

Simbiyotik Sistem R Aquarii'ye X-ışınlarında Bakış

Havva Bostan^{1,2}  , Şölen Balman^{2,3} 

¹ Istanbul University, Institute of Graduate Studies in Science, 34116, Istanbul, Turkey

² Department of Astronomy and Space Sciences, Faculty of Science, Istanbul University, Beyazıt, 34119, Istanbul, Turkey

³ Kadir Has University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Cibali, 34083, Istanbul, Turkey

Accepted: March 2, 2025. Revised: March 2, 2025. Received: December 8, 2024.

Özet

R Aquarii, bir Mira değişeni kırmızı dev ile beyaz cüceden oluşan ve belirli dönemlerde iki kutuplu jet dış akışları sergileyen, iyi bilinen bir simbiyotik sistemdir. Bu jetler, optik, radyo ve X-ışınları gibi farklı dalga boylarında gözlemlenmiş ve sistemin dinamiklerini anlamada önemli bilgiler sunmuştur. Bu çalışmanın amacı, R Aquarii sisteminin ve jetlerinin X-ışını dalga boyu aralığında kapsamlı bir şekilde incelenmesidir. Araştırma, 2017, 2020, 2021 ve 2022 yıllarına ait arşiv Chandra verileri kullanarak, sistemin jetleri ve merkezi çift yıldızının uzamsal ve spektral özelliklerini detaylı bir biçimde analiz etmeyi amaçlamaktadır. Sistemin morfolojisini daha iyi anlamak için farklı dalga boyu aralıklarında analizler gerçekleştirilmiş ve özellikle merkezi ikili ve çevresindeki yayılmış emisyon bölgesinin spektral incelemesine odaklanılmıştır. Merkezi ikilinin spektrumu, iki farklı bileşik modelle analiz edilmiştir; bunlardan yalnızca birinin sonuçları sunulmuştur. Veri analizleri, CIAO (v14.15.2) ve XSPEC (v12.13.1) yazılımları kullanılarak yapılmıştır. Çalışma, R Aquarii'nin önceki Chandra verileriyle karşılaştırılarak, sistemin yaklaşık yirmi yıllık X-ışını geçmişi kapsamlı bir bakış sunmaktadır. Yapılan analizler, sistemin yumuşak X-ışınlarında güneybatıya doğru yayılan bir yapı sergilediğini, 2 keV'nin üzerinde ise merkezi ikili etrafında nokta benzeri fakat sabit bir pozisyonda kalmayan bir yapının gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, merkezi ikilinin spektral analizi, yumuşak ve sert X-ışınları için iki farklı soğurma parametresinin varlığını göstermektedir. Sistemin toplam X-ışını parlaklığında belirgin bir değişim gözlemlenmemiş olsa da, 2022 yılı verileri, hem merkezi ikiliden hem de çevresindeki bölgeden alınan spektrumlarda bir parlaklık azalmasını işaret etmektedir.

Abstract

R Aquarii is a well-known symbiotic system consisting of a Mira-type red giant and a white dwarf, which exhibits bipolar jet outflows during certain periods. These jets have been observed in various wavelengths, including optical, radio, and X-rays, providing valuable insights into the system's dynamics. The goal of this study is to conduct a comprehensive analysis of the X-ray properties of the R Aquarii system and its jets. In this research, archival Chandra data from 2017, 2020, 2021, and 2022 were used to investigate the spatial and spectral characteristics of the system's jets and the central binary star. To better understand the system's morphology, analyses were performed in different energy ranges, focusing particularly on the spectral examination of the central binary and the surrounding extended region. The spectrum of the central binary was analyzed using two different composite models, with only one of the results presented here. The data analysis was conducted using the CIAO (v14.15.2) and XSPEC (v12.13.1) software packages. This study provides a comprehensive look at the system's X-ray history spanning nearly two decades by comparing the results with previous Chandra data. The analysis revealed that the system displays a diffuse structure in soft X-rays extending towards the southwest, while above 2 keV, a point-like structure is observed around the central binary, although not fixed in position. Additionally, the spectral analysis of the central binary shows the presence of two distinct absorption parameters for soft and hard X-rays. While no significant change in the total X-ray luminosity of the system was observed, the 2022 data indicate a decrease in brightness both in the central and the extended regions.

Anahtar Kelimeler: binaries:symbiotic – X-rays:binaries – stars:jets

1 Giriş

Simbiyotik sistemler, soğuk bir dev yıldız ile sıcak bir kompakt cisimden oluşan ikili sistemlerdir. Bu sistemlerde ayrıca, sistemi çevreleyen bir nebula üçüncü bir bileşen olarak bulunur. Simbiyotik sistemler, sıcak kompakt bileşenin türüne göre iki ana gruba ayrılır. Beyaz cüce içeren sistemler "beyaz cüce simbiyotikleri" olarak adlandırılırken, nötron yıldızı veya kara delik içeren sistemler ise "simbiyotik X-ışını çiftleri" olarak bilinir. Beyaz cüce simbiyotiklerine dair literatürde çok sayıda detaylı çalışma bulunmasına karşın, simbiyotik X-ışını çiftleriyle

ilgili bulgular daha sınırlı olmakla birlikte günümüzde artmaya başlamıştır.

Beyaz cüce içeren simbiyotik sistemler daha detaylı incelenmeye başlandığında, bu sistemlerin farklı dalgaboylarında farklı özellikler sergilediği anlaşılmıştır. Bu gözlemler, sistemlerin yapısının daha iyi anlaşılmasına olanak sağlamış ve beyaz cüce içeren simbiyotik sistemlerin farklı türlerde olduğunu ortaya koymuştur. Yakın kızılötesi tayflarının incelenmesi bu sistemlerin içerdikleri dev yıldız türüne göre iki ana kategoride ayrıldığını göstermiştir: S-tipi ve D-tipi Webster & Allen (1975). S-tipi sistemlerde dev bileşen bir kırmızı devden oluşurken, D-tipi sistemlerde dev bileşen Mira tipi dev yıldızlardır. Dev bileşenin türü, sistemin yörünge periyodu ,

* havvabostan@ogr.iu.edu.tr

bileşenlerin arasındaki mesafe gibi yörünge parametrelerinde farklılıklara yol açmaktadır. Simbiyotik sistemlerin büyük çoğunluğu S-tipi sistemlerden oluşmaktadır.

Simbiyotik sistemlerin çeşitliliği X-ışınlarında da gözlemlenmiştir. 1997 yılında **Muerstet ve diğ. (1997)**, 16 simbiyotik sistemine ait ROSAT verilerini inceleyerek bu sistemleri X-ışını özelliklerine göre α , β ve γ olmak üzere üç grupta sınıflandırmıştır. Ancak, ROSAT'ın sınırlı band genişliği bu sınıflandırmanın bir revizyona ihtiyacı olduğu düşüncesini doğurmuştur. Daha sonraları geniş band aralığına sahip X-ışınlarına duyarlı teleskopların verilerinin analiziyle bu sınıflandırma daha da genişletilmiştir **Luna ve diğ. (2013)**. Sonuç olarak, güncel sınıflandırma α , β , γ , δ ve β/δ olmak üzere beş kategoriye içermektedir. α -tip sistemler, çok düşük enerjiye sahip son derece yumuşak X-ışını kaynaklarıdır ve emisyonları genellikle 1 keV'nin altındadır. β -tip sistemler, 2 keV'ye kadar enerjilerde yumuşak X-ışını emisyonları gösterirken, γ -tip sistemler ise 1 keV ve üzerindeki enerjilerle karakterize edilen, daha yüksek enerjili X-ışını spektrumlarına sahip sistemlerdir. δ -tip sistemler ise daha sert X-ışını emisyonları gösteren, yüksek oranda emilmiş termal kaynaklardır ve genellikle 2.4 keV'nin üzerinde radyasyon yayar. β/δ tipi sistemler, iki türün özelliklerini bir arada içeren sistemlerdir. Yumuşak X-ışını bileşeni, çarpışan rüzgarlar tarafından üretilirken, sert X-ışını bileşeni ise yığılma diskinin beyaz küce ile birleşen sınır tabakasından kaynaklanmaktadır.

Bugün bilinen simbiyotik sistemlerin yaklaşık %20'si X-ışını emisyonu göstermektedir. α -tip sistemlerde X-ışını emisyonları, beyaz kücenin yüzeyinde gerçekleşen hidrojen yanmasından kaynaklanırken, β -tip sistemlerde ise bu emisyonlar çarpışan yıldız rüzgarları veya jetlerden kaynaklanmaktadır. γ -tip sistemlerde ise X-ışını emisyonu, optik olarak kalın olan Comptonize olmuş plazmadan ortaya çıkar. δ -tip sistemlerde ise X-ışını emisyonu, beyaz küce ile aktarım diski arasındaki optik olarak ince bir sınır tabakasından gelir.

Bu çalışmanın odak noktası olan R Aquarii (R Aqr) sistemi, $\sim 218^{+12}_{-11}$ uzaklığıyla **Min ve diğ. (2014)** Dünya'ya en yakın konumda bulunan iki simbiyotik yıldızdan biri olarak büyük bir öneme sahiptir. Şimdiye kadar pek çok farklı dalga boyunda detaylı bir şekilde gözlemlenmiş ve analiz edilmiştir. R Aqr, bir mira değişen yıldız ve bir beyaz küceden oluşan, D-tipi olarak sınıflandırılan bir sistemdir. Sistemin yörünge periyodunun 43.6 yıl olduğu bulunmuştur **Gromadzki & Mikolajewska (2009)**. Sistem, kuzey-güney yönünde yaklaşık $\sim 1'$ ve doğu-batı yönünde $\sim 2'$ boyunca uzanan belirgin bir nebula sahiptir. Bunun yanı sıra, kuzeydoğu ve güneybatı yönlerinde gözlemlenen çift kutuplu jet atımları **Kellogg ve diğ. (2001)**, sistemin dinamik ve karmaşık yapısının önemli bir göstergesidir. Bu çalışmada, R Aqr sisteminin X-ışını dalga boyu aralığında yaklaşık 20 yıllık değişim sürecinin hem spektral hem de uzamsal evrimine ilişkin kapsamlı bir analiz sunulmaktadır.

2 Gözlemler ve Veri İndirgeme

Chandra X-ışını Gözlemevi (**CXO**), 23 Temmuz 1999'da NASA tarafından fırlatılmıştır. 0.1 keV ile 10 keV enerji aralığına duyarlıdır ve $\sim 0.5''$ açısal çözünürlüğüyle X-ışını teleskopları arasında büyük bir öneme sahiptir.

R Aqr Chandra ile ilk olarak 2000, 2004 ve 2005 yıllarında gözlenmiştir. Daha sonraki Chandra gözlemleri 2017, 2020, 2021 ve 2022 yıllarına aittir. Bu çalışmada Chandra'ya ait son arşiv veri setlerinin analizi ile birlikte ilk veri setlerinin sonuçlarıyla karşılaştırmalar yapıp sistemin zaman içindeki

değişimi incelenmiştir. Analizler, hem görüntüleme teknikleriyle hem de spektral analiz yöntemleri kullanılarak iki farklı yaklaşım çerçevesinde gerçekleştirilmiştir; böylece, sistemin hem morfolojik yapısı hem de X-ışını emisyonlarının detaylı spektral özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

2.1 Görüntüleme

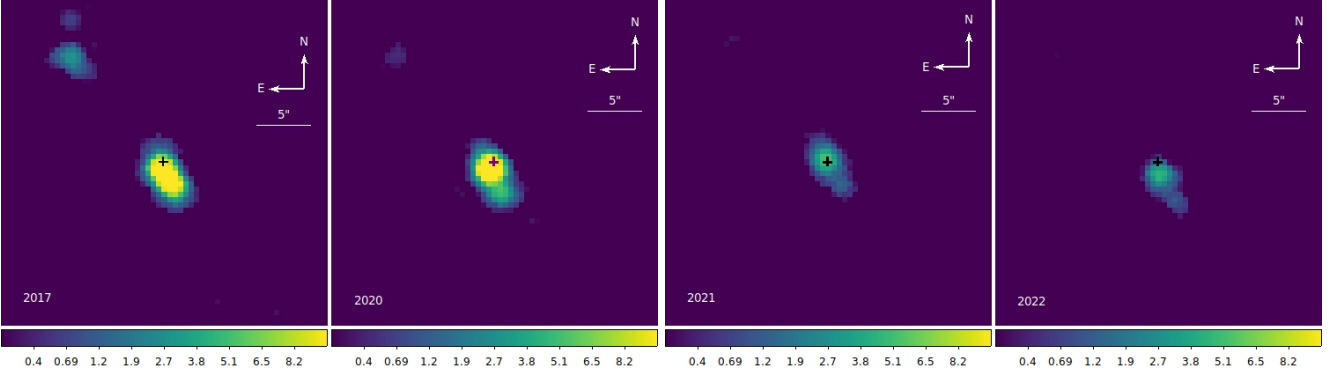
Aynı yıla ait birden fazla gözlem olduğundan, görüntüleme için en uzun poz süresine sahip olan gözlemleri seçtik. Bu gözlemlere ait ObsID'ler 19015 (2017), 23108 (2020), 24341 (2021) ve 27333 (2022) şeklindedir. Görüntüleme için **CIAO (v14.15.2) Fruscione ve diğ. (2006)** yazılımına ait **repro** komutunu kullanarak evt2 kodlu olay dosyalarını oluşturduk. Oluşturulan dosyalardan 0.3-2.0 keV ve 2.0-8.0 keV enerji aralığını seçip **dmcopy** komutu ile bu enerji aralıklarındaki görüntüleri oluşturduk. Görüntüleme için **SAOImageds9 (v8.5)** yazılımını kullandık. Görüntülerde R Aqr koordinatı merkezlenerek 60×60 piksel boyutunda bir alt görüntü çıkarıp $\sigma = 2''$ olan bir Gauss filtresiyle düzleme işlemi uyguladık. Görüntülerin uzamsal çözünürlüğü $1''.25$ 'dir. Bu görüntüler arasında tutarlılık sağlamak amacıyla ölçek parametresini **sqrt** olarak seçtik.

Şekil 1, R Aquarii'nin 0.3-2.0 keV aralığındaki yumuşak X-ışını görüntülerini göstermekte ve yumuşak X-ışını emisyonunun farklı dönemlerdeki belirgin özelliklerini ortaya koymaktadır. 2017 yılına ait yumuşak X-ışını görüntüsünde, kuzeydoğu bölgesinde eski jet kalıntısı ve merkezi bölgeden güneybatı yönüne doğru yayılmış yapı öne çıkmaktadır. 2017'deki yumuşak X-ışını emisyonunun, 2005 yılında gözlemlenen yapı ile benzerlik gösterdiği söylenebilir **Nichols ve diğ. (2007)**. 2020 ve 2021 yıllarında da güneybatı yönüne doğru yönelmiş olan yayılmış yapı dikkat çekmektedir. 2022 yılında ise yumuşak X-ışını emisyonunun büyük kısmı güneybatı yönünde yoğunlaşmıştır. Sonuç olarak, yumuşak X-ışını emisyonu tüm dönemlerde, merkez bölgeden güneybatı yönüne doğru $\sim 2'$ boyunca uzanan yayılmış bir yapı sergilemiştir.

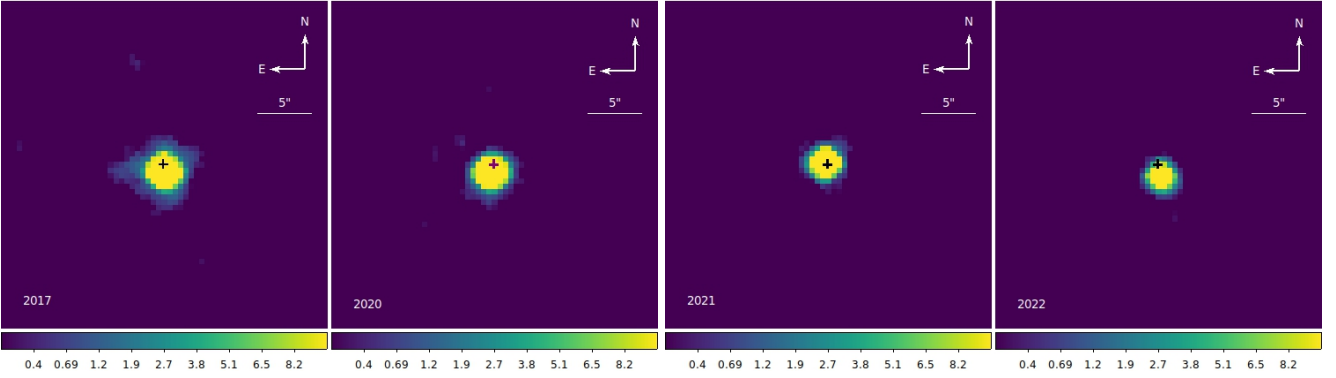
Şekil 2, R Aquarii'nin 2.0-8.0 keV enerji aralığındaki sert X-ışını görüntülerini göstermektedir ve bu görüntüler, sert X-ışını emisyonunun merkezi bölgede yoğunlaştığı nokta benzeri bir yapıyı açıkça ortaya koymaktadır. Görüntüler, hem yumuşak hem de sert X-ışını emisyonlarındaki değişimleri gözler önüne sererken, 2017 ile 2022 yılları arasındaki verilerde genel olarak bir emisyon azalması olduğunu vurgulamaktadır. Ancak, bu azalmanın 2017 yılı verilerinin daha uzun bir pozlama süresine ve daha fazla foton sayısına sahip olmasından kaynaklanabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Sert X-ışını görüntüleri özellikle 2022 yılına ait verilerde, emisyonun sistemin koordinatı etrafında merkezlenmesinden ziyade güneybatı yönüne doğru yoğunlaştığını göstermektedir. Benzer şekilde, 2017 ve 2020 yıllarına ait görüntülerde de emisyonun büyük bir kısmının sistemin merkezinden güneybatıya doğru kaydığı dikkat çekmektedir. Dikkat çeken diğer olgu ise 2021 yılında emisyonun sistemin koordinatı etrafında merkezlenmesidir. Bu durum hareket eden bir nebula işaret etmektedir.

2.2 Spektral Analiz

Spektral analizin ilk adımında verilerde merkezi bölge ve GB yönündeki yayılmış bölgeyi ayırt edebilmek amacıyla iki farklı alan seçtik. İlk alan, merkezi kaynağın koordinatları etrafında yer alan $1''.5$ yarıçaplı bir çemberken merkez dışı olarak adlandırdığımız ikinci alan ise merkezi bölge



Şekil 1. R Aqr'nin 0.3-2.0 keV enerji aralığındaki görüntüleri, her yıl için 1''25 çözünürlükle oluşturulmuştur. Her bir görüntünün sol alt köşesinde ilgili yıl belirtilmiştir. Merkezi ikilinin konumu, bir çarpı işareti ile gösterilmiştir.



Şekil 2. R Aqr'nin 2.0-8.0 keV enerji aralığındaki görüntüleri, her yıl için 1''25 çözünürlükle oluşturulmuştur. Her bir görüntünün sol alt köşesinde ilgili yıl belirtilmiştir. Merkezi ikilinin konumu, bir çarpı işareti ile gösterilmiştir.

dışındaki 1''5 yarıçaplı bir çember olarak GB yönünde belirlenmiştir. Merkez dışı bölgeler arasında çok az fark olsa da, her gözlemede bu bölgelerin tam olarak aynı yerlerden seçilmediği not edilmelidir. Merkez dışı bölge seçilirken GB bölgesindeki en yoğun emisyonun bulunduğu bölgeler dikkate alınmıştır. Burada not etmemiz gereken ikinci durum ise merkezi ve merkez dışı bölgelerin alanları seçilirken iki alanın birbirini kapsamamasına dikkat edildiğidir. Arka planlara ait alanlar ise kaynak bölgeleriyle aynı boyutlarda ve farklı bölgelerde seçilmiştir. Bahsi geçen alanların ardalan çıkarılmış spektrumlarını specextract komutuyla oluşturduk. Tüm yıllara ait spektrumlar oluşturulduktan sonra, her yıl için spektrumlar, combine_spectra aracı kullanılarak birleştirildi. Böylece, merkezi ve merkez dışı bölgelere ait 2017, 2020, 2021 ve 2022 yıllarını kapsayan dörder adet iki ayrı veri seti elde edilmiş oldu.

2.2.1 Merkezi Bölge Spektrumu

Merkezi bölgeye ait birleştirilmiş spektrumları CIAO'daki dmgroup komutu kullanılarak group_type=NUM_CTS seçeneğiyle bin başına 20 sayım olacak şekilde gruplandırdık. Spektrumların analizlerini gerçekleştireceğimiz enerji aralığı için 0.3-8.0 keV aralığını seçtik ve analizlerimizi XSPEC Arnaud (1996) yazılımı kullanarak gerçekleştirdik.

R Aqr, X-ışını spektrumunda yumuşak ve sert olmak üzere iki farklı bileşen barındıran bir β/δ tipi simbiyotik sistemdir. Bu hibrit spektrum, radyasyonun sistemin farklı bölgelerinden kaynaklanması nedeniyle oluşmaktadır. Sistemin spektrumunu

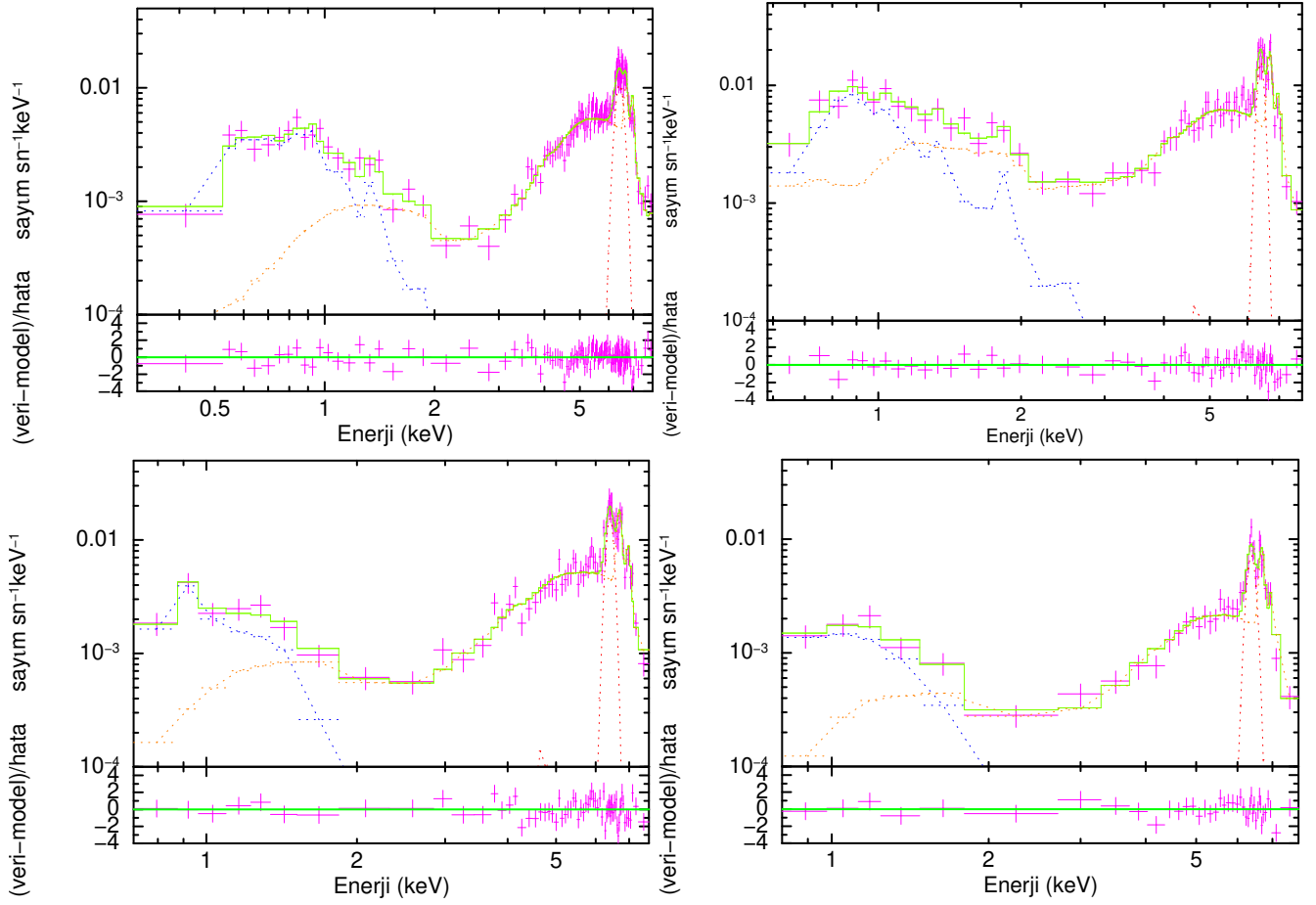
en iyi şekilde modelleyebilmek için en az iki farklı sıcaklık bileşeni gerekmektedir.

Merkezi bölge spektrumunu modellerken ilk olarak yıldızlararası soğurma için tbabs modelini kullanarak HEASOFT'un N_H column density aracı ile elde ettiğimiz değeri kullanarak sabitledik. Spektrumun yumuşak X-ışını bileşeni için kısmi kaplayan soğurma pcfabs modelini ve spektrumun sert X-ışını bileşeni için kısmi kaplayan iyonize soğurma zxcipcf modelini kullandık. Hem yumuşak hem de sert bileşenler için denge dışı plazma NEI modeli kullanarak iki farklı sıcaklık parametresi elde ettik. 6.4 keV'deki floresan Fe $K\alpha$ emisyonunun Eze (2014) yığılma diskindeki sınır tabakasından kaynaklandığı düşünülmektedir. R Aqr'nin X-ışını spektrumunda da bu çizgiyi görmekteyiz. Bu nedenle, 6.4 keV'deki Fe $K\alpha$ emisyonunu temsil etmek için bileşik modelimize bir Gauss modeli ekledik.

2017, 2020, 2021 ve 2022 yıllarına ait 1''5 yarıçaplı merkezi bölgenin enerji spektrumları Şekil 3'te gösterilmektedir. Spektral analiz sırasında kullanılan bileşke model ve bu modele ait en iyi uyum parametreleri ise, ilgili hata değerleriyle birlikte Çizelge 1'de sunulmaktadır.

2.2.2 Merkez Dışı Bölge Spektrumu

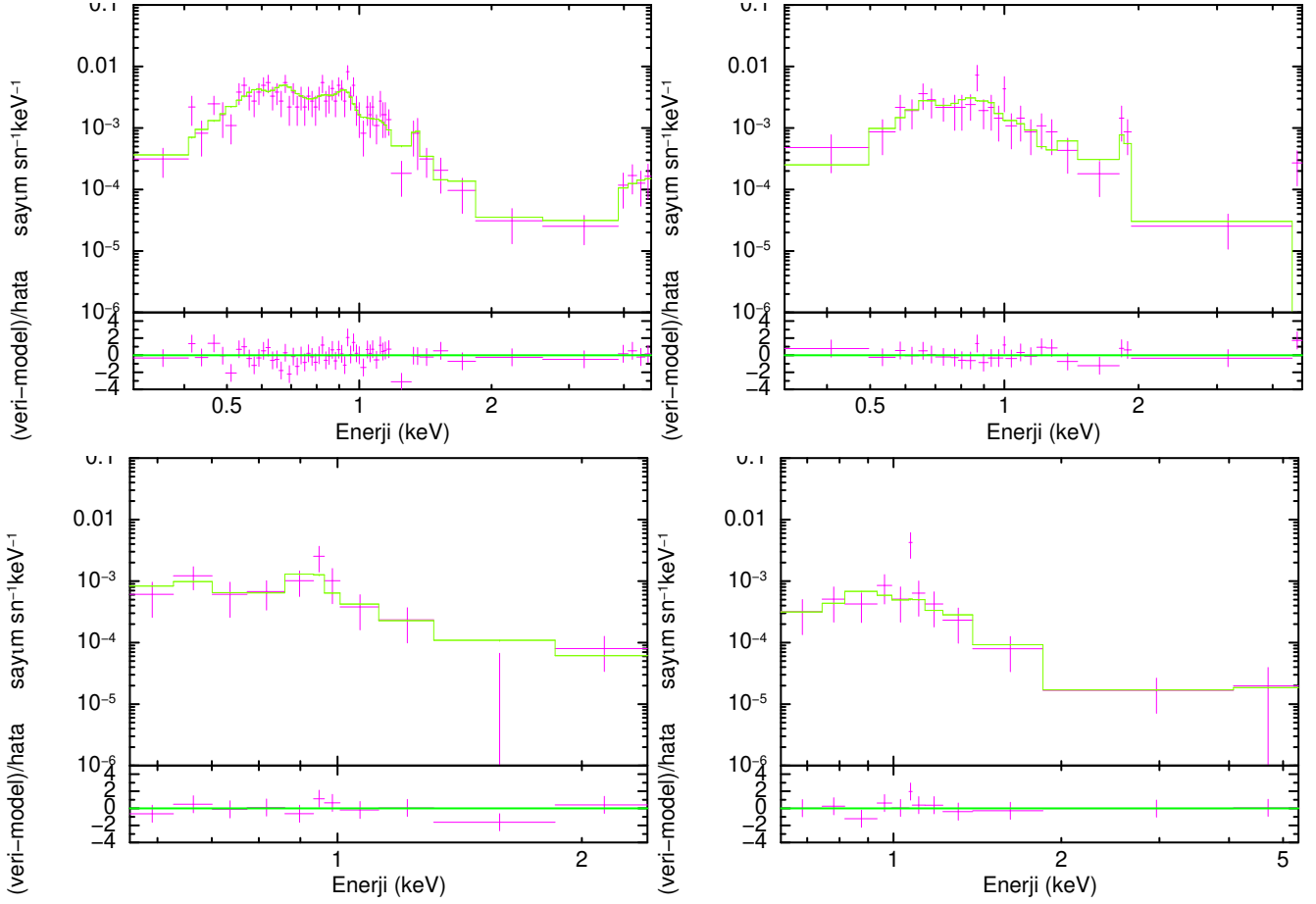
Merkez dışı bölgenin spektrumları, dmgroup komutu ve group_type=NUM_CTS seçeneğini kullanılarak bin başına 5 sayım olacak şekilde gruplandırıldı. Düşük sayım istatistikleri nedeniyle spektrumları 0.3-5.0 keV aralığında analiz ettik. Spektrumları modellerken, merkezi bölge için kullandığımız



Şekil 3. R Aqr'nin merkezi bölgesine ait X-ışını spektrumları ve en iyi uyum modelleri, 2017 ve 2020 yılları (üst panel, soldan sağa) ve 2021 ve 2022 yılları için (alt panel, soldan sağa) gösterilmiştir. Veriler pembe renkle, uyum modelleri ise yeşil renkle sunulmuştur. Her spektrumun ikinci panelinde standart sapmalar gösterilmiştir.

Çizelge 1. 1''5 yarıçaplı merkez bölgesine ait spektral uyum parametreleri. Kullanılan model: $\text{tbabs} \times (\text{pcfabs} \times \text{NEI} + (\text{zxipcf} \times (\text{NEI} + \text{GAUSS})))$.

Parametre	Birim	2017	2020	2021	2022
Yıldızlararası Soğurma (N_{H})	10^{22} cm^{-2}	0.02	0.02	0.02	0.02
Soğurma (pcfabs(N_{H}))	10^{22} cm^{-2}	$0.8^{+0.08}_{-0.07}$	$2.4^{+\infty}_{-0.2}$	$0.7^{+0.08}_{-0.2}$	$0.004^{+\infty}_{-\infty}$
Kaplama kesri (pcfabs(f_{cov}))		$0.9^{+0.007}_{-0.007}$	$0.7^{+0.1}_{-0.7}$	$0.9^{+\infty}_{-0.07}$	$0.01^{+\infty}_{-\infty}$
kT_{nei}	keV	$0.2^{+0.006}_{-0.006}$	$0.6^{+0.1}_{-0.09}$	$0.2^{+0.06}_{-0.008}$	$0.2^{+0.08}_{-0.01}$
İyonizasyon zaman ölçeği (τ)	$10^{10} \text{ s cm}^{-3}$	$10.3^{+6.0}_{-3.2}$	$18.1^{+\infty}_{-8.0}$	$5.8^{+\infty}_{-2.1}$	$0.005^{+0.07}_{-\infty}$
Normalizasyon (nei)	10^{-4} cm^{-6}	$3.1^{+0.3}_{-0.3}$	$0.7^{+0.1}_{-0.1}$	$10.0^{+\infty}_{-1.7}$	$10.0^{+\infty}_{-2.0}$
Soğurma (zxipcf(N_{H}))	10^{22} cm^{-2}	$62.2^{+0.6}_{-0.7}$	$64.6^{+11.5}_{-1.2}$	$60.5^{+1.1}_{-1.3}$	$61.4^{+1.3}_{-1.6}$
İyonizasyon parametresi ($\log(\xi)$)	erg cm s^{-1}	$1.7^{+0.1}_{-0.1}$	$1.9^{+0.02}_{-0.01}$	$1.4^{+0.1}_{-0.1}$	$1.3^{+0.2}_{-0.1}$
Kaplama kesri (zxipcf(f_{cov}))		$0.9^{+0.0003}_{-0.0004}$	$0.9^{+0.001}_{-0.001}$	$0.9^{+0.0005}_{-0.0006}$	$0.9^{+0.0006}_{-0.0008}$
kT_{nei}	keV	$10.9^{+1.7}_{-1.05}$	$10.7^{+2.4}_{-1.9}$	$16.0^{+\infty}_{-3.0}$	$7.0^{+1.2}_{-0.9}$
İyonizasyon zaman ölçeği (τ)	$10^{12} \text{ s cm}^{-3}$	$9.6^{+\infty}_{-8.2}$	$0.7^{+0.3}_{-0.2}$	$0.4^{+0.1}_{-0.08}$	$9.9^{+\infty}_{-9.0}$
Normalizasyon (nei)	10^{-3} cm^{-5}	$6.8^{+0.2}_{-0.2}$	$6.6^{+0.3}_{-0.3}$	$7.3^{+0.3}_{-0.3}$	$4.1^{+0.3}_{-0.2}$
Gauss (E_{line})	keV	$6.4^{+0.02}_{-0.02}$	$6.4^{+0.02}_{-0.01}$	$6.4^{+0.01}_{-0.01}$	$6.3^{+0.02}_{-0.02}$
Sigma (Gauss_{σ})	keV	$0.1^{+0.02}_{-0.02}$	$0.08^{+0.02}_{-0.02}$	$0.08^{+0.02}_{-0.01}$	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$
Normalizasyon (Gauss)	$10^{-5} \text{ foton cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$10.0^{+0.9}_{-0.9}$	$8.7^{+1.3}_{-1.2}$	$10.3^{+1.3}_{-1.2}$	$5.7^{+0.9}_{-0.8}$
Soğurulmamış kaynak akısı ($F(0.3-8.0) \text{ keV}$)	$10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$1.5^{+2.4}_{-1.6}$	$1.8^{+0.2}_{-0.4}$	$1.6^{+0.5}_{-0.5}$	$0.8^{+0.2}_{-0.6}$
Lüminozite ($L(0.3-8.0) \text{ keV}$)	$10^{30} \text{ erg s}^{-1}$	$8.7^{+14.2}_{-0.9}$	$10.5^{+10.3}_{-2.3}$	$9.6^{+3.1}_{-3.3}$	$5.0^{+1.5}_{-3.9}$
Cstat/(dof)		1.08/(117)	1.11/(60)	1.52/(58)	1.23/(28)



Şekil 4. R Aqr'nin güneybatı yönündeki 1''5 bölgesine ait X-ışını spektrumları, 2017 ve 2020 yıllarına (üst panel, soldan sağa) ve 2021 ile 2022 yıllarına (alt panel, soldan sağa) ait verileri göstermektedir. Gözlemsel veriler pembe, uyum sonuçları ise yeşil renkle gösterilmiştir. Her spektrumun ikinci panelinde, standart sapmalar sunulmaktadır.

Çizelge 2. 1''5 yarıçaplı merkez dışı bölgesine ait spektral uyum parametreleri. Kullanılan model: $\text{tbabs} \times (\text{pcfabs} \times \text{NEI})$

Parametre	Birim	2017	2020	2021	2022
Yıldızlararası Soğurma (N_H)	10^{22} cm^{-2}	0.02	0.02	0.02	0.02
Soğurma ($\text{pcfabs}(N_H)$)	10^{22} cm^{-2}	$61.2^{+7.0}_{-5.9}$	$4.1^{+1.9}_{-1.0}$	$9.8^{+\infty}_{-2.3}$	$36.1^{+\infty}_{-12.5}$
Kaplama ölçeği ($\text{pcfabs}(f_{\text{cov}})$)		$0.9^{+0.00005}_{-0.00008}$	$0.9^{+0.009}_{-0.029}$	$0.9^{+0.001}_{-0.3}$	$0.9^{+0.001}_{-0.3}$
kT_{nei}	keV	$0.8^{+0.08}_{-0.07}$	$0.4^{+0.06}_{-0.05}$	$0.4^{+0.1}_{-0.1}$	$0.8^{+0.3}_{-0.3}$
İyonizasyon zaman ölçeği (τ)	$10^{10} \text{ s cm}^{-3}$	$7.4^{+1.6}_{-1.2}$	$46.1^{+51.0}_{-26.1}$	$8.9^{+13.1}_{-4.6}$	$10.8^{+36.9}_{-5.9}$
Normalizasyon (nei)	10^{-4} cm^{-6}	$294.1^{+28.9}_{-27.7}$	$4.7^{+0.9}_{-0.8}$	$29.4^{+8.4}_{-7.4}$	$8.1^{+2.5}_{-2.1}$
Soğurulmamış kaynak akısı ($F(0.3-5.0) \text{ keV}$)	$10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$7.6^{+0.3}_{-0.4}$	$7.7^{+0.7}_{-0.8}$	$9.7^{+1.7}_{-1.3}$	$3.6^{+0.6}_{-0.7}$
Lüminozite ($L(0.3-5.0) \text{ keV}$)	$10^{29} \text{ erg s}^{-1}$	$4.3^{+0.2}_{-0.2}$	$4.4^{+0.4}_{-0.04}$	$5.6^{+0.9}_{-0.8}$	$2.0^{+0.3}_{-0.4}$
Cstat/dof		0.88/(55)	0.86/(21)	0.99/(6)	1.12/(7)

modelin sert X-ışını bileşenini dikkate almadan, yalnızca yumuşak X-ışını bileşeni için kullanılan modeli tercih ettik.

2017, 2020, 2021 ve 2022 yıllarına ait 1''5 yarıçaplı merkez dışı bölgenin enerji spektrumları Şekil 4'te gösterilmektedir. Spektral analiz sırasında kullanılan bileşke model ve bu modele ait en iyi uyum parametreleri ise, ilgili hata değerleriyle birlikte Çizelge 2'de sunulmaktadır.

3 Tartışma ve Sonuç

R Aqr'ye ait iyi bilinen olgulardan birisi simbiyotik sistemlerde çok yaygın olmamasına rağmen bu sistemin çift kutuplu jet yapıları göstermesidir. Bu jetler kuzeydoğu-güneybatı yönlerine doğru uzanmaktadır ve optik, radyo, X-ışını gibi birçok dalgaboyunda gözlenmiştir. 2017 yılına ait yumuşak X-ışını görüntüsünde merkezi ikilinin koordinatlarından yaklaşık 8''uzaklıkta, kuzeydoğu yönünde bir dış jet tespit edilmiştir. Ancak bu dış jet, sonraki gözlemlerde tespit edilememiştir. Bunun sebebi dış jetin soğuyarak X-ışınlarında

gözlenememesidir. Güneybatı yönünde ise herhangi bir eski dış jet yapısına rastlanmamıştır. Yumuşak X-ışını görüntüleri, merkezi bölgede yayılmış yeni bir emisyon yapısı ortaya koymakta ve bu yapı yaklaşık 2" boyunca güneybatı yönüne doğru uzanmaktadır.

2.0 keV üzerindeki X-ışını görüntüleri, emisyonun büyük kısmının merkezi bölgeden geldiği nokta benzeri bir yapıya işaret etmektedir. Ancak, merkezi bölgeden gelen X-ışını emisyonu, R Aqr'nin koordinatlarıyla tam olarak örtüşmemektedir. 2021 yılında emisyon, merkezi ikilinin konumuyla uyumlu görülürken, 2022'deki X-ışını görüntülerinde emisyonun merkezi ikilinin konumundan güneybatı yönüne doğru kaydığı tespit edilmiştir. Güneybatıya doğru bu sapma, hem yumuşak hem de sert X-ışını görüntülerinde gözlemlenmiş olup, 2017 ve 2020 yıllarında da fark edilmiştir. Ancak bu sapma, en belirgin şekilde 2022 yılında gözlenmektedir. Bu durum, hareket eden bir dış nebula ya işaret etmektedir.

Merkezi bölgeye ait spektrumlarda yumuşak ve sert X-ışını bileşenleri için iki farklı soğurma özelliği tespit ettik. 2017 yılında yumuşak X-ışını bileşeni için soğurma değeri $N_H \approx 0.84 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ olarak bulunmuştur. 2020 yılında bu değer ani bir artışla $N_H \approx 2.39 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ seviyesine ulaşmış ve 2020 yılı sonrası bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir. 2022 yılında ise N_H , 2017'ye kıyasla 200 kat azalarak $N_H \approx 0.004 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ değerine düşmüştür. Buna karşın merkezi bölgeye ait spektrumların sert X-ışını bileşeni için iyonize soğurma, 2017 yılında $N_H \approx 62.2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ gibi yüksek bir değerde bulunmuştur. Geriye kalan yıllarda ise iyonize soğurma değeri $N_H \approx (60.5-64.7) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ aralığında sabit kalmıştır.

Spektrumun yumuşak ve sert X-ışını bileşenleri için iki farklı plazma modeli kullanılmıştır. 2020 yılı dışında, yumuşak bileşen için plazma sıcaklıkları tüm dönemlerde $kT \approx 0.2 \text{ keV}$ civarlarında bulunmuştur. 2020 yılında ise plazma sıcaklığı $kT \approx 0.60 \text{ keV}$ olarak ölçülmüştür. Sert X-ışını bileşeninin plazma sıcaklıkları, 2017-2021 yılları arasında $kT \approx 10.0-13.0 \text{ keV}$ olarak ölçülmüş, 2022 yılında ise $kT \approx 7.0 \text{ keV}$ 'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Sert X-ışınlarındaki plazma sıcaklığı değerlerinin, önceki çalışmalarda gözlemlenen değerlerden biraz daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, modelimizi powerlaw ve brems modelleriyle yeniden düzenledik. Ancak bu modeller, uyum açısından ilk kullandığımız modelden daha iyi bir sonuç vermemiştir. Bu sebeple, ilk modelin sonuçlarını baz alarak değerlendirmelerimizi sürdürdük.

Merkezi bölge için X-ışını lüminoziteleri (öz ışımaları) $0.3-8.0 \text{ keV}$ aralığında $L_x \approx 5.0-10.52 \times 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$ olarak bulunmuştur.

Merkez dışı bölgenin spektrumlarında epoklar boyunca soğurmada önemli değişiklikler gözlenmiştir. 2017 ile 2020 yılları arasında $N_H \approx 61.22 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 'den $N_H \approx 4.13 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 'ye bir azalma göstermiş, ardından $N_H \approx 9.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 'ye kadar bir artış gözlemlenmiş ve 2022 yılında ise tekrar $N_H \approx 36.17 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 'ye yükselmiştir. Merkez dışı bölge spektrumları için yaklaşık sıcaklıkların, N_H değişimine bağlı olarak $kT \approx 0.8 \text{ keV}$ ile $kT \approx 0.4 \text{ keV}$ arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

2022'de merkez dışı bölgesinin yumuşak X-ışını akısı, 2017'ye göre iki kat azalmıştır, ancak sıcaklıkta belirgin bir değişim görülmemiştir. Bu durum, hareket eden akıştaki şok sıcaklıklarının benzer olduğunu göstermektedir. 2017 ve 2022 yıllarında sıcaklıklar benzer olmasına rağmen, 2022 yılında gözlemlenen akıdaki azalmanın, bölgenin genişlemesiyle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Merkezi olmayan bölgenin X-

ışını lüminoziteleri, $0.3-5.0 \text{ keV}$ aralığında $L_x \approx 2.0-5.6 \times 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$ olarak bulunmuştur. 2017, 2020 ve 2021 yıllarında gözlemlenen lüminozite değerleri nispeten tutarlı olmasına rağmen, 2022 yılında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, R Aqr'nin yıllar içinde yapılan birçok gözleme rağmen hala derinlemesine incelenmesi gereken bir kaynak olduğunu düşünüyoruz. Gelecekteki Chandra ya da yüksek enerjili teleskoplarla yapılacak gözlemler, sistemdeki morfolojik değişimlerin nedenlerini daha ayrıntılı bir şekilde ortaya koyma ve jetlerin oluşumu gibi sistemin dinamiklerine dair önemli bilgiler sunma açısından potansiyel taşımaktadır. Farklı dalga boylarında eşzamanlı gözlemler ise sisteminin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına olanak tanıyacaktır.

Kaynaklar

- Arnaud K. A., 1996, in Jacoby G. H., Barnes J., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 101, Astronomical Data Analysis Software and Systems V*. p. 17
- Eze R. N. C., 2014, *MNRAS*, 437, 857
- Fruscione A., ve diğ., 2006, in Silva D. R., Doxsey R. E., eds, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series Vol. 6270, Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems*. p. 62701V, doi:10.1117/12.671760
- Gromadzki M., Mikołajewska J., 2009, *A&A*, 495, 931
- Kellogg E., Pedelty J. A., Lyon R. G., 2001, *ApJ*, 563, L151
- Luna G. J. M., Sokolowski J. L., Mukai K., Nelson T., 2013, *A&A*, 559, A6
- Min C., Matsumoto N., Kim M. K., Hirota T., Shibata K. M., Cho S.-H., Shizugami M., Honma M., 2014, *PASJ*, 66, 38
- Muerset U., Wolff B., Jordan S., 1997, *A&A*, 319, 201, *ADS*
- Nichols J. S., DePasquale J., Kellogg E., Anderson C. S., Sokolowski J., Pedelty J., 2007, *ApJ*, 660, 651
- Webster B. L., Allen D. A., 1975, *MNRAS*, 171, 171

Access:

M25-0355: *Turkish J.A&A* — Vol.6, Issue 3.