuşlu X-ışın uyduları için gözlem zamanı kısıtlıdır ve bu sistemler için yeterli olmamaktadır. Bu nedenle X-ışın teleskoplarının arşiv verilerinin toplanması gerekmektedir. Bazı durumlarda bu sistemler sönük evrede gözlemlendiğinden ya da gözlem süresi yeterli olmadığından arşiv verileri kullanılamayabilir. Bu çalışmada da benzer bir durum yaşanmıştır.

AG Dra X-ışın akı değerlerinden de anlayacağımız gibi (özellikle aktif evre gözlemlerinde) bu sistemin sert bölgeden ($2 - 10$ keV) gelen katkısı yok denecek kadar azdır. Yani X-ışın bölgesinde baskın enerji aralığı daha çok yumuşak bölgedir ($0.2 - 2$ keV). Bu durum Z And ile benzer olmasına karşın Z And'a göre akı değeri yaklaşık 10 kat fazladır (bu durum AG Dra'nın aktif bölgede olmasından ileri gelebilir).

CH Cyg sistemi oldukça karmaşık yapıya sahip bir sistemdir. Koşutlanmış jet yapıları ve belirli aralıklarla sıcak bileşenin az koşutlanmış madde çıkışları ürettiği görülür (Eyres et al., 2002; Skopal et al., 2002). Bunun yanı sıra flickering, flare ya da patlamalar (outbursts) gibi hızlı ışık değişimleri sistemin toplanma süreçleri ile bağlantılıdır. Ayrıca sistemin soğuk dev bileşenin ve sıcak sıkışık bileşenin zonklaması, yörünge hareketleri (bir üçüncü cisim varlığı) ve sistemi saran toz yapısı gibi olgular bu tür karmaşık değişimleri görmemize neden olmaktadır (Sekeráš et al., 2019)

Tez kapsamında gerçekleşen TUG T60 gözlemleri sonucunda elde

edilen yörünge dönemlerinin literatürden biraz farklı olduğu görülmektedir. Sistemlerin uzun dönemleri nedeni ile çevrim sayısının fazla olmaması bunu etkileyebilir. Aslında SySt'lerde yörünge dönemlerinin değişmesi onların doğasından da kaynaklanmaktadır (Skopal, 1998). Daha sağlıklı yorumlar yapılması için daha uzun gözlem zamanlarına ihtiyaç vardır. Bu nedenle tez kapsamında TUG T60 teleskobuna verilen proje devam etmektedir.

Gözlemsel değişimlerinin incelenmesinin yanı sıra simbiyotik sistemler, jet yapılarını barındırması, yarı-ayrık çift sistemlerde görülen jet yapılarının ve patlama-rüzgâr-disk-jet etkileşimlerinin nümerik çözümlerinin çalışılması ve fiziksel kökenlerinin araştırılması açısından oldukça önemlidir.

Z And sistemi için yapılan yüksek zaman çözünürlüklü fotometri çalışmalarında yaklaşık 0.02 kadirlik değişimler belirlenmiştir (Skopal et al., 2012). Sistemin 2009 parlaması sırasında elde edilen 7 – 9 saatlik gözlemlerde bu gürültü benzeri değişimlerin genliği artmış ve sistem yaklaşık 0.065 kadirlik değişimler göstermiştir. Böylece hızlı fotometrik değişimler daha önceki 2006 patlaması sırasında da gözlenmiş ve bu değişimin nedeni olarak bipolar jet formundaki koşutlanmış kütle çıkışı sağlayan diskin iç kısmının bozulması önerilmiştir (Skopal et al., 2009). Ancak 2000-2003 patlamaları sırasında herhangi bir hızlı fotometrik değişim belirlenememiş ve jet formunda bir kütle çıkışının olmadığı belirtilmiştir (Sokoloski et al., 2006a). Bu nedenle bu sistemler için hızlı fotometrik değişimler ile jet gösteren outburstler arasındaki ilişki ayrıntılı incelenebilir. Bu durum disk kararsızlığını ve jet çıkış mekanizmalarını anlamamızda yardımcı olabilir.

Güçlü bir manyetik alana sahip olan ya da diske sahip olan sistemlerin bazılarında jet gözlenmemesi hala açık bir problemdir. Bazı simbiyotik sistemlerin yanı sıra bu durum kataklismik değişen yıldızlar ve bazı yüksek kütleli çift yıldızlarda da görülmektedir. Bu nedenle bu sistemlerde neden jet yapılarının görülmediği sorusu önemli bir motivasyon kaynağıdır.

Bölüm 4.3'te bahsedilen yıldız rüzgârı ve jet etkileşimi ile ilgili simülasyon çalışmasına devam edilmektedir. Yıldız rüzgâr simülasyonları soğuma

fonksiyonu kullanılarak da çalıştırılacaktır. Soğuma fonksiyonu $\Lambda(T)$, ısısal ışı nım tarafından plazmanın soğumasını ifade eder ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Soğuma modelleri plazma yapı ve davranışlarını etkileyebilir. Soğurma ve salma çizgilerini belirlemekte önemli hale gelebilir. Özellikle (ışınımsal) şok üretiminin gözlemlendiğ i yerlerde soğuma fonksiyonunu dikkate almak oldukça önemlidir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akras, S., Guzman-Ramirez, L., Leal-Ferreira, M.L., and Ramos- Larios, G.,** 2019, A Census of Symbiotic Stars in the 2MASS, WISE, and Gaia Surveys, *ApJS*, 240(2), 21, doi:10.3847/1538-4365/aaf88c.
- Allen, D.A.,** 1981, X-ray observations of symbiotic stars., *MNRAS*, 197, 739–743, doi:10.1093/mnras/197.3.739.
- Anderson, C.M., Cassinelli, J.P., and Sanders, W.T.,** 1981, X-ray detection of the symbiotic star AG Dra., *ApJ*, 247, L127–L130, doi:10.1086/ 183605.
- Arnaud, K.A.,** 1996, XSPEC: The First Ten Years, in G.H. Jacoby and J. Barnes, editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*, volume 101 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 17.
- Baella, N.O., Pereira, C.B., and Miranda, L.F.,** 2013, SS 383: A New S- type Yellow Symbiotic Star?, *AJ*, 146(5), 115, doi:10.1088/0004-6256/146/ 5/115.
- Bath, G.T.,** 1973, Periodicities and Disks in Dwarf Novae, *Nature Physical Science*, 246(154), 84–87, doi:10.1038/physci246084a0.
- Bath, G.T.,** 1984, Cataclysmic Variable Stars, *Ap&SS*, 99(80), 127, doi:10. 1007/BF00650236.
- Belczyński, K., Miko-lajewska, J., Munari, U., Ivison, R.J., and Friedjung, M.,** 2000, A catalogue of symbiotic stars, *A&AS*, 146, 407–435, doi:10.1051/aas:2000280.
- Bond, H.E. and Chanmugam, G.,** 1982, A search for cataclysmic binaries containing strongly magnetic white dwarfs., in Y. Kondo, editor, *NASA Conference Publication*, volume 2238 of *NASA Conference Publication*, pages 530–533.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Bondi, H. and **Hoyle, F.**, 1944, On the mechanism of accretion by stars, *MNRAS*, 104, 273, doi:10.1093/mnras/104.5.273.

Cannon, A.J., Fleming, W., and Pickering, E.C., 1911, The Variable Star, 232848, *Z Andromedae, Harvard College Observatory Circular*, 168, 1–3.

Cannon, A.J. and Pickering, E.C., 1914, Stars Having Peculiar Spectra, *Harvard College Observatory Circular*, 184, 1–3.

Chakrabarty, D. and Roche, P., 1997, The Symbiotic Neutron Star Binary GX 1+4/V2116 Ophiuchi, *ApJ*, 489(1), 254–271, doi:10.1086/304779.

Chernyakova, M., Courvoisier, T.J.L., Rodriguez, J., and Lutovinov, A., 2005, INTEGRAL discovery of the new source IGR J12349-6434., *The Astronomer's Telegram*, 519, 1.

Collins, K.A., Kielkopf, J.F., Stassun, K.G., and Hessman, F.V., 2017, AstroImageJ: Image Processing and Photometric Extraction for Ultra- precise Astronomical Light Curves, *AJ*, 153(2), 77, doi:10.3847/1538-3881/153/2/77.

Contini, M., Angeloni, R., and Rafanelli, P., 2009, The symbiotic system CH Cygni: An analysis of the shocked nebulae at different epochs, *Astronomische Nachrichten*, 330(8), 816, doi:10.1002/asna.200911225.

Cordova, F.A., Mason, K.O., and Nelson, J.E., 1981, X-ray observations of selected cataclysmic variable stars using the Einstein Observatory., *ApJ*, 245, 609–617, doi:10.1086/158836.

Crocker, M.M., Davis, R.J., Eyres, S.P.S., Bode, M.F., Taylor, A.R., Skopal, A., and Kenny, H.T., 2001, The symbiotic star CH Cygni - I. Non- thermal bipolar jets, *MNRAS*, 326(2), 781–787, doi:10.1046/j.1365-8711.2001.04638.x.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Crocker, M.M., Davis, R.J., Spencer, R.E., Eyres, S.P.S., Bode, M.F., and Skopal, A., 2002, The symbiotic star CH Cygni - III. A precessing radiojet, *MNRAS*, 335(4), 1100–1108, doi:10.1046/j.1365-8711.2002.05705.

de Val-Borro, M., Karovska, M., Sasselov, D.D., and Stone, J.M., 2017, Three-dimensional hydrodynamical models of wind and outburst- related accretion in symbiotic systems, *MNRAS*, 468(3), 3408–3417, doi: 10.1093/mnras/stx684.

Dickey, J.M. and Lockman, F.J., 1990, H I in the galaxy., *ARA&A*, 28, 215–261, doi:10.1146/annurev.aa.28.090190.001243.

Dobrzycka, D., Kenyon, S.J., Proga, D., Mikolajewska, J., and Wade, R.A., 1996, The Hot Component of RS Ophiuchi, *AJ*, 111, 2090, doi:10. 1086/117945.

Dorman, B. and Arnaud, K.A., 2001, Redesign and Reimplementation of XSPEC, in J. Harnden F. R., F.A. Primini, and H.E. Payne, editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems X*, volume 238 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 415.

Duschl, W.J., 1986, Accretion disk models for symbiotic stars. I - Stationary accretion disks. II - Time-dependent accretion disks, *A&A*, 163(1-2), 56–66.

Espey, B.R. and Crowley, C., 2008, Mass-loss from Red Giants, in A. Evans, M.F. Bode, T.J. O’Brien, and M.J. Darnley, editors, *RS Ophiuchi (2006) and the Recurrent Nova Phenomenon*, volume 401 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 166.

Eyres, S.P.S., Bode, M.F., Skopal, A., Crocker, M.M., Davis, R.J., Taylor, A.R., Teodorani, M., Errico, L., Vittone, A.A., and Elkin, V.G., 2002, The symbiotic star CH Cygni - II. The ejecta from the 1998- 2000 active phase, *MNRAS*, 335(3), 526–538, doi:10.1046/j.1365-8711.2002.05482.x.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Eze, R.N.C.**, 2014, Fe K α line in hard X-ray emitting symbiotic stars, MNRAS, 437(1), 857–861, doi:10.1093/mnras/stt1947.
- Ezuka, H., Ishida, M., and Makino, F.**, 1998, ASCA Observations of the Symbiotic System CH Cygni, ApJ, 499(1), 388–394, doi:10.1086/305626.
- Fekel, F.C., Hinkle, K.H., Joyce, R.R., and Skrutskie, M.F.**, 2000a, Infrared Spectroscopy of Symbiotic Stars. II. Orbits for Five S-Type Systems with Two-Year Periods, AJ, 120(6), 3255–3264, doi:10.1086/316872.
- Fekel, F.C., Hinkle, K.H., Joyce, R.R., Wood, P.R., and Lebzelter, T.**, 2007, Infrared Spectroscopy of Symbiotic Stars. V. First Orbits for Three S-Type Systems: Henize 2-173, CL Scorpii, and AS 270, AJ, 133(1), 17–25, doi:10.1086/509133.
- Fekel, F.C., Joyce, R.R., Hinkle, K.H., and Skrutskie, M.F.**, 2000b, Infrared Spectroscopy of Symbiotic Stars. I. Orbits for Well-Known S-Type Systems, AJ, 119(3), 1375–1388, doi:10.1086/301260.
- Fendt, C. and Yardimci, M.**, 2022, Curved Jet Motion. I. Orbiting and Precessing Jets, ApJ, 933(1), 71, doi:10.3847/1538-4357/ac7145.
- Fleming, W.P.S. and Pickering, E.C.**, 1912, Stars having peculiar spectra, *Annals of Harvard College Observatory*, 56(6), 165–226.
- Formigini, L. and Leibowitz, E.M.**, 1994, Three periodicities in a 98-year light curve of the symbiotic star Z Andromedae., A&A, 292, 534–542.
- Friedjung, M., Gális, R., Hric, L., and Petrík, K.**, 2003, More on the pulsation period of the cool component in the symbiotic binary AG Dra, A&A, 400, 595–598, doi:10.1051/0004-6361:20030041.
- Fritz, T. and Bruch, A.**, 1998, Studies of the flickering in cataclysmic variables. IV. Wavelet transforms of flickering light curves, A&A, 332, 586–604.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Galan, C., Miko-lajewska, J., Monard, B., I-lkiewicz, K., Pieńkowski, D., and Gromadzki, M.,** 2019, Hen 3-160 - the First Symbiotic Binary with Mira Variable S Star, *Acta Astron.*, 69(1), 25–44, doi:10.32023/0001-5237/ 69.1.2.
- Gális, R., Hric, L., Friedjung, M., and Petrík, K.,** 1999, Resonances as the general cause of the outbursts in the symbiotic system AG Draconis, *A&A*, 348, 533–541.
- Gális, R., Merc, J., and Leedjårv, L.,** 2017, Outburst activity of the symbiotic binary AG Dra, *Open European Journal on Variable Stars*, 180, 24.
- García-Arredondo, F. and Frank, A.,** 2004, Collimated Outflow Formation via Binary Stars: Three-Dimensional Simulations of Asymptotic Giant Branch Wind and Disk Wind Interactions, *ApJ*, 600(2), 992–1003, doi:10.1086/379821.
- Gill, C.D. and O’Brien, T.J.,** 1998, Deep optical imaging of nova remnants: a southern sky sample, *MNRAS*, 300(1), 221–232, doi:10.1046/j.1365-8711.1998.01899.x.
- Gleißner, T.,** 2004, *X-ray and radio variability of Cygnus X-1*, Ph.D. thesis, University of Tübingen, Germany.
- González-Riestra, R., Viotti, R., Iijima, T., and Greiner, J.,** 1999, IUE observations of the high-velocity symbiotic star AG Draconis. III. A compendium of 17 years of UV monitoring, and comparison with optical and X-ray observations, *A&A*, 347, 478–493.
- González-Riestra, R., Viotti, R.F., Iijima, T., Rossi, C., Montagni, F., Bernabei, S., Frasca, A., and Skopal, A.,** 2008, AG Draconis observed with XMM-Newton, *A&A*, 481(3), 725–734, doi:10.1051/0004-6361: 20078593.
- Greiner, J., Bickert, K., Luthardt, R., Viotti, R., Altamore, A., and González-Riestra, R.,** 1996, UV and X-Ray Monitoring of AG Draconis During the 1994/1995 Outbursts, in J. Greiner, editor, *Supersoft X-Ray Sources*, volume 472, page 267, doi:10.1007/BFb0102270.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Hellier, C., 2001, *Cataclysmic Variable Stars*.

HI4PI Collaboration, Ben Bekhti, N., Flöer, L., Keller, R., Kerp, J., Lenz, D., Winkel, B., Bailin, J., Calabretta, M.R., Dedes, L., Ford, H.A., Gibson, B.K., Haud, U., Janowiecki, S., Kalberla, P.M.W., Lockman, F.J., McClure-Griffiths, N.M., Murphy, T., Nakanishi, H., Pisano, D.J., and Staveley-Smith, L., 2016, HI4PI: A full-sky H I survey based on EBHIS and GASS, *A&A*, 594, A116, doi: 10.1051/0004-6361/201629178.

Nakanishi, H., Pisano, D.J., and Staveley-Smith, L., 2016, HI4PI: A full-sky H I survey based on EBHIS and GASS, *A&A*, 594, A116, doi: 10.1051/0004-6361/201629178.

Hinkle, K.H., Fekel, F.C., Johnson, D.S., and Scharlach, W.W.G., 1993, The Triple Symbiotic System CH Cygni, *AJ*, 105, 1074, doi:10.1086/116494.

Hinkle, K.H., Fekel, F.C., and Joyce, R.R., 2009a, Infrared Spectroscopy of Symbiotic Stars. VII. Binary Orbit and Long Secondary Period Variability of CH Cygni, *ApJ*, 692(2), 1360–1373, doi:10.1088/0004-637X/692/2/1360.

Hinkle, K.H., Fekel, F.C., and Joyce, R.R., 2009b, Infrared Spectroscopy of Symbiotic Stars. VII. Binary Orbit and Long Secondary Period Variability of CH Cygni, *ApJ*, 692(2), 1360–1373, doi:10.1088/0004-637X/692/2/1360.

Hughes, S.M.G. and Wood, P.R., 1990, Long-Period Variables in the Large Magellanic Cloud. II. Infrared Photometric Spectral Classification, AGB Evolution, and Spatial Distribution, *AJ*, 99, 784, doi:10.1086/115374.

Iijima, T., 1996, High Velocity Gas Outflow of the Symbiotic Star CH Cyg, *Astrophysical Letters and Communications*, 34, 327.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Iijima, T., Naito, H., and Narusawa, S., 2019, High-velocity equatorial mass ejections and some other spectroscopic phenomena of the symbiotic star CH Cygni in an active stage, *A&A*, 622, A45, doi:10.1051/0004-6361/201833858.

Ishida, M. and Fujimoto, R., 1995, Hard X-Ray Observations of Magnetic Cataclysmic Variables, in A. Bianchini, M. della Valle, and M. Orio, editors, *Cataclysmic Variables*, volume 205 of *Astrophysics and Space Science Library*, page 93, doi:10.1007/978-94-011-0335-0/ 11.

Ishida, M., Mukai, K., and Osborne, J.P., 1994, Observation of EX Hydrae with ASCA, *PASJ*, 46, L81–L85.

Ishida, M., Okada, S., Hayashi, T., Nakamura, R., Terada, Y., Mukai, K., and Hamaguchi, K., 2009, Suzaku Observations of SS Cygni in Quiescence and Outburst, *PASJ*, 61, S77, doi:10.1093/pasj/61.sp1.S77.

Kaastra, J.S. and Mewe, R., 2000, Coronal Plasmas Modeling and the MEKAL Code, in M.A. Bautista, T.R. Kallman, and A.K. Pradhan, editors, *Atomic Data Needs for X-ray Astronomy*, page 161.

Kafatos, M., 1996, Jets and MHD flows associated with symbiotic stars., in K.C. Tsinganos and A. Ferrari, editors, *Solar and Astrophysical Magnetohydrodynamic Flows*, volume 481 of *NATO Advanced Study Institute (ASI) Series C*, pages 585–605.

Karovska, M., Carilli, C.L., Raymond, J.C., and Mattei, J.A., 2007, CH Cygni X-Ray Jet Activity and Multicomponent Structures, *ApJ*, 661(2), 1048–1054, doi:10.1086/516772.

Karovska, M., Gaetz, T.J., Carilli, C.L., Hack, W., Raymond, J.C., and Lee, N.P., 2010, A Precessing Jet in the CH Cyg Symbiotic System, *ApJ*, 710(2), L132–L136, doi:10.1088/2041-8205/710/2/L132.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Karzas, W.J.** and **Latter, R.**, 1961, Electron Radiative Transitions in a Coulomb Field., *ApJS*, 6, 167, doi:10.1086/190063.
- Kato, M.** and **Hachisu, I.**, 2003, High-Velocity Jets in Recurrent Nova Outbursts, *The Astrophysical Journal*, 587(1), L39, doi:10.1086/375043.
- Kellogg, E., Anderson, C., Korreck, K., DePasquale, J., Nichols, J., Sokoloski, J.L., Krauss, M., and Pedelty, J.**, 2007, Outer Jet X-Ray and Radio Emission in R Aquarii: 1999.8 to 2004.0, *ApJ*, 664(2), 1079–1087, doi:10.1086/518877.
- Kellogg, E., Baldwin, J.R., and Koch, D.**, 1975, Studies of cluster X-ray sources. Energy spectra for the Perseus, Virgo, and Coma clusters., *ApJ*, 199, 299–306, doi:10.1086/153692.
- Kenyon, S.J.**, 1986, *The symbiotic stars*, Cambridge University Press, ISBN 9780511586071 (online), doi:10.1017/CBO9780511586071.
- Kenyon, S.J.**, 1988, General Discussion on the Physics of Symbiotic Stars, in J. Mikolajewska, M. Friedjung, S.J. Kenyon, and R. Viotti, editors, *IAU Colloq. 103: The Symbiotic Phenomenon*, volume 145 of *Astrophysics and Space Science Library*, page 177, doi:10.1007/978-94-009-2969-2\ 30.
- Kenyon, S.J., Fernandez-Castro, T., and Stencel, R.E.**, 1988, Far- Infrared Data for Symbiotic Stars. II. The IRAS Survey Observations, *AJ*, 95, 1817, doi:10.1086/114778.
- Kenyon, S.J., Oliverson, N.A., Mikolajewska, J., Mikolajewski, M., Stencel, R.E., Garcia, M.R., and Anderson, C.M.**, 1991, On the Nature of the Symbiotic Binary CI Cygni, *AJ*, 101, 637, doi:10.1086/115712.
- Kenyon, S.J. and Webbink, R.F.**, 1984, The nature of symbiotic stars., *ApJ*, 279, 252–283, doi:10.1086/161888.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- King, A.R.** and **Pringle, J.E.**, 2009, RS Ophiuchi: thermonuclear explosion or disc instability?, *MNRAS*, 397(1), L51–L54, doi:10.1111/j.1745-3933.2009.00682.x.
- Korreck, K.E.**, **Sokoloski, J.L.**, and **Opher, M.**, 2005, Modeling the Non-Relativistic Jets in R Aquarii, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, volume 207 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 13.06.
- Kylafis, N.D.** and **Lamb, D.Q.**, 1982, X-ray and UV radiation from accreting degenerate dwarfs. II., *ApJS*, 48, 239–272, doi:10.1086/190777.
- Leahy, D.A.** and **Taylor, A.R.**, 1987, X-ray emission from the symbiotic system CH Cygni., *A&A*, 176, 262–266.
- Leahy, D.A.** and **Volk, K.**, 1995, ROSAT PSPC Observations of the Symbiotic CH Cygni, *ApJ*, 440, 847, doi:10.1086/175321.
- Lee, Y.M.**, **Kim, H.**, and **Lee, H.W.**, 2022, Formation of the Asymmetric Accretion Disk from Stellar Wind Accretion in an S-type Symbiotic Star, *ApJ*, 931(2), 142, doi:10.3847/1538-4357/ac67d6.
- Leedjårv, L.**, 2004, High-Velocity Jets from Symbiotic Stars and Other Astrophysical Systems, *Baltic Astronomy*, 13, 109–115.
- Lenz, P.** and **Breger, M.**, 2014, Period04: Statistical analysis of large astronomical time series, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1407.009.
- Lewin, W.H.G.**, **Ricker, G.R.**, and **McClintock, J.E.**, 1971, X-Rays from a New Variable Source GX 1+4, *ApJ*, 169, L17, doi:10.1086/180805.
- Liedahl, D.A.**, **Osterheld, A.L.**, and **Goldstein, W.H.**, 1995, New Calculations of Fe L-Shell X-Ray Spectra in High-Temperature Plasmas, *ApJ*, 438, L115, doi:10.1086/187729.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Livio, M.**, 1999, Astrophysical jets: a phenomenological examination of acceleration and collimation., *Phys. Rep.*, 311, 225–245, doi:10.1016/S0370-1573(98)00102-1.
- Livio, M.**, 2001, Astrophysical Jets, in B.M. Peterson, R.W. Pogge, and R.S. Polidan, editors, *Probing the Physics of Active Galactic Nuclei*, volume 224 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 225.
- Lomb, N.R.**, 1976, Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data, *Ap&SS*, 39(2), 447–462, doi:10.1007/BF00648343.
- Lü, G.L., Zhu, C.H., Postnov, K.A., Yungelson, L.R., Kuranov, A.G., and Wang, N.**, 2012, Population synthesis for symbiotic X-ray binaries, *MNRAS*, 424(3), 2265–2275, doi:10.1111/j.1365-2966.2012.21395.x.
- Lü, G.L., Zhu, C.H., Wu, B., and Han, Z.W.**, 2006, Population Synthesis for the Symbiotic Stars with Main-sequence Accretors, *Chinese J. Astron. Astrophys.*, 6(4), 447–454, doi:10.1088/1009-9271/6/4/07.
- Luna, G.J.M., Mukai, K., Lopes de Oliveira, R., Sokoloski, J., and Pujol, A.**, 2020, A hard X-ray brightening in the symbiotic star CH Cyg., *The Astronomer's Telegram*, 14216, 1.
- Luna, G.J.M. and Sokoloski, J.L.**, 2007, The Nature of the Hard X-Ray-Emitting Symbiotic Star RT Cru, *ApJ*, 671(1), 741–747, doi:10.1086/522576.
- Luna, G.J.M., Sokoloski, J.L., and Mukai, K.**, 2008, High Energy X-ray Emission from Recurrent Novae in Quiescence: T CrB, in A. Evans, M.F. Bode, T.J. O'Brien, and M.J. Darnley, editors, *RS Ophiuchi (2006) and the Recurrent Nova Phenomenon*, volume 401 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 342.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Luna, G.J.M., Sokoloski, J.L., Mukai, K., and Nelson, T.,** 2013, Symbiotic stars in X-rays, *A&A*, 559, A6, doi:10.1051/0004-6361/201220792.
- Luri, X., Brown, A.G.A., Sarro, L.M., Arenou, F., Bailer-Jones, C.A.L., Castro-Ginard, A., de Bruijne, J., Prusti, T., Babusiaux, C., and Delgado, H.E.,** 2018, Gaia Data Release 2. Using Gaia parallaxes, *A&A*, 616, A9, doi:10.1051/0004-6361/201832964.
- Luud, L., Tomov, T., Vennik, J., and Leedjarv, L.,** 1986, CH Cygni in 1984-1985 : brightness fall with simultaneous increase of radio emission., *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal*, 12, 870–877.
- Lynden-Bell, D.,** 2003, On why discs generate magnetic towers and collimate jets, *MNRAS*, 341(4), 1360–1372, doi:10.1046/j.1365-8711.2003.06506.x.
- Marcu, D.M., Fürst, F., Pottschmidt, K., Grinberg, V., Müller, S., Wilms, J., Postnov, K.A., Corbet, R.H.D., Markwardt, C.B., and Cadolle Bel, M.,** 2011, The 5 hr Pulse Period and Broadband Spectrum of the Symbiotic X-Ray Binary 3A 1954+319, *ApJ*, 742(1), L11, doi:10.1088/ 2041-8205/742/1/L11.
- Masetti, N., Bassani, L., Dean, A.J., Ubertini, P., and Walter, R.,** 2006a, The symbiotic star CD-57 3057 is the likely counterpart of IGR J10109-5746, *The Astronomer's Telegram*, 715, 1.
- Masetti, N., Dal Fiume, D., Cusumano, G., Amati, L., Bartolini, C., Del Sordo, S., Frontera, F., Guarnieri, A., Orlandini, M., Palazzi, E., Parmar, A.N., Piccioni, A., and Santangelo, A.,** 2002, X-ray and optical monitoring of the peculiar source 4U 1700+24/V934 Her, *A&A*, 382, 104–117, doi:10.1051/0004-6361:20011543.
- Masetti, N., Landi, R., Pretorius, M.L., Sguera, V., Bird, A.J., Perri, M., Charles, P.A., Kennea, J.A., Malizia, A., and Ubertini, P.,** 2007, IGR J16194-2810: a new symbiotic X-ray binary, *A&A*, 470(1), 331–337, doi: 10.1051/0004-6361:20077509.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Masetti, N., Orlandini, M., Palazzi, E., Amati, L., and Frontera, F.,** 2006b, M-type giants as optical counterparts of X-ray sources 4U 1700+24 and 4U 1954+319, *A&A*, 453(1), 295–299, doi:10.1051/0004-6361:20065025.
- Mason, K.O., Breeveld, A., Much, R., Carter, M., Cordova, F.A., Cropper, M.S., Fordham, J., Huckle, H., Ho, C., Kawakami, H., Kennea, J., Kennedy, T., Mittaz, J., Pandel, D., Priedhorsky, W.C., Sasseen, T., Shirey, R., Smith, P., and Vreux, J.M.,** 2001, The XMM-Newton optical/UV monitor telescope, *A&A*, 365, L36–L44, doi: 10.1051/0004-6361:20000044.
- Melnikov, S., Stute, M., and Eislöffel, J.,** 2018, The bipolar jet of the symbiotic star R Aquarii: A study of its morphology using the high-resolution HST WFC3/UVIS camera, *A&A*, 612, A77, doi:10.1051/0004-6361/201731749.
- Meng, X. and Han, Z.,** 2016, The X-ray/radio and UV luminosity expected from symbiotic systems as the progenitor of SNe Ia, *A&A*, 588, A88, doi: 10.1051/0004-6361/201526077.
- Merrill, P.W.,** 1958, 51. Symbiosis in Astronomy: Introductory Report, in *Liege International Astrophysical Colloquia*, volume 8 of *Liege International Astrophysical Colloquia*, pages 436–448.
- Mignone, A., Bodo, G., Massaglia, S., Matsakos, T., Tesileanu, O., Zanni, C., and Ferrari, A.,** 2007, PLUTO: A Numerical Code for Computational Astrophysics, *ApJS*, 170(1), 228–242, doi:10.1086/513316.
- Mignone, A., Zanni, C., Tzeferacos, P., van Straalen, B., Colella, P., and Bodo, G.,** 2012, The PLUTO Code for Adaptive Mesh Computations in Astrophysical Fluid Dynamics, *ApJS*, 198(1), 7, doi:10.1088/0067-0049/198/1/7.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Mikolajewska, J., Kolotilov, E.A., Shugarov, S.Y., Tatarnikova, A.A., and Yudin, B.F.**, 2003, Ellipsoidal Variability of Symbiotic Giants, in R.L.M. Corradi, J. Mikolajewska, and T.J. Mahoney, editors, *Symbiotic Stars Probing Stellar Evolution*, volume 303 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 151.
- Mikolajewska, J. and Kenyon, S.J.**, 1992, On the Nature of the Symbiotic Binary AX Persei, *AJ*, 103, 579, doi:10.1086/116085.
- Mikolajewski, M., Mikolajewska, J., and Khudiakova, T.N.**, 1990, The long-period symbiotic binary CH Cygni. I. A hundred year's history of variability., *A&A*, 235, 219.
- Mikolajewski, M., Mikolajewska, J., and Khudyakova, T.N.**, 1992, The long-period symbiotic binary CH Cygni. II. The M giant component : increasing pulsation period and spot-like activity., *A&A*, 254, 127–132.
- Mikolajewski, M., Tomov, T., and Mikolajewska, J.**, 1987, Optical Spectroscopy of Ch-Cygni in 1985-1986, *Ap&SS*, 131(1-2), 733–745, doi: 10.1007/BF00668166.
- Mohamed, S., Booth, R., Podsiadlowski, P., Ramstedt, S., Vlemmings, W., and Maercker, M.**, 2015, 3D Models of Symbiotic Binaries, in *EAS Publications Series*, volume 71-72 of *EAS Publications Series*, pages 81–86, doi:10.1051/eas/1571015.
- Mohamed, S. and Podsiadlowski, P.**, 2007, Wind Roche-Lobe Overflow: a New Mass-Transfer Mode for Wide Binaries, in R. Napiwotzki and M.R. Burleigh, editors, *15th European Workshop on White Dwarfs*, volume 372 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 397.
- Mukai, K., Kennea, J.A., Luna, G.J.M., and Sokoloski, J.L.**, 2009, The Hard X-ray Recovery of the Symbiotic Star, CH Cygni, *The Astronomer's Telegram*, 2046, 1.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Mukai, K., Ishida, M., Kilbourne, C., Mori, H., Terada, Y., Chan, K.W., and Soong, Y.**, 2007, An Apparent Hard X-Ray Decline of CH Cygni, PASJ, 59, 177–183, doi:10.1093/pasj/59.sp1.S177.
- Munari, U., Ochner, P., Dallaporta, S., Milani, A., Valisa, P., and Siviero, A.**, 2012, The prototype symbiotic star AX is in outburst, *The Astronomer's Telegram*, 4265, 1.
- Munari, U. and Buson, L.M.**, 1994, The ultraviolet spectra of the symbiotic stars MWC 960, FN Sgr, SS 29 and Draco C-1., A&A, 287, 87–94.
- Mürset, U., Jordan, S., and Wolff, B.**, 1996, X-Ray Properties of Symbiotic Stars: I. The Supersoft Symbiotic Novae RR Tel and SMC3 (=RX J0048.4-7332), in J. Greiner, editor, *Supersoft X-Ray Sources*, volume 472, page 251, doi:10.1007/BFb0102268.
- Mürset, U., Nussbaumer, H., Schmid, H.M., and Vogel, M.**, 1991, Temperature and luminosity of hot components in symbiotic stars., A&A, 248, 458.
- Mürset, U. and Schmid, H.M.**, 1999, Spectral classification of the cool giants in symbiotic systems, A&AS, 137, 473–493, doi:10.1051/aas:1999105.
- Mürset, U., Wolff, B., and Jordan, S.**, 1997, X-ray properties of symbiotic stars. II. Systems with colliding winds., A&A, 319, 201–210.
- Nelson, T., Mukai, K., Orio, M., Luna, G.J.M., and Sokoloski, J.L.**, 2011, X-Ray and Ultraviolet Emission from the Recurrent Nova RS Ophiuchi in Quiescence: Signatures of Accretion and Shocked Gas, ApJ, 737(1), 7, doi:10.1088/0004-637X/737/1/7.
- Nichols, J.S., DePasquale, J., Kellogg, E., Anderson, C.S., Sokoloski, J., and Pedelty, J.**, 2007, Discovery of Rapid Hard X-Ray Variability and New Jet Activity in the Symbiotic Binary R Aquarii, ApJ, 660(1), 651–661, doi:10.1086/512138.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Nussbaumer, H., Schmutz, W., and Vogel, M.,** 1995, Proof of a fast wind in the symbiotic nova AG Pegasi., *A&A*, 293, L13–L16.
- Nussbaumer, H. and Vogel, M.,** 1988, On the Outburst of Symbiotic Stars, in J. Mikolajewska, M. Friedjung, S.J. Kenyon, and R. Viotti, editors, *IAU Colloq. 103: The Symbiotic Phenomenon*, volume 145 of *Astrophysics and Space Science Library*, page 169, doi:10.1007/978-94-009-2969-2 27.
- Nussbaumer, H. and Vogel, M.,** 1989, Z Andromedae and the symbiotic phenomenon., *A&A*, 213, 137–147.
- Odonoghue, D.,** 1986, The radius of the accretion disc in Z Cha between outbursts., *MNRAS*, 220, 23P–26, doi:10.1093/mnras/220.1.23P.
- Osaki, Y.,** 1974, An Accretion Model for the Outbursts of U Geminorum Stars, *PASJ*, 26, 429.
- Paczynski, B.,** 1965, Cataclysmic Variables Among Binary Stars. II. Physical Parameters for Novae, *Acta Astron.*, 15, 197.
- Paczynski, B.,** 1971, Evolutionary Processes in Close Binary Systems, *ARA&A*, 9, 183, doi:10.1146/annurev.aa.09.090171.001151.
- Paczynski, B. and Rudak, B.,** 1980, Symbiotic stars. Evolutionary considerations., *A&A*, 82, 349–351.
- Paczynski, B. and Zytlow, A.N.,** 1978, Hydrogen shell flashes in a whitedwarf with mass accretion., *ApJ*, 222, 604, doi:10.1086/156176.
- Panferov, A. and Mikolajewski, M.,** 2000, Magnetic propeller in symbiotic stars, *arXiv e-prints*, astro-ph/0007009.
- Perryman, M.A.C.,** 1997, Recent Results from HIPPARCOS, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, volume 191 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 68.01.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Plaskett, J.S.**, 1928, The composite stellar and nebular spectrum of Z Andromedae., *Publications of the Dominion Astrophysical Observatory Victoria*, 4, 119–160.
- PLUTO Team**, 2021, PLUTO Code User’s Guide, <http://plutocode.ph.unito.it/userguide.pdf>, son erişim: 23.11.2022.
- Porquet, D. and Dubau, J.**, 2000, X-ray photoionized plasma diagnostics with helium-like ions. Application to warm absorber-emitter in active galactic nuclei, *A&AS*, 143, 495–514, doi:10.1051/aas:2000192.
- Price, D.J., Pringle, J.E., and King, A.R.**, 2003, A comparison of the acceleration mechanisms in young stellar objects and active galactic nuclei jets, *MNRAS*, 339(4), 1223–1236, doi:10.1046/j.1365-8711.2003.06278.x.
- Robinson, E.L., Wood, J.H., Bless, R.C., Clemens, J.C., Dolan, J.F., Elliot, J.L., Nelson, M.J., Percival, J.W., Taylor, M.J., van Citters, G.W., and Zhang, E.**, 1995, Hubble Space Telescope Observations of the Dwarf Nova Z Chamaeleontis through Two Eruption Cycles, *ApJ*, 443, 295, doi:10.1086/175526.
- Robinson, L.**, 1969, AG and AN Draconis., *Peremennye Zvezdy*, 16, 507–554.
- Scargle, J.D.**, 1982, Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data., *ApJ*, 263, 835–853, doi: 10.1086/160554.
- Schmid, H.M. and Schild, H.**, 1997, Spectropolarimetry of symbiotic stars: AG Draconis., *A&A*, 321, 791–802.
- Sekeráš, M., Skopal, A., Shugarov, S., Shagatova, N., Kundra, E., Komžík, R., Vrašťák, M., Peneva, S.P., Semkov, E., and Stubbings, R.**, 2019, Photometry of Symbiotic Stars - XIV, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 49(1), 19–66.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Shapley, H.**, 1922, Star resembling RS Ophiuchi, *Harvard College Observatory Bulletin*, 778, 2–2.
- Sion, E.M., Moreno, J., Godon, P., Sabra, B., and Mikolajewska, J.**, 2012, On the Nature of the Hot Component in the Symbiotic, Supersoft X-Ray Binary AG Draconis, *AJ*, 144(6), 171, doi:10.1088/0004-6256/144/6/171.
- Siviero, A., Munari, U., Dallaporta, S., Valisa, P., Luppi, V., Moretti, S., Tomaselli, S., Bacci, S., Ballardini, F., Cherini, G., Graziani, M., Frigo, A., and Vagnozzi, A.**, 2009, The ongoing 2008-09 outburst of CI Cyg, *MNRAS*, 399(4), 2139–2145, doi:10.1111/j.1365-2966.2009.15414.x.
- Skopal, A.**, 1986, The activity of CH CYG in the Years 1981-82, *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 37, 18.
- Skopal, A.**, 1998, On the nature of apparent changes of the orbital period in symbiotic binaries, *A&A*, 338, 599–611.
- Skopal, A.**, 2000, Notices to investigation of symbiotic binaries. I. Effective temperatures of cool components, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 30(1), 21–28.
- Skopal, A.**, 2005, Disentangling the composite continuum of symbiotic binaries. I. S-type systems, *A&A*, 440(3), 995–1031, doi:10.1051/0004-6361:20034262.
- Skopal, A., Bode, M.F., Crocker, M.M., Drechsel, H., Eyres, S.P.S., and Komžík, R.**, 2002, The symbiotic star CH Cygni - IV. Basic kinematics of the circumstellar matter during active phases, *MNRAS*, 335(4), 1109–1119, doi:10.1046/j.1365-8711.2002.05715.x.
- Skopal, A., Bode, M.F., Lloyd, H.M., and Tamura, S.**, 1996, Eclipses in the symbiotic system CH CYG, *A&A*, 308, L9–L12.
- Skopal, A., Mikolajewski, M., and Tomov, T.**, 1987, Spectral Variations in Ch-Cygni during the Phase of Activity in 1982, *Ap&SS*, 131(1-2), 747–754, doi:10.1007/BF00668167.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Skopal, A., Pribulla, T., Budaj, J., Vittone, A.A., Errico, L., Wolf, M., Otsuka, M., Chrastina, M., and Mikulášek, Z., 2009, Transient Jets in the Symbiotic Prototype Z Andromedae, *ApJ*, 690(2), 1222–1235, doi:10.1088/0004-637X/690/2/1222.

Skopal, A., Shugarov, S., Vaňko, M., Dubovský, P., Peneva, S.P., Semkov, E., and Wolf, M., 2012, Recent photometry of symbiotic stars, *Astronomische Nachrichten*, 333(3), 242, doi:10.1002/asna.201111655.

Skopal, A., Tarasova, T.N., Cariková, Z., Castellani, F., Cherini, G., Dallaporta, S., Frigo, A., Marangoni, C., Moretti, S., Munari, U., Righetti, G.L., Siviero, A., Tomaselli, S., Vagnozzi, A., and Valisa, P., 2011, Formation of a disk structure in the symbiotic binary AX Persei during its 2007-10 precursor-type activity, *A&A*, 536, A27, doi: 10.1051/0004-6361/201116969.

Skopal, A., Teodorani, M., Errico, L., Vittone, A.A., Ikeda, Y., and Tamura, S., 2001, A photometric and spectroscopic study of the eclipsing symbiotic binary AX Persei, *A&A*, 367, 199–210, doi:10.1051/0004-6361: 20000413.

Skopal, A., Tarasova, T.N., Wolf, M., Dubovský, P.A., and Kudzej, I., 2018, Repeated Transient Jets from a Warped Disk in the Symbiotic Prototype Z And: A Link to the Long-lasting Active Phase, *ApJ*, 858(2), 120, doi:10.3847/1538-4357/aabc11.

Slavin, A.J., O'Brien, T.J., and Dunlop, J.S., 1995, A deep optical imaging study of the nebular remnants of classical novae, *MNRAS*, 276(2), 353–371, doi:10.1093/mnras/276.2.353.

Slovak, M.H. and Africano, J., 1978, Flickering of the symbiotic variable CH Cygni during outburst., *MNRAS*, 185, 591–606, doi:10.1093/mnras/185.3.591.

Smak, J., 1984, Outbursts of dwarf novae., *PASP*, 96, 5–18, doi:10.1086/131295.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Smith, R.K., Brickhouse, N.S., Liedahl, D.A., and Raymond, J.C.**, 2001, Collisional Plasma Models with APEC/APED: Emission-Line Diagnostics of Hydrogen-like and Helium-like Ions, *ApJ*, 556(2), L91–L95, doi: 10.1086/322992.
- Smith, V.V., Cunha, K., Jorissen, A., and Boffin, H.M.J.**, 1996, Abundances in the symbiotic star AG Draconis: the barium-symbiotic connection., *A&A*, 315, 179–193.
- Soker, N. and Lasota, J.P.**, 2004, The absence of jets in cataclysmic variable stars, *A&A*, 422, 1039–1043, doi:10.1051/0004-6361:20040402.
- Sokoloski, J.L.**, 2003, Symbiotic Stars as Laboratories for the Study of Accretion and Jets: A Call for Optical Monitoring, *Journal of the American Association of Variable Star Observers*, 31(2), 89–102.
- Sokoloski, J.L. and Bildsten, L.**, 1999, Discovery of a Magnetic White Dwarf in the Symbiotic Binary Z Andromedae, *ApJ*, 517(2), 919–924, doi: 10.1086/307234.
- Sokoloski, J.L., Bildsten, L., and Ho, W.C.G.**, 2001, A search for rapid photometric variability in symbiotic binaries, *MNRAS*, 326(2), 553–577, doi:10.1046/j.1365-8711.2001.04582.x.
- Sokoloski, J.L. and Kenyon, S.J.**, 2003, CH Cygni. I. Observational Evidence for a Disk-Jet Connection, *ApJ*, 584(2), 1021–1026, doi:10.1086/345901.
- Sokoloski, J.L., Kenyon, S.J., Espey, B.R., Keyes, C.D., McCandliss, S.R., Kong, A.K.H., Aufdenberg, J.P., Filippenko, A.V., Li, W., Brocksopp, C., Kaiser, C.R., Charles, P.A., Rupen, M.P., and Stone, R.P.S.**, 2006a, A “Combination Nova” Outburst in Z Andromedae: Nuclear Shell Burning Triggered by a Disk Instability, *ApJ*, 636(2), 1002–1019, doi:10.1086/498206.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Sokoloski, J.L., Luna, G.J.M., Mukai, K., and Kenyon, S.J., 2006b, An X-ray-emitting blast wave from the recurrent nova RS Ophiuchi, *Nature*, 442(7100), 276–278, doi:10.1038/nature04893.

Solf, J., 1987, Optical confirmation and high-resolution spectroscopy of the radio jet from the symbiotic star CH Cygni., *A&A*, 180, 207–212.

Staubert, R., Maisack, M., Kendziorra, E., Draxler, T., Finger, M.H., Fishman, G.J., Strickman, M.S., and Starr, C.H., 1995, Observations of a large flare in GX 1+4 with the compton gamma ray observatory, *Advances in Space Research*, 15(5), 119–122, doi:10.1016/0273-1177(94) 00049-7.

Stute, M. and Camenzind, M., 2005, Are jets in symbiotic stars driven by magnetic fields?, *A&A*, 432(1), L17–L20, doi:10.1051/0004-6361:200500012.

Stute, M., Luna, G.J.M., Pillitteri, I.F., and Sokoloski, J.L., 2013, Detection of X-rays from the jet-driving symbiotic star Hen 3-1341, *A&A*, 554, A56, doi:10.1051/0004-6361/201218998.

Stute, M. and Sahai, R., 2009, Detection of X-rays from the jet-driving symbiotic star MWC 560, *A&A*, 498(1), 209–215, doi:10.1051/0004-6361/200811176.

Stute, M. and Sahai, R., 2007, Hydrodynamical Simulations of the Jet in the Symbiotic Star MWC 560. III. Application to X-Ray Jets in Symbiotic Stars, *ApJ*, 665(1), 698–706, doi:10.1086/518930.

Taylor, A.R., Seaquist, E.R., and Mattei, J.A., 1986, A radio outburst and jet from the symbiotic star CH Cyg, *Nature*, 319(6048), 38–41, doi:10.1038/319038a0.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Teşileanu, O., Mignone, A., and Massaglia, S., 2008, Simulating radiative astrophysical flows with the PLUTO code: a non-equilibrium, multi-species cooling function, *A&A*, 488(1), 429–440, doi:10.1051/0004-6361:200809461.

Theuns, T. and Jorissen, A., 1993, Wind accretion in binary stars - I. Intricacies of the flow structure., *MNRAS*, 265, 946–967, doi:10.1093/mnras/265.4.946.

Tomov, T., Munari, U., Kolev, D., Tomasella, L., and Rejkuba, M., 1998, Jets from the galactic supersoft X-ray source RX J0019.8+2156, *A&A*, 333, L67–L69.

Tueller, J., Barthelmy, S., Burrows, D., Falcone, A., Gehrels, N., Grupe, D., Kennea, J., Markwardt, C.B., Mushotzky, R.F., and Skinner, G.K., 2005, SWIFT/BAT Detections of Hard X-ray Sources II, *The Astronomer's Telegram*, 669, 1.

Tutukov, A.V. and Iungelson, L.R., 1976, On the origin and evolutionary stage of symbiotic stars., *Astrofizika*, 12, 521–530.

Vaiana, G.S., Cassinelli, J.P., Fabbiano, G., Giacconi, R., Golub, L., Gorenstein, P., Haisch, B.M., Harnden, F. R., J., Johnson, H.M., Linsky, J.L., Maxson, C.W., Mewe, R., Rosner, R., Seward, F., Topka, K., and Zwaan, C., 1981, Results from an extensive Einstein stellar survey., *ApJ*, 245, 163–182, doi:10.1086/158797.

Viotti, R., Badiali, M., Cardini, D., Emanuele, A., and Iijima, T., 1997, HIPPARCOS Astrometry and Radio Mapping of Peculiar Binary Systems, in R.M. Bonnet, E. Høg, P.L. Bernacca, L. Emiliani, A. Blaauw, C. Turon, J. Kovalevsky, L. Lindegren, H. Hassan, M. Bouffard, B. Strim, D. Heger, M.A.C. Perryman, and L. Woltjer, editors, *Hipparcos - Venice '97*, volume 402 of *ESA Special Publication*, pages 405–408.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Vogel, M.**, 1991, Empirical velocity laws for cool giants. I. The symbiotic binary EG Andromedae., A&A, 249, 173.
- Wallerstein, G., Willson, L.A., Salzer, J., and Brugel, E.**, 1984, Winds in collision. I. Geometric implications of the emission lines for V1016 CYG and HM Sge., A&A, 133, 137–153.
- Wheatley, P.J. and Kallman, T.R.**, 2006, A new interpretation of the remarkable X-ray spectrum of the symbiotic star CH Cyg, MNRAS, 372(4), 1602–1606, doi:10.1111/j.1365-2966.2006.10959.x.
- Whitehurst, R.**, 1988, Numerical simulations of accretion discs - I. Superhumps : a tidal phenomenon of accretion discs., MNRAS, 232, 35–51, doi: 10.1093/mnras/232.1.35.
- Whitelock, P.A.**, 1987, Symbiotic Miras., PASP, 99, 573–591, doi:10.1086/132019.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma boyunca desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen danışmam Prof. Dr. Belinda KALOMENİ'ye ve değerli düşüncelerini benimle paylaşan Prof. Dr. Selim Osman SELAM ve Prof. Dr. Varol KESKİN'e, yoğun programlarına rağmen savunma sınavıma katılarak değerli katkılarda bulunan Prof. Dr. Tansel AK ve Prof. Dr. Ömer Lütü DEĞİRMENCİ'ye, nümerik çözümleri öğrenmemi ve o konuda gelişmeye yardımcı olan Prof. (apl.) Dr. Christian FENDT'e, grubundan Dr. Giancarlo MATTIA'ya ve Almanya'da bulunduğum süre boyunca tüm olanaklarından yararlanmama izin veren *Max Planck Institute for Astronomy*'ye, çalışmam süresince bana destek olan başta Dr. Tülin ÇETİN ve Dr. Tuncay DOĞAN olmak üzere tüm dostlarıma ve akademik çalışmalarımız nedeni ile iki yıldır fiziken uzakta olsak da yanımda olduğunu hissettiren Dr. Samet OK'a hayat arkadaşlığı için ve X-ışın konusundaki tecrübelerini benimle paylaştığı için teşekkürü bir borç bilirim.

Karşılıksız sevgileri ve bugüne kadar gösterdikleri maddi ve manevi tüm destekleri için anneme, babama ve abime sonsuz teşekkürlerimi saygı ve sevgilerimle sunarım.

Bu doktora tezi, TÜBİTAK'ın 2214/A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı tarafından desteklenmiştir. Tez çalışması kapsamında belirlenen cisimlerin optik gözlemleri, TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nin (TUG) T60 robotik teleskobu ile yapılmıştır (Proje No: 19BT60-1495). Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a ve TUG personeline teşekkürlerimi sunarım.

23/12/2022

Melis Yardımcı

ÖZGEÇMİŞ

Melis YARDIMCI, ilköğretimini birçok farklı ilde okumuş ve nihayetinde 2004 yılında İzmir’de Vali Kutlu Aktaş İlköğretim Okulu’ndan mezun olmuş, lise eğitimini İzmir’de Kipa 10. Yıl Lisesi’nde tamamlamış ve 2008 yılında Ege Üniversitesi Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü’ne kayıtlanmıştır. Burada lisans eğitimini bölüm birincisi olarak tamamladıktan sonra 2014 - 2016 yılları arasında yine Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı’nın Astrofizik Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimini gerçekleştirmiştir. 2016 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı’nın doktora programına kaydolmuştur. Kişinin Orcid kimliği 0000-0001-8697-2385 şeklindedir.