

NGC 5907'deki Aşırı Parlak X-ışın Kaynağı APX1'in Tayfsal Analizi

Ceyda Dilekçi¹  , Bedirhan Alkan¹ , Sinancan Kara¹ , M. Hakan Erkut¹ ,
E. Nihal Ercan¹ 

¹ Boğaziçi Üniversitesi, Fizik Bölümü, 34342, İstanbul, Türkiye

Accepted: February 23, 2025. Revised: February 23, 2025. Received: December 8, 2024.

Özet

NGC 5907 APX1, pulsasyon yapan aşırı parlak X-ışını kaynakları (APX) arasında uç X-ışını özellikleriyle tanınan bir X-ışını pulsarıdır ve zaman içinde parlaklıkta 100 kat kadar periyodik değişimler sergiler. Parlaklıkta gözlenen değişiklikler ve pulsarın dönüş evrimi, standart yığılma modelleriyle açıklanamamaktadır, bu da NGC 5907 APX1'i özellikle ilgi çekici kılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, NGC 5907 APX1'in farklı X-ışını parlaklık fazlarındaki XMM-Newton X-ışını tayf verilerini analiz ederek, çeşitli fiziksel parametrelerin kaynağın parlaklığına bağlı olarak nasıl değiştiğini araştırmaktır. Bu çalışma ile NGC 5907 APX1'in XMM-Newton gözlem verilerinin tayfsal analizinden elde edilen fiziksel veriler sayesinde ilgili parametrelerin karşılıklı ilişkileri ortaya çıkarılmaktadır. Tayfsal analiz, bu APX'in tayfına yeterli uyum gösteren tek bileşenli tayf modellerinden *diskpbb* modeli çerçevesinde iç disk sıcaklığı ve hidrojen kolon yoğunluğunun değişimleri üzerine yoğunlaşmaktadır.

Abstract

NGC 5907 ULX1 is an X-ray pulsar well known due to its extreme X-ray characteristics among pulsating ultraluminous X-ray sources (ULX), exhibiting periodic brightness variations of up to a factor of 100 over time. The observed variations in brightness and the rotational evolution of the pulsar cannot be explained by standard accretion models, making NGC 5907 ULX1 particularly intriguing. The aim of this study is to investigate how various physical parameters change with the source luminosity, by analyzing the X-ray spectral data of NGC 5907 ULX1 obtained with XMM-Newton across different X-ray brightness phases. This study reveals the correlations of these parameters thanks to the physical data obtained through the spectral analysis of the XMM-Newton observational data of NGC 5907 ULX1. The spectral analysis focuses on the variations of inner disk temperature and hydrogen column density within the framework of one of the single-component spectral models, the *diskpbb* model, which adequately fits the spectrum of this ULX.

Anahtar Kelimeler: accretion – X-ray binaries – neutron star – ultraluminous X-ray pulsar

1 Giriş

Aşırı Parlak X-ışını Kaynakları (APX'ler), bilinen X-ışını çiftlerinin X-ışın parlaklıklarını da aşan ve gözlemlendikleri galaksilerin merkezinde yer almayan, bu nedenle aktif galaktik çekirdekleri besleyen süper kütleli karadeli olamayacakları düşünülen nesnelerdir. Genellikle, 10^{39} erg s⁻¹ değerini aşan X-ışın parlaklığına sahip, yıldız kütleli bir kara delik veya nötron yıldızı barındıran X-ışını çiftleri, Eddington parlaklık sınırını aştıkları için aşırı parlak X-ışın kaynağı olarak kabul edilir (Kaaret ve diğ. 2017). Yapılan son araştırmalar ışığında, APX sistemlerinin çoğunda kütle yığıştıran bileşenin nötron yıldızı olabileceği öngörülmüştür (Ercut ve diğ. 2019, 2020).

Pulsasyon gösteren APX'ler içinde en yüksek X-ışın parlaklığına (10^{41} erg s⁻¹) erişebilen NGC 5907 APX1 (Şekil 1), parlaklığı dönemsel olarak 100 kata kadar değişebilen bir X-ışın pulsarıdır. NGC 5907 APX1, ayrıca düşük parlaklık dönemlerinde nötron yıldızının dönmesinde yavaşlama evresine girdiği ileri sürülen ilk kaynaktır (Fürst ve diğ. 2023). NGC 5907 APX1, parlaklık değişimi ve pulsar dönme evriminin standart

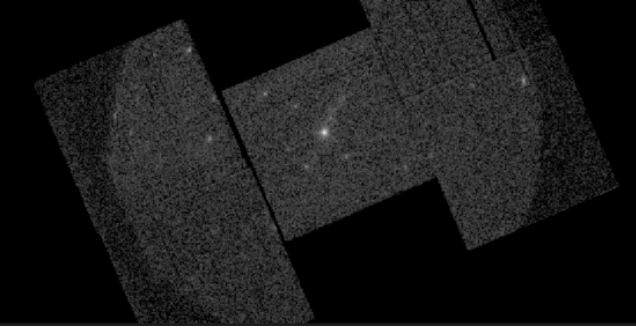
yığılma modelleri içinde açıklanamaması nedeniyle de merak uyandırmaktadır. Kaynak üzerine görece yakın zamanda yapılan çalışmalar genellikle bu X-ışın pulsarının dönme periyodu ve X-ışın foton sayım oranı üzerinden tahmin edilen X-ışın parlaklığı üzerine yoğunlaşmıştır (Walton ve diğ. 2015; Fürst ve diğ. 2023; Belfiore ve diğ. 2024). Ancak, kaynağın doğasını tam olarak anlayabilmek için tayfsal analizlerin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada NGC 5907 APX1 kaynağının iç disk sıcaklığı ve hidrojen kolon yoğunluğu gibi fiziksel parametrelerini belirlemek amacıyla tayfsal analiz gerçekleştirilmiş ve bu parametrelerin zamanla ve kaynağın parlaklığına bağlı olarak nasıl değiştikleri incelenmiştir.

2 XMM-Newton Gözlemleri ve Veri Analiz Yöntemleri

XMM-Newton uydusunun NGC 5907 APX1'e ait 16 adet gözlemi kullanılmıştır. Bu gözlemler ESA Science Archive'dan elde edilmiş olup farklı parlaklık dönemlerine karşılık gelmekte ve yaklaşık 10 yıllık bir dönemi kapsamaktadır (Çizelge 1).

Pulsar dönme periyodu literatürden elde edilmiştir (Fürst ve diğ. 2023). Kaynağın X-ışın parlaklığı 0.1-10 keV enerji aralığındaki X-ışın tayfının modellenmesinden elde edilmiştir. Verilerin kalibrasyonu, filtrelenmesi ve rafine edilmesinde

* ceyda.dilekci@std.bogazici.edu.tr



Şekil 1. NGC 5907 APX1'in MOS1 dedektöründen resmi (Obs.0824320601)

HEASoft (6.32.1) ve Science Analysis System (SAS v.21.0) programları kullanılmıştır. Analiz ve modelleme işlemleri XSPEC (12.13.1)'te yapılmıştır.

2.1 Verilerin İndirgenmesi

Ham verilerin işlenmesi için Kuntz & Snowden (2008) çalışmasındaki öneri doğrultusunda sırasıyla standart epchain, emchain, espfilt komutları kullanılmıştır. Bu komutların sonunda temizlenmiş, rafine ve kalibre bir veri setine ulaşılmıştır. Bu aşamada SAOImage DS9 yardımıyla nesnenin görüntüsü elde edilmiştir (Şekil 1). Arka plan verisi, kaynağa yakın bir bölgeden elde edilerek ham veri setinden çıkartılmış ve böylece arka planın kaynağın tayfına olan etkisi en aza indirilmiştir. Bu işlem sonucunda, temiz bir kaynak tayfı elde edilmiştir. Devamında mosspectra ve pnspectra komutlarıyla MOS1, MOS2 ve pn tayfları oluşturulmuştur.

2.2 Modelleme

APX'lerin tayfını modellemek için birden fazla model kullanılabilir. Bunun başlıca sebeplerinden biri APX'lerin karmaşık tayfsal özellikler sergilemesi ve oldukça değişken tayflara sahip olmasıdır (Kajava ve diğ. 2008). Farklı modeller farklı fiziksel süreçlere karşılık geldiği için içerisinde termal ışıma modellerinden kara cisim ışıması, yığılma diski ve Compton saçılması gibi farklı bileşenleri barındıran APX'ler için farklı modeller denemek veri analizinin ilk aşamasında önemlidir. Bu şekilde farklı fiziksel modeller ve bunlara bağlı olarak farklı senaryolar test edilebilir.

2.2.1 Model 1

$$\text{constant} \times \text{phabs} \times \text{phabs} \times \text{bknpower} \quad (1)$$

Bu model X-ışını astronomisinde sık kullanılan bir tayfsal modeldir. phabs bileşeni kaynağa ait olan veya kaynağı çevreleyen maddenin neden olduğu soğurulma sebebiyle X-ışını fotonlarının zayıflamasını ifade eder.

Bu modeldeki ilk phabs Samanyolu galaksisindeki görüş doğrultusu boyunca meydana gelen fotoelektrik soğurulma için eklenmişken, ikinci phabs parametresi kaynağın iç soğurma katsayısını göz önünde bulundurmak için eklenmiştir. Modelin phabs soğurma bileşenini temsil eden parametre hidrojen kolon yoğunluğu N_H olup genellikle cm^{-2} başına 10^{22} atom biriminde ölçülür.

bknpower yüksek enerjili X-ışın kaynakları için sık kullanılan bir model bileşenidir. Bu model kırılmış bir kuvvet

Çizelge 1. Gözlem Verilerinin Tarihi, Parlaklığı ve Periyodu

OBSID	Tarih	$L(10^{39} \text{ erg/s})$	Periot (ms)
0145190201	2003-02-20	19.05 ± 0.02	$1427.76^{+0.11}_{-0.09}$
0804090301	2017-07-02	5.78 ± 0.04	$945.79^{+0.08}_{-0.05}$
0804090401	2017-07-05	2.93 ± 0.02	$946.17^{+0.04}_{-0.08}$
0804090501	2017-07-08	1.58 ± 0.03	-
0804090701	2017-07-12	0.32 ± 0.01	-
0804090601	2017-07-15	1.06 ± 0.02	-
0824320201	2019-06-12	12.88 ± 0.01	$1019.142^{+0.026}_{-0.046}$
0804090801	2019-06-22	12.02 ± 0.01	-
0851180701	2019-08-10	6.70 ± 0.02	-
0851180801	2019-08-12	6.51 ± 0.04	-
0824320501	2019-12-08	1.00 ± 0.003	-
0824320601	2020-07-23	14.79 ± 0.11	$1032.94^{+0.08}_{-0.05}$
0824320701	2020-11-06	0.89 ± 0.002	-
0884220201	2021-02-20	12.2 ± 0.06	$1012.620^{+0.025}_{-0.033}$
0884220301	2021-02-26	5.01 ± 0.02	-
0884220401	2021-03-04	9.33 ± 0.05	$1009.563^{+0.027}_{-0.035}$

yasasını temsil eder ve emisyonun bir "kırılma" enerjisiyle ayrılmış iki farklı kuvvet yasası endeksiyle karakterize edildiği bir tayfı tanımlamak için kullanılır. Bu modelin temsil ettiği fiziksel süreç, farklı enerji aralıklarında farklı mekanizmalarla yönetilen bir süreçtir. Bu model, tayfı yumuşak ve sert X-ışın bölgeleri arasında keskin bir geçiş yapan sisteme basit bir kuvvet yasasından daha iyi uyum sağlar.

2.2.2 Model 2

$$\text{constant} \times \text{phabs} \times \text{phabs} \times \text{diskbb} \quad (2)$$

Kullandığımız bu model X-ışını astronomisinde özellikle X-ışını çiftleri ve yığılma disklerini modellemekte kullanılır. Bu model çoklu karacisim bileşeni içeren bir yığılma diskinin tayfına karşılık gelmektedir. NGC 5907 APX1 gibi kütle yığıldığı düşünülen sistemlerden gözlenen termal emisyonu modelleyen bir tayf bileşeni olarak da diskbb kullanılabilir. Bu modelde sıcaklık ve norm gibi parametreler iç disk yarıçapı ile belirlenmektedir.

2.2.3 Model 3

$$\text{constant} \times \text{phabs} \times \text{phabs} \times \text{diskpbb} \quad (3)$$

Bu model, üstte kullanılan modele çok benzemekle birlikte diskpbb bileşeninin etkisiyle daha farklı yerel disk sıcaklık profillerine izin veren bir yığılma diskinin tayfını temsil eder. APX'ler, çoğunlukla yüksek parlaklık rejimlerinde gözlemlendikleri için, standart diskbb modelinin ötesinde bir yerel disk sıcaklık profili yardımıyla modellenmeye ihtiyaç duyabilirler. Diskpbb modeli, disk yapısındaki değişikliğe bağlı olarak radyal sıcaklık profilinin standart olmayan değerlerini göz önünde bulundurmamak, böylece yüksek yığılma rejimlerinde kütle aktarma disklerindeki değişimi incelemek için kullanılabilir.

2.2.4 Modelleme Prosedürü

İlk phabs bileşeni için N_H parametresi NASA Heasarc sitesinin HI 4 Pi Survey kataloğundan $2.02 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ olarak elde edilmiştir ve modelleme prosedürü boyunca sabitlenmiştir.

diskbb ve diskpbb arasındaki en önemli fark yığılma diskindeki yerel sıcaklığın radyal bağımlılığıyla ilgilidir. diskbb

Çizelge 2. NGC 5907 APX1'in 0824320601 numaralı gözlemine ait tayfa uygulanan farklı modeller için parametre değerleri tablosu. Sabit tutulan parametreler hançer işareti "†" ile gösterilmiştir.

Parametre	BknPowerlaw	DiskBB	DiskPBB
χ^2/dof	0.99	1.13	1.00
Sabit (MOS1)†	1.0	1.0	-
N_H (10^{20} cm^{-2})†	2.02	2.02	2.02
N_H (10^{22} cm^{-2})	0.44 ± 0.05	0.27 ± 0.03	0.39 ± 0.05
T_{in} (keV)	-	2.46 ± 0.14	3.65 ± 0.89
p	-	-	0.63 ± 0.03
Foton İndeks 1	1.34 ± 0.08	-	-
Kırılma Enerjisi (keV)	5.06 ± 0.93	-	-
Foton İndeks 2	1.94 ± 0.41	-	-
Norm ($\times 10^{-4}$)	1.83 ± 0.16	21.71 ± 4.05	3.13 ± 3.70

geometrik olarak ince, optik olarak kalın bir birikim diskini temsil eder. Bu modelde sıcaklığın radyal bağımlılığı Shakura-Sunyaev modeliyle (Shakura & Sunyaev 1973) uyumlu olarak 0.75'e sabitlenmiştir. Bir başka deyişle standart disk modelinde radyal sıcaklık profili $T(r) \propto r^{-3/4}$ ile verilirken diskpbb modeline göre sıcaklık profili $T(r) \propto r^{-p}$ olup burada p serbest bir değişkendir. Bu model sayesinde standart modelden sapmalar göz önünde bulundurulmaktadır.

Her modelin başındaki constant bileşeni farklı veri kümelerini (XMM-Newton üzerindeki MOS1, MOS2, pn dedektörlerinden elde edilen kümeler) ölçeklendirmek amacıyla kullanılır. Genellikle ilk veri kümesi için 1 olarak ayarlanır ve ölçeklemede tutarlılığı sağlamak için sonraki veri kümeleri için genellikle 1'e yakın olur. Gözleme bağlı olarak, XMM-Newton üzerindeki MOS1, MOS2 veya pn dedektörlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır.

3 XMM-Newton Veri Analizi Sonuçları

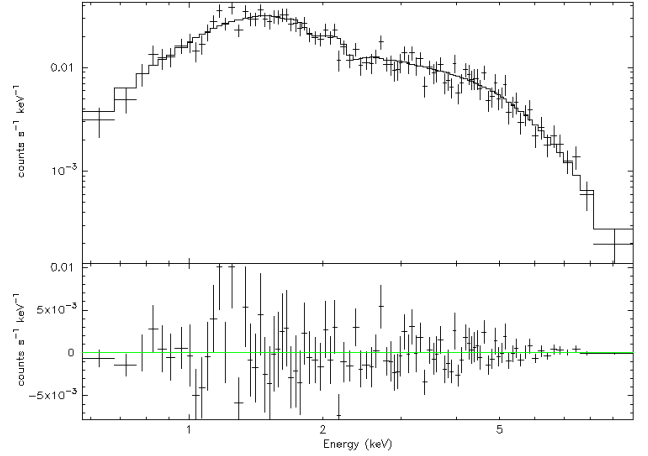
Uyumu araştırılan tayf modellerine örnek olarak Çizelge 1'deki 0824320601 ve 0824320701 numaralı gözlemlerin tayfları model parametreleriyle beraber sırasıyla Çizelge 2 ve Çizelge 3'de verilmiştir. Bu gözlemlerin aralarında 4 aylık bir zaman farkı vardır. Bununla beraber 0824320601 numaralı gözlemden kaynağın parlaklığı 0824320701 numaralı gözlemden kaynağın parlaklığına göre 16 kat daha yüksektir. Ayrıca bu gözlemlerden ilkinde dönme periyodu tespit edilmesine rağmen ikincisinde edilememiştir. İki gözlem arasındaki söz konusu bu farklar nedeniyle kaynağın tayfının her iki gözlemden değişimi bu çalışmada özellikle ele alınmıştır.

Bu çalışma, NGC 5907 APX1'in XMM-Newton X-ışın tayf verilerinin analizini ve modellenmesini içermektedir (Şekil 2, 3, 4). Analiz sonuçları elde edilen fiziksel parametrelerin kaynağın parlaklık değişimi gösterdiği uzun (2003-2021, Şekil 5) ve kısa (02.07.2017-17.07.2017, Şekil 6) dönemler boyunca davranışını özetlemektedir. Bununla beraber kısa döneme ait N_H -parlaklık ve sıcaklık-parlaklık ilişkilerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8 ile verilmektedir. Daha önceki çalışmalarda XMM-Newton teleskobundan NGC 5907 APX1'e dair bazı gözlem setleriyle ilgili tayfsal analizler mevcuttur (Miura ve diğ. 2024; Maitra ve diğ. 2018). Bu çalışmada ise tayfsal analizler kaynağın parlaklığına ve nötron yıldızının dönme periyodunu içerip içermemesine göre çok sayıda gözlem veri grubu kullanılarak yapılmıştır. Bu sebepten NGC5907 APX'in tayfıyla ilgili olarak yapılan ilk detaylı çalışmadır.

2019 yılına ait gözlemler, yalnızca üç veri noktası

Çizelge 3. NGC 5907 APX1'in 0824320701 numaralı gözlemine ait tayfa uygulanan farklı modeller için parametre değerleri tablosu. Sabit tutulan parametreler hançer işareti "†" ile gösterilmiştir. Sınırlandırılmayan ve fizik dışı sonuç veren parametre değerleri ise yıldız işareti "*" ile gösterilmiştir.

Parametre	BknPowerlaw	DiskBB	DiskPBB
χ^2/dof	0.93	0.93	1.04
Sabit (MOS1)†	1.0	1.0	-
Sabit (MOS2)	1.0	0.67 ± 0.07	-
N_H (10^{20} cm^{-2})†	2.02	2.02	2.02
N_H (10^{22} cm^{-2})	0.35 ± 0.09	$1.11 \times 10^{22} (*)$	0.38 ± 0.13
T_{in} (keV)	-	1.32 ± 0.02	2.48 ± 3.16
p	-	-	0.50 ± 0.12
Foton İndeks 1	2.14 ± 0.25	-	-
Kırılma Enerjisi (keV)	$545.3 (*)$	-	-
Foton İndeks 2	$2.03 (*)$	-	-
Norm ($\times 10^{-4}$)	0.41 ± 0.09	1.84 ± 0.72	0.30 ± 0.18



Şekil 2. 0824320601 numaralı XMM-Newton gözlemi tayfının Model 1 (constant×phabs×phabs×bknpower) ile uyumu kalıntıları (residuals) eklenmiştir.

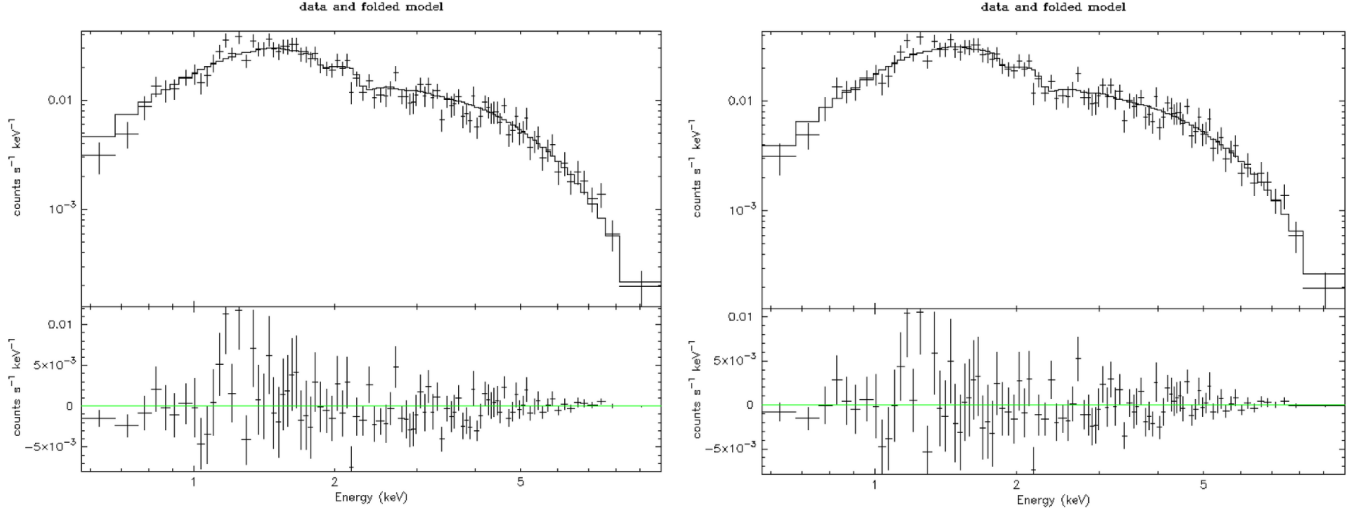
içerdiğinden ve bu verilerin istatistiksel anlamlılığı düşük olduğundan kısa dönem analizlerine dahil edilmemiştir. Onun yerine bu çalışma, kısa zaman aralıklarında 2017'de alınan verilere odaklanarak daha sağlam ve güvenilir sonuçlar elde etmeye yönelmiştir.

Uzun dönem ve kısa dönem analizlerinde tek bir modele bağlı kalınmayarak ve χ/dof değerleri göz önünde bulundurularak en uyumlu modelin parametreleri ve bu parametreler arasındaki ilişkiler ortaya çıkarılmıştır.

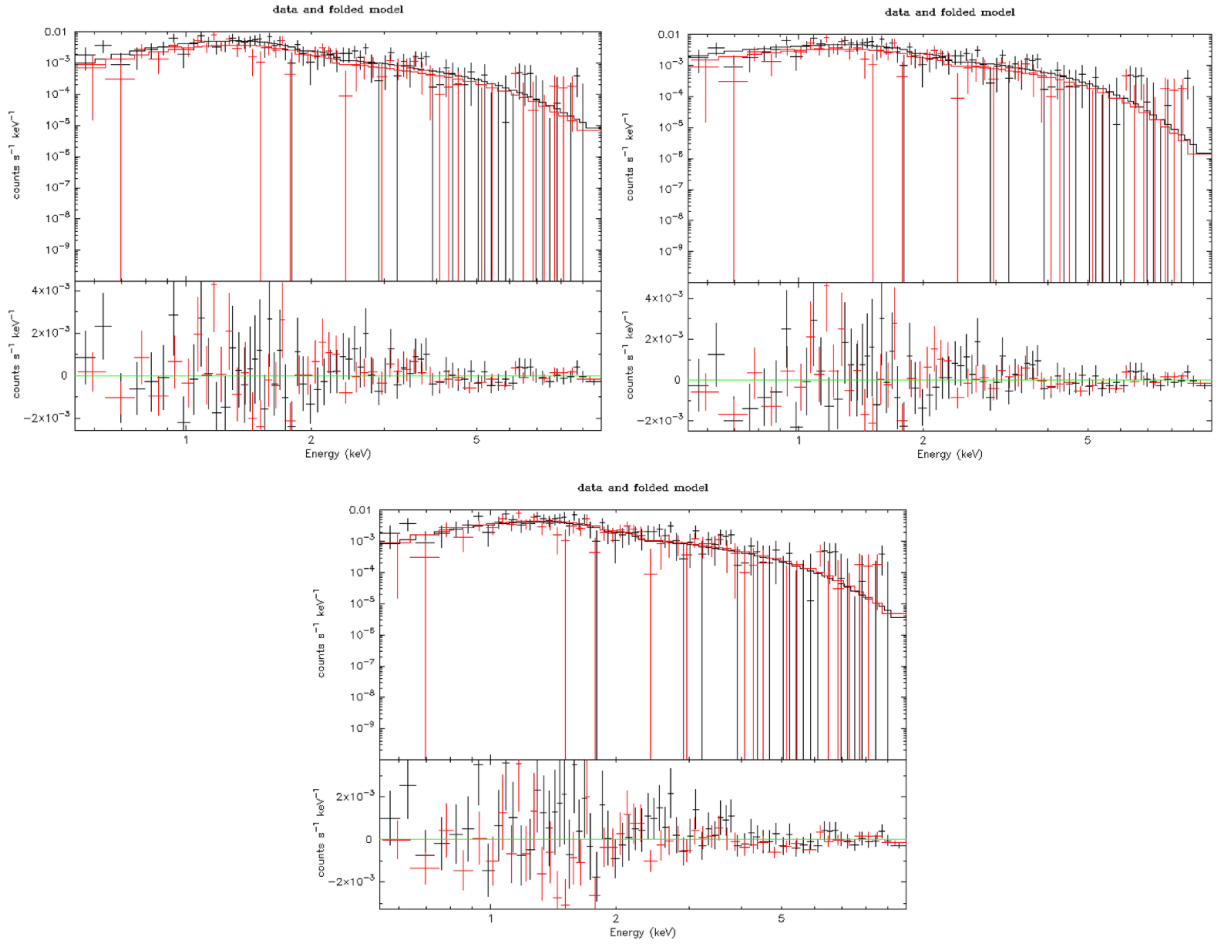
0824320601 gözleminde diskbb'nin χ/dof değeri diskpbb modelinden daha yüksektir, 0824320701 gözleminde ise N_H diskbb ile doğru sınırlandırılmamıştır. diskpbb modelindeki parametre p 'nin değeri Çizelge 2 ve 3'den de görüleceği üzere ilk gözlemden 0.634, ikinci gözlemden ise 0.500 bulunmuştur. Tüm bu analiz ışığında diskin 0.75'e sabitlenmiş bir p içeren standart bir disk (diskbb) modellenmemesinin daha uygun olacağı ortaya konulmuştur.

4 Tartışma

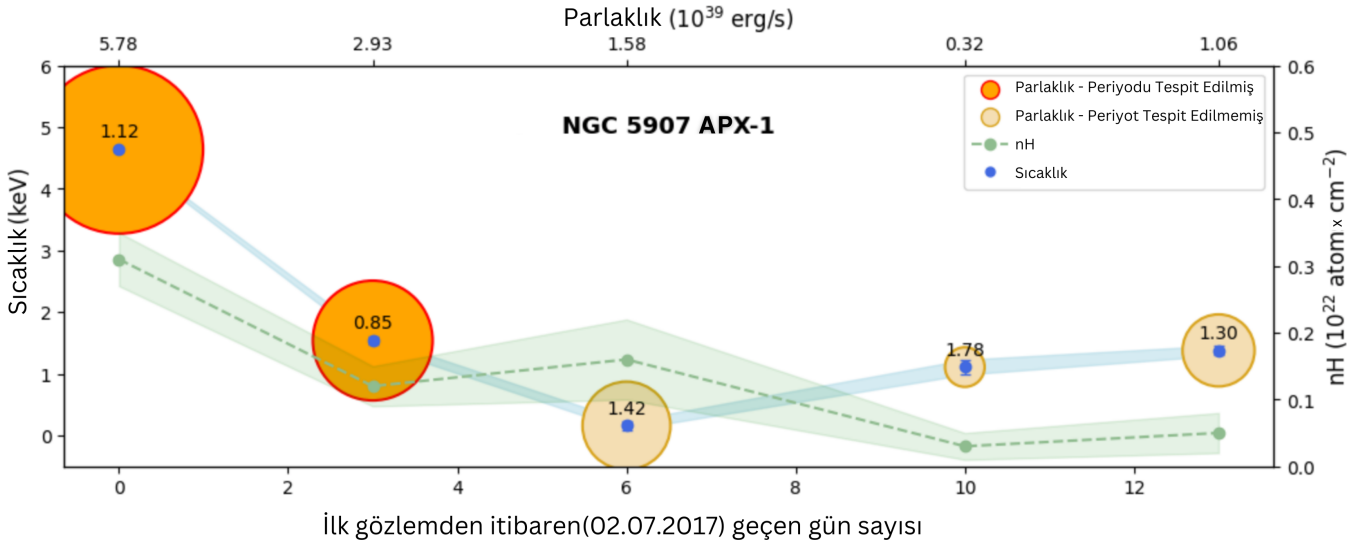
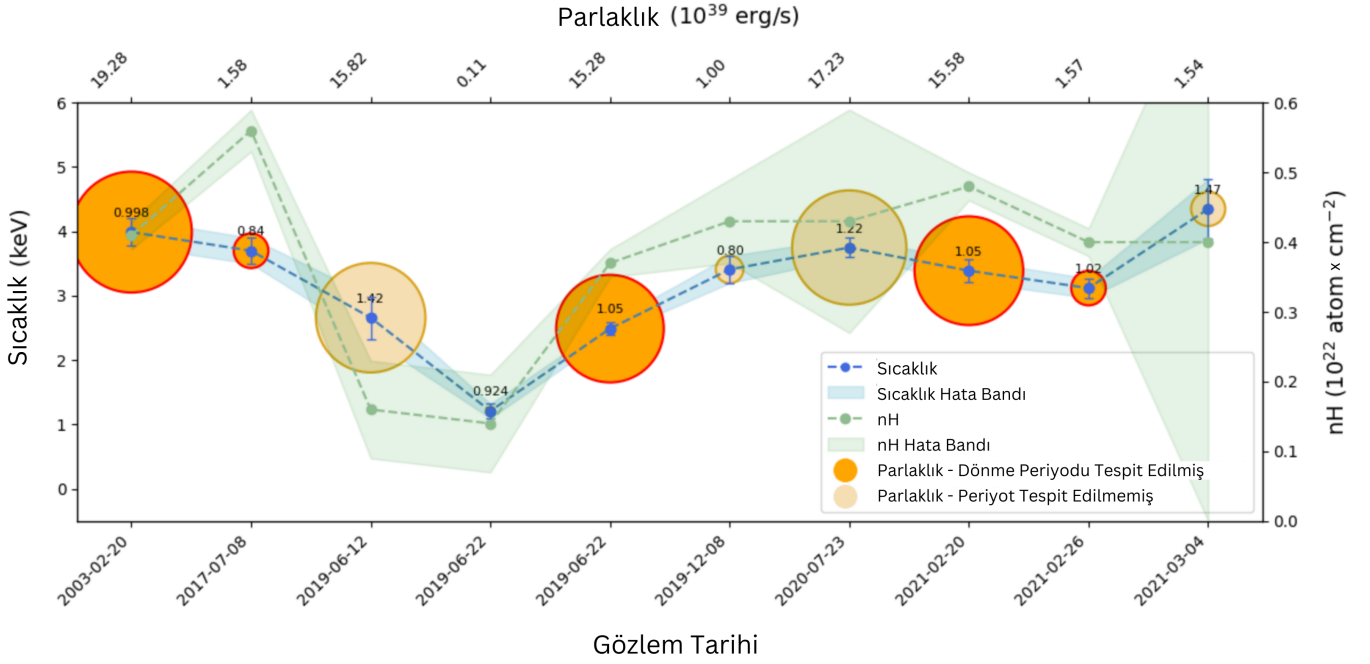
Tayfsal analizler, özellikle diskpbb modeli kapsamında iç disk sıcaklığı ve soğurma katsayısının parlaklığa bağlı olarak 5

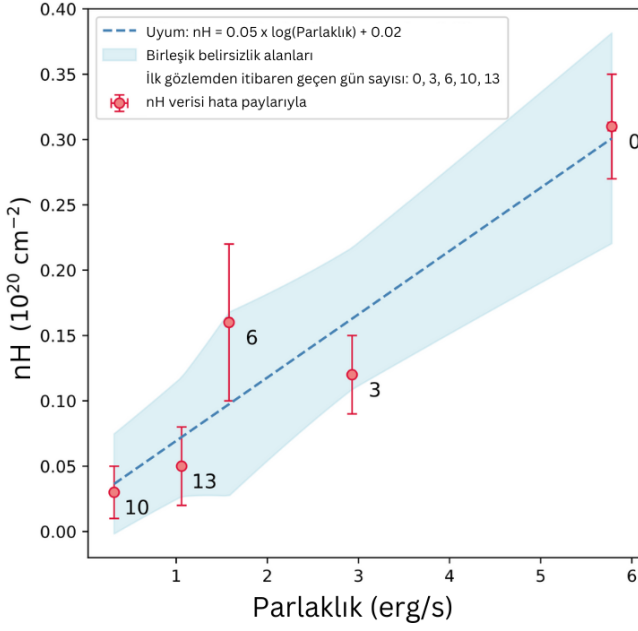


Şekil 3. 0824320601 numaralı XMM-Newton gözlemi tayfının farklı modellerle uyumu. Her bir modelin altına kalıntılar (*residuals*) eklenmiştir. **Solda:** Model 2 ($\text{constant} \times \text{phabs} \times \text{phabs} \times \text{diskbb}$) ile modelleme. **Sağda:** Model 3 ($\text{phabs} \times \text{phabs} \times \text{diskpbb}$) ile modelleme.

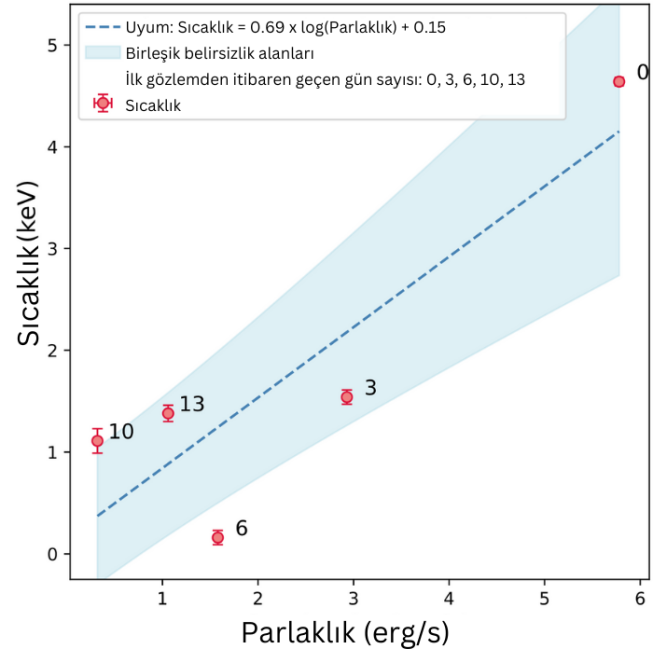


Şekil 4. 0824320701 numaralı XMM-Newton gözlemi tayfının farklı modellerle uyumu. Her bir modelin altına kalıntılar (*residuals*) eklenmiştir. **Sol üstte:** Model 1 ($\text{constant} \times \text{phabs} \times \text{phabs} \times \text{bknpower}$) ile modelleme. **Sağ üstte:** Model 2 ($\text{constant} \times \text{phabs} \times \text{phabs} \times \text{diskbb}$) ile modelleme. **Altta:** Model 3 ($\text{phabs} \times \text{phabs} \times \text{diskpbb}$) ile modelleme.





Şekil 7. NGC 5907 APX1'in 02-07-2017 ve 15-07-2017 zaman aralığında hidrojen sütun yoğunluğu (N_H) ve parlaklık değerlerinin değişimi gösterilmektedir. Şekilde x eksen parlaklık (erg s^{-1}), y eksen ise N_H (10^{20} cm^{-2}) değerlerini göstermektedir. İlk gözlemden itibaren geçen gün sayısı noktaların üstüne eklenmiştir. Veri noktalarına doğrusal bir uyum yapılmıştır. Uyumlanan doğrusal model, N_H ile parlaklık (L) arasında $N_H = 0.59 \log(L) + 0.02$ şeklinde bir ilişki ortaya koymaktadır. Burada $\log(L)$, parlaklığın logaritmik ölçeğini ifade etmektedir. Grafikte, belirsizlik değerleri ve birleşik belirsizlik alanları (*combined uncertainty*) gösterilmiştir.



Şekil 8. NGC 5907 APX1'in 02-07-2017 ve 15-07-2017 zaman aralığında sıcaklık ve parlaklık değerlerinin değişimi gösterilmektedir. Şekilde x eksen parlaklık (erg/s), y eksen ise sıcaklık (keV) değerlerini göstermektedir. İlk gözlemden itibaren geçen gün sayısı noktaların üstüne eklenmiştir. Veri noktalarına doğrusal bir uyum yapılmıştır. Uyumlanan doğrusal model, sıcaklık (T) ile parlaklık (L) arasında $T = 0.69 \log(L) + 0.15$ şeklinde bir ilişki ortaya koymaktadır. Burada $\log(L)$, parlaklığın logaritmik ölçeğini ifade etmektedir. Grafikte, belirsizlik değerleri ve birleşik belirsizlik alanları (*combined uncertainty*) gösterilmiştir.

kata kadar değiştiğini göstermektedir. Hem kısa hem uzun dönem analizlerinde karşımıza çıkan bu davranışı fiziksel olarak yorumlamak güçtür. Özellikle kullanılan tayfsal modele bağlı olarak hidrojen kolon yoğunluğunda saptanan bu türden değişimler, sistemin özellikleri (nötron yıldızı yüzeyindeki güçlü manyetik alan, Eddington üstü kütle aktarım hızları gibi) göz önünde bulundurulduğunda tutarlı bir şekilde açıklanmalıdır. Hidrojen kolon yoğunluğu parametresini N_H içeren ikinci phabs bileşeninin, tüm tayfsal modellerde serbest bırakılmasının modellemeyi etkileyebileceği, sistemin fiziksel özellikleri ile uyumlu olmayan tayf modellerine ve/veya parametre değerlerine yol açabileceği de unutulmamalıdır. Burada özetlenen analizleri takiben yapılacak çalışmalarda N_H değerinin her veri seti için serbest bırakılması yerine görece yüksek parlaklık durumlarında gözlenen verilerin ilk aşamada tayf modellemesi ile elde edilecek N_H değerinin diğer veri setlerine uygulanacak tayf modellerinde kısıtlayıcı bir parametre olarak kullanılması, böylece tüm veri setleri için ortak bir N_H değerinin bulunması planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma BÜ Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 19951 kodu ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

Belfiore A., ve diğ., 2024, *AJ*, 965, 78
Erkut M. H., Ekşi K. Y., Alpar M. A., 2019, *ApJ*, 873, 105

Erkut M. H., Türkoğlu M. M., Ekşi K. Y., Alpar M. A., 2020, *ApJ*, 899, 97
Fürst F., Walton D. J., G.L. I., 2023, *A&A*, 672, A140:1
Kaaret P., Feng H., Roberts T. P., 2017, *ARA&A*, 55, 303
Kajava J., Poutanen J., G.L. I., 2008, *AIP Conf. Proc.*, 1054, 39
Kuntz K., Snowden S., 2008, *A&A*, 478, 575–596
Maitra C., Carpano S., Haberl F., Vasilopoulos G., 2018, *Proc. Int. Astron. Union.*, 14, 242
Miura D., Kobayashi S. B., Yamaguchi H., 2024, *ApJ*, 968, 95
Shakura N., Sunyaev R., 1973, *A&A*, 24, 337
Walton D. J., Harrison F. A., Bachetti M., 2015, *ApJ*, 799, 122

Access:

M25-0350: *Turkish J.A&A* — Vol.6, Issue 3.