Süreksiz Kütle Aktarımı Yapan Nötron Yıldızlarının Soğuması

Program Kodu: 1002

Proje No: 117F509

Proje Yürütücüsü:

Prof. Dr. Tolga GÜVER

-

Bursiyer(ler):

Ece Gülfem DAĞDEVİREN

MAYIS 2019

İSTANBUL

TÜBİTAK

ÖNSÖZ

Proje kapsamında süreksiz kütle aktarımı yapan nötron yıldızı barındıran düşük kütleli X-ışın çiftlerinin sakin evrelerinde elde edilen X-ışın gözlemlerinin modellenmesinde rölativistik etkilerin hesaba katılmasının bulgulara etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, Bauböck vd. (2013, 2015) tarafından verilen rölativistik düzeltmeler, yaygın olarak kullanılan nötron yıldızı atmosfer modeli olan NSA (Zavlin 1996) modeline uygulanmış ve oluşturulan yeni nötron yıldızı atmosfer modeli özellikle hızlı döndüğü bilinen ya da düşünülen nötron yıldızlarının verilerine uygulanmıştır. Proje kapsamında toplamda 9 farklı kaynağın soğuma verilerine başarıyla uygulanan model klasik model ile benzer başarımla verileri modellemiş ancak bulunan sıcaklıklar %3 mertebesinde farklı çıkmıştır. Bu fark sistematik bir biçimde kendini göstermekte olsa da soğuma eğrilerini önemli ölçüde değiştirmekten uzaktır. Elde edilen soğuma eğrilerinin modellenmesi de tamamlandıktan sonra proje kapsamında yaptığımız çalışmaları en kısa sürede yayına hazırlama ve sonrasında da geliştirilen modeli yaygın olarak kullanılan XSPEC programının model kütüphanesine kazandırmayı hedeflemekteyiz.

İÇİNDEKİLER

Y

ÖNSÖZ.....i
TABLO ve ŞEKİL LİSTELERİ.....iv
ÖZET.....vii
ABSTRACT.....viii
1. GİRİŞ.....1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....3
2.1. SOĞUYAN KAYNAKLAR.....4
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....8
3.1 RNSA ile NSA modellerinin karşılaştırması.....9
3.2 Verileri Kullanılan Uydular ve Analiz Teknikleri.....11
3.3 Verileri Kullanılan Kaynaklar.....12
3.3.1 1RXS J180408.9-342058.....13
3.3.2 AQL X-1.....13
3.3.3 Cen X-4.....15
3.3.4 XTE J1701−462.....16
3.3.5 KS 1731-260.....17
3.3.6 EXO 0748−676.....18
3.3.7 MXB 1659-298.....19
3.3.8 Swift J174805.3-244637.....20
3.3.9 MAXI J0556−332.....21
4. BULGULAR.....22
4.1. 1RXS J180408.9-342058.....22
4.2 AQL X-1.....24
4.3. Cen X-4.....32
4.4 EXO 0748−676.....35
4.5. KS 1731-260.....41
4.6. XTE J1701−462.....45
4.7. Swift J174805.3-244637.....51
4.8. MAXI J0556−332.....54
4.9. MXB 1659-298.....57
5. SONUÇLAR.....60

5.1. İNCELENEN NOTRON YILDIZLARININ KÜTLE VE YARIÇAPLARI ÜZERINE LİMİTLER.....62

Kaynaklar Listesi.....65

TABLO ve ŞEKİL LİSTELERİ

Tablo Listesi

Tablo 1. Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilen X-ışın model tayfları için kullanılan parametreler.....9
Tablo 2. 1RXS J180408.9-342058 için yapılan simültane fitlere ait sonuçlar.....24
Tablo 3. Aql X-1'in birinci patlaması için yapılan simültane fitlere ait sonuçlar.....31
Tablo 4. Aql X-1'in ikinci patlaması için yapılan simültane fitlere ait sonuçlar.....32
Tablo 5 Cen X-4'a ait tayfsal parametreler.....35
Tablo 6. EXO 0748–676'e ait tayfsal parametreler.....40
Tablo 7. KS 1731-260'a ait tayfsal parametreler.....44
Tablo 8 XTE J1701–462'ye ait tayfsal parametreler.....51
Tablo 9. Swift J174805.3-244637'a ait tayfsal parametreler.....53
Tablo 10. MAXI J0556−332'ye ait tayfsal parametreler.....57
Tablo 11. MAXI J0556−332'ye ait tayfsal parametreler.....59

Şekil Listesi

Şekil 2. NSA ve RNSA modellerinin akının bir oranı olarak enerji üzerinden bir karşılaştırılması. Panelde bulunan soldaki grafikte NSA modeli ve 50 hz için RNSA modeli kullanılmış olup; sağ taraftaki grafikte ise 550 hz'lik modele ait veriler kullanılmıştır. Dönmenin etkisi belirgin olarak görülmektedir.....10
Şekil 1. NSA ve RNSA modellerinin akı değerlerinin karşılaştırılması. Sağdaki panelde, yüksek dönme frekanslarına doğru geçildiğinde rölativistik etkinin oluşturduğu fark belirgin bir biçimde görülebiliyor.....10
Şekil 3. 1RXS J180408.9-342058'e ait MAXI verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi. Kaynağın patlama sonrası, sakin evreye geçtiği andan itibaren elde edilmiş olan XMM ve Chandra gözlemleri kullanılmıştır.....13
Şekil 4. Aql X-1'nın 2001 ve 2010'da gözlenen patlamalarına ait RXTE/ASM (mor) ve MAXI (mavi) verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrileri. Kaynağın sakin evreye geçtiği andan itibaren elde edilmiş olan XMM-Newton ve Chandra gözlemleri kullanılmıştır. 14
Şekil 5. Cen X-4'e ait RXTE/ASM (mor) ve MAXI (mavi) verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi.....15
Şekil 6. XTE J1701-462'ye ait **RXTE/ASM** (mor) verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi. Kaynağın sakin evreye geçtiği andan itibaren elde edilmiş olan XMM ve Chandra gözlemleri kullanılmıştır.....16
Şekil 7. KS 1731-260'a ait **RXTE/ASM (mor)** verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi. Kaynağın patlama sonrasında elde edilmiş olan gözlemleri dikkate alınmıştır.....17
Şekil 8. EXO 0748–676'a ait **RXTE/ASM (mor) ve MAXI (mavi)** verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi.....18
Şekil 9. MXB 1659-297'ye ait **RXTE/ASM (mor) ve MAXI (mavi)** verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrileri eğrisi. Kaynak sakin evreye geçtikten sonra alınan gözlemlerden faydalanılmıştır.....19
Şekil 10. Swift J174805.3-244637 ait **RXTE/ASM (mor)** verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi.....20
Şekil 11. MAXI J0556−332'e ait **RXTE/ASM (mor) ve MAXI (mavi)** verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi.....21
Şekil 12. 1RXS J180408.9-342058'den patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile

gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir.....23
Şekil 13. 1RXS J180408.9-342058'e ait soğuma eğrisi. Üst panel akı; alt panel ise keV biriminden sıcaklığı göstermektedir. X-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.....24
Şekil 14. Aql X-1'dan birinci patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir. 25
Şekil 15. Aql X-1'dan ikinci patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir. 26
Şekil 16. Aql X-1'dan birinci patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir. 27
Şekil 17. Aql X-1'dan ikinci patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile birlikte en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir. 28
Şekil 18. Aql X-1'dan ikinci patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile birlikte en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir. 29
Şekil 19. Aql X-1'dan ikinci patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile birlikte en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir. 30
Şekil 20. Aql X-1'e ait soğuma eğrisi. Üst paneller akı, alt paneller ise sıcaklığı göstermektedir.....30
Şekil 21. Cen X-4 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol kolondaki grafikler NSA, sağ kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.....33
Şekil 22. Cen X-4 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol kolondaki grafikler NSA, sağ kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.....34
Şekil 23. Cen X-4' e ait ışık eğrisi. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. X-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.....34
Şekil 24. EXO 0748–676 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütün grafikler NSA, sağ kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.....36
Şekil 25. EXO 0748–676 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütün grafikler NSA, sağ kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.....37
Şekil 26. EXO 0748–676 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütün grafikler NSA, sağ kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.....38

Şekil 27. EXO 0748–676 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütün grafikler NSA, sağ kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.....39
Şekil 28. EXO 0748–676'e ait ışık eğrisi. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. x-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.....40
Şekil 29. KS 1731-260 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Birinci kolondaki grafikler NSA, ikinci kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.....42
Şekil 30. KS 1731-260 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Birinci kolondaki grafikler NSA, ikinci kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.....43
Şekil 31. KS 1731-260 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Birinci kolondaki grafikler NSA, ikinci kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.....44
Şekil 32. KS 1731-260'e ait ışık eğrisi. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. x-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.....44
Şekil 33. XTE J1701–462 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütun NSA, sağ sütun ise RNSA modeline ait sonuçları göstermektedir.....46
Şekil 34. XTE J1701–462 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütun NSA, sağ sütun ise RNSA modeline ait sonuçları göstermektedir.....47
Şekil 35. XTE J1701–462 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütun NSA, sağ sütun ise RNSA modeline ait sonuçları göstermektedir.....48
Şekil 36. XTE J1701–462 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütun NSA, sağ sütun ise RNSA modeline ait sonuçları göstermektedir.....49
Şekil 37. XTE J1701–462 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütun NSA, sağ sütun ise RNSA modeline ait sonuçları göstermektedir.....50
Şekil 38. XTE J1701–462'e ait ışık eğrisi. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. X-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.....50
Şekil 39. Swift J174805.3-244637 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Birinci kolondaki grafikler NSA, ikinci kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.52
Şekil 40. Swift J174805.3-244637'e ait ışık eğrileri. Sol taraftaki ışık eğrisi verileri patlama öncesinde alınmışken; sağdaki eğrinin verileri patlama sonrasında alınmıştır. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. x-ekseni MJD cinsinden zamanı temsil etmektedir.....53
Şekil 41. MAXI J0556−332 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Birinci kolondaki grafikler NSA, ikinci kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.....55
Şekil 42. MAXI J0556−332 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Birinci kolondaki grafikler NSA, ikinci kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.....56
Şekil 43. MAXI J0556−332 'e ait ışık eğrisi. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. x-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.....57
Şekil 44. MXB 1659-298 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol kolonda NSA, sağ kolonda ise RNSA modeline ait sonuçlar verilmiştir.....58
Şekil 45. MXB 1659-298 'e ait ışık eğrisi. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. x-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.....59
Şekil 46. RNSA ve NSA $\chi 2$ verilerini karşılaştırması.....61
Şekil 47. Tayfsal analiz sonucu elde edilen RNSA ve NSA sıcaklıklarının karşılaştırması.....61
Şekil 48. RNSA ve NSA sıcaklık farklarının yüzde cinsinden dağılımı.....61
Şekil 49 MAXI J0556-332 için yarıçap (sol panel) ve kütleye (sağ panel) dair güvenirlik eğrileri.....63
Şekil 50 Aql X-1 için yarıçap (sol panel) ve kütleye (sağ panel) dair güvenirlik eğrileri.....64

TÜBİTAK

ÖZET

Süreksiz Kütle Aktarımı Yapan Nötron Yıldızlarının Soğuması

Süreksiz düşük kütleli X-ışın çiftlerinin kütle aktarımının çok düşük seviyelerde olduğu sıralardaki ışınımı asıl olarak kütle aktarımının yoğun olduğu sırada yüzeyi ısınan nötron yıldızının soğumasından ileri gelmektedir. Bu ışınım özellikle son yıllarda X-ışın teleskopları ile gözlenmiş, ve bu sayede, nötron yıldızlarının kabuk katmanlarının soğuma özellikleri dolayısıyla da fiziksel yapıları hakkında önemli bulgulara ulaşılmıştır. Ancak günümüzde bu ışınımı modellemede kullanılan tüm atmosfer modelleri nötron yıldızlarının rölativistik anlamda dönmediği varsayımı altında geliştirilmiştir. Bu durum ise, bu nötron yıldızlarının bazılarının yüksek dönme frekansları ile bir çelişki içindedir. Projemiz kapsamında yapılan çalışmalar ile, yüzey ışınımının modellenmesinde dönme kaynaklı ek rölativistik etkilerin de hesaba katıldığı yeni bir model ilk kez olarak ve sistematik bir biçimde süreksiz X-ışın çiftlerine uygulanmıştır. Böylece dönmenin nötron yıldızlarının soğuması ile ilgili bildiklerimize olan etkisi, ilgili rölativisttik etkilerin hesaba katılması ile ilk defa olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda toplamda 9 farklı düşük kütleli X-ışın çiftindeki nötron yıldızlarının soğuma verilerine uygulanan model, klasik model ile aynı başarımla verileri açıklamakta ise de %3 kadar farklı bir sıcaklık değeri vermektedir. Bu değişim sistematik gibi görünmekte ise de kaynakların soğuma eğrilerini önemli ölçüde etkilemekten uzaktır. Yapılan çalışmaların ve elde edilen bulguların yayına dönüştürülme çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışmaların yayınlanması ile birlikte modelimizi XSPEC programının model kütüphanesine eklenmesi içinde gerekli çalışmaları yapmayı planlamaktayız.

Anahtar Kelimeler: nötron yıldızları, yüzey ışınımı, X-ışınları

ABSTRACT

Cooling of Transiently Accreting Neutron Stars

The radiation from transient low mass X-ray binaries in quiescence is mainly due to the cooling of the surface of the neutron star being heated during outbursts. This radiation has been observed with X-ray telescopes especially in recent years, and thus, important findings about the physical properties of the crust layers of neutron stars have been reached based on their cooling properties. To date, however, all the atmosphere models used in modeling this radiation have been developed under the assumption that neutron stars do not rotate in a relativistic sense. This is in contradiction with the high rotational frequencies of some of these neutron stars. With the studies carried out within the scope of our project, a new model, which takes into account the additional relativistic effects of rotation in modeling of surface radiation, has been applied for the first time and systematically to transient X-ray binaries. Thus, the effect of rotation on the cooling of neutron stars is examined for the first time, taking into account the relevant relativistic effects. As a result of the studies performed, the model applied to the cooling data of the neutron stars from 9 different low mass X-ray binaries, explains the data with the same statistical performance as the classic model, but gives a different temperature value that is different up to 3%. Although this change appears to be systematic, it does not significantly affect the cooling curves of resources. We our continuing our studies to finalize a paper on the findings we obtained. With the publication of these studies, we plan to carry out the necessary studies to include our model in the model library of the XSPEC program.

Keywords: neutron stars, surface emisssion, X-rays

1. GİRİŞ

Nötron yıldızlarının ısısal evrimleri üzerine yapılan çalışmalar bu cisimlerin içyapılarının özellikle de üst katmanlarının anlaşılmasında büyük önem arz ederler. Bu çalışmalar genel olarak iki farklı şekilde yapılabilir. Birinci yolda, farklı yaşlarda olduğu bilinen izole nötron yıldızlarının sıcaklıkları ölçülür ve bu cisimlerin iç yapılarının aynı olduğu varsayımı ile uzun dönemli (ilk oluştuklarından beri) soğumalarının anlaşılması üzerine çalışılır. İkinci yolda ise zaman zaman kütle aktarımı yapan nötron yıldızlarında bu kütle aktarımı sırasında yüzeyin hemen altında oluşan ısının yayılması yani bu nötron yıldızlarının kabuklarının soğuması takip edilir. Böylece nötron yıldızlarının en derin tabakaları değilse de üst tabakalarının ısıyı nasıl ilettiği ve dolayısıyla bu katmanlardaki maddenin doğası çalışılabilmektedir (Wijnands vd. 2017) Bu yolun bir avantajı aynı bir nötron yıldızının soğumasının yıllar mertebesinde zaman aralıklarında tespit edilebilir şekilde gözlenebilmesidir. İkinci yolun en iyi uygulanabileceği sistemler, Düşük Kütleli X-Işın Çifti (DKXÇ) adı verilen ve baş yıldızı nötron yıldızı olan sistemlerdir. Bu sistemler, Güneş'ten düşük bir kütleye sahip ($< 1M_{\odot}$) bir bileşen yıldız içerirler. Böylece anakolda kalma süresi uzun olan düşük kütleli bileşen, baş yıldıza çok uzun süreler sürekli ya da süreksiz olarak kütle aktarabilir. Uzun süren kütle aktarımı ve sistemlerin yaşlı olmaları sebebiyle, DKXÇ'lerde bulunan nötron yıldızları genel olarak düşük manyetik alan şiddetlerine ($B \sim 10^{8-9}$ G) sahiptirler.

Birçok DKXÇ'de kütle aktarımı sürekli ya da her zaman yüksek oranlarda olmaz. Aksine, çoğu sistem süreksiz X-ışın kaynağıdır ve sadece düzensiz ani patlamalar (outburst) olarak gözlenen zamanlarda madde transferi aktif olarak gerçekleşir. Sakin evreler ise yıllar hatta on yıllar mertebesinde olabilir ve bu durumda ya çok çok düşük oranlarda yığılma gözlenir ya da çoğu durumda hiç gözlenemez. Patlamanın olduğu evrede sistemlerde yüksek madde yığılması olur. Böylesi patlamalar haftalardan aylara kadar parlak sürebilirken (sıradan X-ışın süreksiz kaynakları), bazı sistemler ise yıllar hatta on yıllar mertebesinde parlaklıklarını koruyabilirler (yarı kalıcı süreksiz X-ışın kaynakları). Sakin evreleri sırasında geçici X-ışın kaynakları çok sönüktür ve sadece çok hassas X-ışın teleskopları tarafından gözlemleri yapılabilir. Bu anlamda yapılmış en erken çalışmalar bize en yakın ve en parlak olan sakin sistemler üzerine olmuştur (Aql X-1, Cen X-4, v.b.) (Catuneanu vd. 2013; Heinke vd., 2014; Bogdanov vd., 2016; Asai vd. 1996a,b). Sonrasında yeni nesil X-ışın teleskopları olan XMM-Newton, Chandra gibi uydu teleskopların fırlatılması ile sakin evredeki sistemler üzerine yapılan çalışmalar daha olgun bir hale gelmiştir. Bu teleskoplarla üzerine yoğunlaşılan ilk kaynaklar, Einsten, EXOSAT ve ROSAT (Campana vd, 1998a) gibi teleskopların üzerinde hali hazırda çalışmış olduğu kaynaklar olmuştur. Ancak sonrasında bu

teleskopların gözlem programlarına daha az çalışılmış sistemler ve yeni keşfedilmiş sistemler de eklenerek çalışmalar genişletilmiştir.

En genel anlamda sakin evrede bulunan nötron yıldızı barındıran DKXÇ'lerin X-ışın tayfları, ısısal (< 1 keV) ve ısısal olmayan (> 3 keV) olmak üzere iki bileşenli bir model ile ifade edilebilirler ve bu aralıkta parlaklıkları $L_q < 10^{33\text{-}34}$ erg/s (0.5-10 keV) mertebesindedir. Yumuşak bileşen genellikle nötron yıldızının yüzey ışınımının bir göstergesi olarak kabul edilir ve yığılan maddeden dolayı ısınmış sıcak nötron yıldızından yayılan soğuma salma kaynaklıdır. Bu bileşenin varlığının nedeni alternatif olarak nötron yıldızı üzerine düşen az miktarda kütle aktarımı da olabilir (Wijnands vd. 2017). Isısal olmayan bileşenin ise korona veya benzeri bulut içinde yaşanan ters Compton süreçleri ile elde edilen enerji dağılımını temsil ettiği düşünülse de doğası henüz belirsizliğini korumaktadır (Campana 1998a, Wijnands vd. 2014). Sert bileşenin varlığı az miktarda da olsa devam eden kütle aktarımının bir göstergesi de olabilir. Bazı sistemlerde tamamen yumuşak bileşen (Rutledge 2011b, Tomsick 2004) hâkimken bazılarında tamamen ısısal olmayan bileşen (Campana 2002a, Wijnands 2005a, Degenaar 2012a) hâkim olabilir.

Özellikle son yıllarda süreksiz DKXÇ'lerdeki nötron yıldızlarının soğuması üzerine yapılan çalışmalar, nötron yıldızlarının soğuma özelliklerinin ve hatta kütle ve yarıçaplarının belirlenmesine dair önemli ipuçları sunmuştur. Bütün bu çalışmalar yapılırken literatürde çok uzun bir süredir kullanılmakta olan Nötron Yıldızı Atmosfer modeli NSA (Zavlin vd. 1996) ve bu modelin çeşitli türevleri kullanılmıştır. Bu model manyetik alanı ihmal edilebilecek kadar düşük olan ve atmosferlerinde tamamen iyonize Hidrojen barındıran ve rölativistik anlamda yavaş dönen nötron yıldızları için tanımlanmıştır. Ancak bu sistemlerde, uzun süren kütle aktarımı sonucunda yapılan açısal momentum transferi nötron yıldızlarının normal evrimlerinden çok daha yüksek hızlarda, birkaç yüz Hz frekanslarında dönmelerine sebep olmuştur. Bu kadar yüksek frekanslarda dönme, dönmeyen bir cisim varsayımı ile oluşturulmuş olan Schwarzschild metriğinde öngörülemeyen bazı rölativistik etkilerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Projemizin amacı bu etkilerin bazılarını Bauböck vd.'lerinde (2013, 2015) verildiği şekli ile hesaba katan yeni bir nötron yıldızı atmosfer modelini literatüre kazandırmak ve bu modeli süreksiz kütle aktarımı yapan DKXÇ'lerden soğuması belirgin şekilde gözlenenlere uygulayarak rölativistik etkilerin hesaba katılmasının sonuçlarda yaratabileceği değişiklikleri incelemektir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Süreksiz olarak kütle aktarımı yapan sistemlerde patlamalar, bileşen yıldızdan kütle transferi başladığı zaman ya da yığılma diskinde viskozite artıp iç bölgelere doğru madde akımı başladığı zaman oluşurlar. Bu şekilde iç bölgelere doğru madde transferi başlayınca da kaybedilen kütle çekimsel potansiyel enerjinin bir kısmı ısı enerjisine dönüşerek yayınlanır. Böylece yığılma diskinin iç kısımlarında sıcaklık 10^7 K'lere kadar yükselebilir. Eğer nötron yıldızının çekirdek sıcaklığı bu değerden daha düşük ise, sıcaklığın bir kısmı iç kısımlara doğru iletilecektir. Ancak, iyon plazması ve elektronlardan oluşan ve nötron yıldızının zarfından kristalize olmuş plazmanın bulunduğu katı yüzeye kadar uzanan okyanusun altında bulunan maddenin sıkıştırılması, bu tabakaların yüzey sıcaklıklarının çok daha üzerinde olan sıcaklıklara hızlıca ısıtılmasına götüren elektron yakalama reaksiyonlarına neden olacaktır. Bu sebepten dolayı, çekimsel enerjinin yayımlanmasının yarattığı içe doğru olan ısı akışı durdurulacaktır (Fujimoto vd. 1989; Miralda-Escude vd. 1990). Eğer kabuğun daha derin tabakalarının içine doğru gelen sıcaklık gradyenti hala negatifse, termonükleer X-ışın patlamaları sırasında oluşan reaksiyonlar tarafından üretilen sıcaklığın bir kısmı hala içeri doğru akabilir ve nötron yıldızını ısıtabilecektir.

Nötron yıldızı çekirdeği büyük bir olasılıkla kabuğun derinlerinde oluşan reaksiyonlar tarafından daha baskın bir şekilde ısıtılmaktadır (Brown vd. 1998). Madde nötron yıldızı üzerine düştüğünde, altta, daha önce yığılmış olan madde daha derin katmanlara daha yüksek yoğunluklara sıkıştırılmıştır. Eninde sonunda başlangıçtaki katalize olmuş kabuk yığılma sonucu oluşmuş olan kabuk ile yer değiştirecektir. Bu durumda, başlangıçtaki kabuk bir noktadan sonra çekirdek ile kaynaşmış olacaktır (Sato 1979; Haensel ve Zdunik 1990b). Böylesi yığılma kaynaklı oluşmuş olan yeni kabuk, başlangıçtaki kabuktan tamamen farklı bir kompozisyona sahip olacaktır. Örneğin düşük atom numaralı elementler bakımından çok daha zengin olacaktır. Böylesi bir kabukta maddenin sıkıştırılması elektron yakalama, nötron salması ve pikonükleer reaksiyonlar gibi reaksiyonlara sebep olacaktır (Sato 1979; Haensel ve Zdunik, 1990a, 2003, 2008). Toplamda, bu reaksiyonlar yığılan her nükleon başına 1-2 MeV'luk enerji üretecektir. Üretilen bu enerjinin çoğu $10^{12\text{-}13}$ g/cm^3 'lük yoğunluğa sahip kabuk tabakalarında gerçekleşen pikonükleer reaksiyonlar tarafından üretilir. Bu sürece "derin kabuksal ısıtma" modeli adı verilir (Brown vd. 1998). Bu katmanlar bu reaksiyonlar tarafından ısıtılacak ve üretilen enerji yavaşça nötron yıldızı çekirdeğine doğru iletilecektir.

Brown vd. (1998) tarafından gösterildiği üzere bu şekilde çekirdeğin ısısı 10^4 yıllık bir zaman ölçeğinde artmaktadır (Colpi vd. 2001; Wijnands vd. 2013). Sakin evre sırasında yani belirgin miktarda kütle aktarımı yokken bu sıcaklık ısısal olarak salınacak nötron yıldızı

soğuyacaktır. Gözlenen sakin evre ışıma gücü ortalama zaman üzerinden nötron yıldızı üzerine yığılan madde oranına ve çekirdekte aktif olan nötrino salınım sürecine bağlıdır.

2.1. SOĞUYAN KAYNAKLAR

Sakin evrede gözlenen kaynaklarda çekirdek ve kabuk ısısal dengede olduğu varsayılır. Bu varsayım, sistem son patlamanın bitiminden uzunca bir süre sonra gözlemlenmiş ise mantıklıdır. Böylece kabukta üretilen ısının tamamen içe, çekirdeğe ve dışarıya, yüzeye doğru iletilmesine izin verilmiş olur. Kısa süreli patlamalar gösteren sıradan geçici kaynaklar için (haftalarca veya aylarca) patlama sırasında kabuktaki sıcaklığın nispeten minimal bir şekilde artması beklendiği için bu varsayım geçerliliğini korumaktadır. Patlama sona erdiğinde çekirdek ve kabuk yine dengede olacaktır. Bu kaynakların çok uzun süreli patlamaları kabuk içinde yeterli sıcaklığı yaratacak böylece çekirdek ile birlikte kuvvetli bir biçimde dengenin dışına çıkacaktır ve kabuğun soğuyup çekirdek ile ısısal dengeye erişmesi belki de yıllar alacaktır.

2001 yılında KS 1731-260, 12 yıl boyunca aktif kaldıktan sonra sakin evreye geçmiştir. Bu geçişten hemen sonra Wijnands vd. (2001) yılında Chandra X-Işın Gözlemevi'nden aldıkları veriler ışığında bu kaynağın sakin evre özelliklerini çalıştılar. Bu gözlemin sonuçları Rutledge vd. (2002b) makalelerinde ilk kabuksal soğuma modelleri olarak sunuldu ve böylece yığılma kaynaklı ısıtılmış nötron yıldızlarının kabuk soğuması üzerine yeni bir araştırma alanı doğmuş oldu. O zamandan bu yana KS 1731-260 kabuk soğuması yapmaya devam etmektedir (Wijnands vd. 2002c; Cackett vd. 2006b, 2010b; Merritt vd. 2016). Ayrıca, 2001 yılında MXB 1659-298, 2.5 yıl boyunca yığılma gösterdikten sonra sakin evreye geçiş yapmıştır. Bu kaynak için kabuk soğuması ayrıca patlama dönemi bittikten hemen sonra da gözlemlenmiştir ve kabuk soğuması hala devam etmektedir (Wijnands vd. 2003, 2004; Cackett vd. 2006b, 2008, 2013a).

Bu iki kaynağın soğumasının modellenmesi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. (Rutledge vd. 2002b; Shternin vd. 2007; Brown ve Cumming, 2009; Page ve Reddy, 2012, 2013; Turlione vd. 2015; Ootes vd. 2016). En dikkat çekici araştırmalardan birinde ise her iki kaynak da sakin evrede hızlıca soğuduğundan nötron yıldızı kabuklarında yüksek sıcaklık iletimi olması gerektiğine işaret etmektedir (Wijnands vd. 2017). Esasında, yığılan maddenin termonükleer yanmasıyla farklı elementlerin üretilmiş olabilme olasılığından dolayı bu şaşırtıcı bir sonuçtur. Bunun kabuğun içinde saf olmayan ve karmaşık bir yapıya neden olması sonucunda ise kabukta düşük ısısal iletime neden olması beklenmektedir (Schatz vd. 2001). Ancak daha sonra yapılan çalışmalar kimyasal ayrılmanın kabuğun kristalize olması sırasında gerçekleşebileceğini ortaya koymuştur. Bu da yüksek ısısal iletime neden olmaktadır (Horowitz vd. 2007). Bu nedenle, bu iki kaynak ve onlara dair çıkarılan yorumlar,

üzerine madde yığılan nötron yıldızı kabuğunun kristal oluşturduğuna ve sadece katı amorf olmadığına dair ilk gözlemsel kanıtları sunmuş olmuştur.

KS 1731-260 ve MXB 1659-298 dışında üç tane daha yarı kalıcı nötron yıldızı geçici kaynağının (XTE J1701-462, EXO 0748-676 ve MAXI J0556-332) da kabuk soğuma eğrileri elde edilmiştir. Sakin evre gözlemleri üzerine yoğunlaşılan XTE J1701-462 (Ağustos 2007'ye dek 1.6 yıl boyunca madde yığılması gerçekleştirmiştir) karmaşık bir davranış göstermiştir (Fridriksson vd. 2010, 2011). Birkaç ufak çaplı parlama haricinde kaynak en başta çok hızlı bir soğuma sergilemiştir ki bu durum, kabukta yüksek ısı iletimine işaret etmektedir. Sonrasında, kaynağın akısındaki düşüş durduğunda, kabuk ile çekirdeğin ısısal dengeye ulaştığı fikri öne sürüldü. Ancak sonrasında yapılan gözlemler, sıcaklığın daha da düştüğünü ortaya koymuştur (Wijnands vd. 2017). Böylesi bir düşüş bu kaynak için oluşturulmuş teorik soğuma eğrileri ile bir tutarlılık içerisindedir (Page ve Reddy 2012, 2013).

EXO 0748-676'ya dair gözlemler (24 yıl boyunca aktif kalıp 2008'de patlaması bitmiş, nispeten sönük bir kaynak) bu sistemdeki nötron yıldızının kabuğunun en başta görece hızlı soğuduğunu, fakat hemen sonrasında soğumanın yavaşladığını ve kabuğun hala yavaşça soğuma gerçekleştirdiğini göstermiştir (Degenaar vd. 2009, 2011a, 2014b). 24 yıldan bu yana patlama gözlenen böylesi bir kaynağın diğer kaynaklar gibi göze çarpan bir soğuma göstermemesi son derece dikkat çekicidir. Bu durumun çekirdek sıcaklığının çok yüksek oluşu ve çok büyük yığılma döngüsü sebebiyle olduğu öne sürülmektedir.

2012 yılında 1.5 yıl boyunca çok parlak bir patlama sergileyen MAXI J0556-32 sakin evreye geçiş yapmıştır. Bu parlak patlamanın özellikleri XTE J1701-462 ile oldukça benzerdir. Ancak MAXI J0556-332 sistemindeki nötron yıldızının sıcaklığı, XTE J1701-462 ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir (Homan vd. 2014). Yine de Schatz ve arkadaşları tarafından tesadüfen 2014 yılında keşfedilmiş olan bu kaynak, nötron yıldızlarının kabuğunda gerçekleştiği düşünülen çok yüksek verimli nötrino soğuma mekanizmasının test edilmesi için böylesi sıcak bir kabuğu olmasından dolayı önemli bir kaynaktır. Ancak şu ana dek böylesi bir mekanizma MAXI J0556-332 için gözlemlenebilmiş değildir (Deibel vd. 2015, Meisel vd. 2017).

MAXI J0556-332'deki nötron yıldızının kabuğunda böylesi sıcaklıkların elde edilebilmesi için bilinmeyen bir ısı kaynağı tarafından sığ derinliklerde çok miktarda enerji üretilmesi gerekir. Bu, standart nükleer reaksiyon süreçleri tarafından ("shallow heating (sığ ısıtma)" problemi) beklenenden çok daha yüksek değerlerdir. MAXI J0556-332 için gereken ısı miktarı diğerlerine nazaran onda biri daha fazladır.

Yaklaşık 200 günlük soğuma evresinde kaynak ek olarak küçük bir patlama daha göstermiştir (Homan vd. 2014) ancak bu patlamanın soğuma eğrisini etkileyebilecek hiçbir

katkısı olmamış ve sığ ısıtma mekanizması bu patlama sırasında herhangi bir şekilde etkinlik göstermemiştir (Deibel vd. 2015). Kaynak, beklenmeyen bir biçimde 2016 yılında bir patlama daha göstermiştir (Negoro vd. 2016). Bu yeni patlama parlak ve birkaç ay sürdüğünden, madde aktarımından kaynaklanan kabuğun yeniden ısınması için bulunmaz bir fırsat sağlamıştır. Bu patlamada kabuğun yeniden ısındığı bulundu ancak bu ısınmanın beklenenden çok düşük miktarlarda olduğu anlaşıldı.

Yukarıda tartışılan beş yarı kalıcı geçici X-ışın kaynağının kabuk soğuma eğrileri dışında HETE J1900-2455 için de sakin evre gözlemleri elde edilmiştir. Bu gözlemler 10 yıl boyunca patlama gösterdikten sonraki 180 günde elde edilmiştir (Degenaar vd. 2017). Ancak ne yazık ki erken zamandaki kabuk soğumasını temsil edebilecek gözlemler elde edilememiş ve sakin evreye ait sadece bir tane gözlem yapılabilmiştir. Bu nedenle bu kaynağın diğer kaynaklara benzer bir şekilde kabuksal soğuma gösterip göstermediği ile ilgili bir yargıya varmak maalesef mümkün değildir. Hali hazırda yarım yıl boyunca sakin evrede kalmış olan kaynaklar esas alındığında HETE J1900-2455'in çok daha soğuk bir nötron yıldızı barındırıyor olabileceği tahmin edilmektedir. Ancak kaynağın, patlama sırasında çok parlak olmaması sebebiyle bu kaynağın soğuk kabuk özellikleri diğer kaynakların kabukları için kullanılan parametreler ile açıklanabilir (Degenaar vd. 2017). Kaynak üzerine hala çalışmalar devam etmektedir.

Brown vd. 1998'de bazı sıradan geçici kaynakların alt gruplarının kabuk soğumalarının, patlama bitiminin ardından da gözlenebileceğini öne sürdü. Bu bağlamda en iyi adaylar göreli olarak daha soğuk çekirdeğe sahip olan sistemler (ve göreli olarak daha düşük temel sıcaklığa sahip olan sistemler) ve çok parlak patlamalar gösteren sistemler (yaklaşık olarak 10^{37} erg/s 'i aşan parlaklıklar) olabilir. Sadece göreli olarak kabuk sıcaklığında ufak artışlar olan sistemler için (daha kısa patlamalardan dolayı) başlangıç seviyesinin üstünde ve kabuk çekirdekle tekrar ısısal bir denge içerisinde olmadan önce, kısa zaman aralıklarında (haftalardan aylara) tespit edilebilir. **Bu** hipotez sıradan geçici kaynakların patlama sonrası gözlemleri yapılarak tespit edilebilir. Ayrıca bu sayede kabuğun ısınması ve soğuması da tespit edilebilir. Bu anlamda şu ana dek literatürde birçok kaynak üzerine çalışma yapılmıştır (Degenaar ve Wijnands 2011a; Altamirano vd. 2010; Bahramion vd. 2014; Waterhouse vd. 2016).

IGR J17480-2446 ve Swift J174805.3-244637 küresel bir küme olan Terzan 5'te konumlanmış iki sıradan geçici X-ışın kaynağıdır. Her iki kaynakta 2010 ve 2012 yıllarında nispeten yaklaşık olarak iki aylık parlak birer patlama (maksimumda ışıma gücü L= $5x10^{37-38}$ erg/s) göstermiştir (Altamirano vd. 2010, Bahramion vd. 2014). Chandra bu kümeyi önceden gözlemiş olduğu için bu kaynakların temel sakin evre seviyeleri zaten bilinmekteydi. IGR J17480-2446 göreli olarak daha soğuk temel seviyedeydi (Degenaar ve Wijnands, 2011a)

ancak Swift J174805.3-244637, IGR J17480-2446'ye nazaran çok daha sıcaktı. Yine de her iki kaynak içinde, iki aylık patlama kabuğun ısınması, çekirdek ile olan ısısal dengeden ayrılması ve sonrasında da kabuksal soğumanın gözlenebilmesi için yeterli olmuştur.

Neredeyse her yıl bir patlama gösteren ve sakin evrede alınan oldukça fazla gözlemi olan Aql X-1 soğuyan kabukla açıklanabilir (Waterhouse vd. 2016). Ancak kesinlikle kabuk soğumasının gözlendiğinin ve gözlenen parlaklıkların giderek azalmasına neden olan başka bir sürecin (örneğin düşük seviyeli yığılma) dâhil olmadığının doğrulanması gerekir. Bu sistemde gözlenen kabuk soğuması farklı patlama özelliklerinin kabuksal ısınma ve soğuma davranışının araştırılması açısından çok iyi bir hedef olduğu öne sürülmüştür (Ootes vd. 2017). Ek olarak 1RXS J180408.9-342058'e ait yapılan gözlemler kabuk soğumasına dair önemli kanıtlar sunmaktadır. Kaynak, 2015 yılında 4.5 ay boyunca yığılma gösterdikten sonra sakin evreye geçiş yapmıştır (Parikh vd. 2017b). Ayrıca bu kaynağın sakin evredeki evrimsel değişiminin anlaşılması için elbette daha fazla gözlemsel kanıt gerekmektedir. Eğer gerçekten Aql X-1 ve 1RXS J180408.9-342058'te kabuk soğuması gözlendiyse, gözlenen sıcaklıklarda kabuk sığ ısıtma ile ısınma göstermiş olabilir (Waterhouse vd. 2016, Parikh vd. 2017b, Ootes vd. 2017).

DKXÇ'lerdeki nötron yıldızlarının soğumaları üzerine yapılan bütün bu çalışmalar *ancak nötron yıldızı* yüzey ışınımlarının doğru şekilde modellenmesi ile yapılabilir. Nötron yıldızlarının kabukları ya da daha iç kısımları her ne sıcaklıkta olursa olsun, onlardan gözlemciye ulaşan ışınımı etkileyen bazı önemli faktörler bulunmaktadır. Bu faktörlerden birisi öncelikle nötron yıldızları kompakt cisimler olduğu için kütle çekimsel etkilerdir. Ama en az rölativistik etkiler kadar önemli olanı oluşan fotonların saçıldığı, soğurulduğu yani gözlemci tarafından enerji dağılımının gözlendiği son yüzey olan fotosferinin özellikleridir. Nötron yıldızlarının yüzey ışınımlarını belirleyen atmosferlerinin özellikleri ise pek çok faktör tarafından belirlenir (Özel 2013). Bu projede incelenen nötron yıldızları ile ilgili olarak çalışmalar daha çok sıfır manyetik alanlı (sistemler çok yaşlı oldukları için) tamamen iyonize Hidrojen ya da bazı durumlarda Helyum barındıran (nötron yıldızlarının sıcaklıkları iyonizasyon enerjisinden yüksek olduğu ve ağır elementler hızlıca çökeceği için) atmosfer modelleridir (Zavlin vd. 1996, Özel 2013). Kısaca NSA olarak adlandırılan Nötron yıldızı atmosfer modeli, günümüzde pek çok nötron yıldızından gözlenen ışınım modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Degenaar vd. 2009, 2011a, 2014b; Fridriksson vd. 2010, 2011; Wijnands vd. 2002c; Cackett vd. 2006b, 2010b; Merritt vd. 2016). Bu modeller nötron yıldızlarından gelen ışınımda her anlamda salt bir kara cisimden önemli anlamda sapmalar öngörmektedir. Örneğin böylesi bir atmosferde optik derinlik fotonun enerjisine bağlı olacağı için bir kara cisme kıyasla yüksek enerjili fotonlar daha alt tabakalardan gözlemciye

ulaşabilecek böylece gözlenen tayf bir kara cisimden daha geniş ve görece daha sert olacaktır (bkz. Zavlin vd. 1996).

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Yukarıda değinildiği gibi nötron yıldızlarının yüzey ışınımlarının doğru bir şekilde modellenebilmesi için, atmosferik kompozisyonun, manyetik alan şiddetinin ve benzeri bazı faktörlerin hesaba katılması gerekir. Ancak her durumda, yüzeyden çıkan bir foton çok uzaktaki bir gözlemciye ulaşırken aşması gereken bazı kütle çekimsel etkiler vardır. Bu etkilerden birisi en basit durumda Schwarzschild metriği kullanılması sonucu ortaya çıkan kütle çekimsel kırmızıya kaymadır (ör. Pechenick vd. 1983). Bu etki sadece nötron yıldızının tıkızlığına (kütle ve yarıçapına) bağlıdır günümüzde literatürde kullanılan tüm modellerde hesaba katılmaktadır. Model kullanılırken bir kütle ve yarıçap varsayımı yapılır ve buna göre oluşan kütle çekimsel kırmızıya kayma miktarı kadar atmosferden çıkan ışınımın tayfı kırmızıya kaydırılır. Bazı durumlarda bu etki literatürde nötron yıldızı kütle ve yarıçapına sınırlar koymak üzere de kullanılmıştır (bkz. Marino vd. 2017). Ancak tanımı gereği Schwarzschild metriği dönmeyen cisimler için tanımlıdır ve nötron yıldızları durumunda sadece düşük dönüş frekanslarında uygulanabilirdir. Dönen (açısal momentumu olan) cisimler için geçerli olan Kerr metriğinde ise cismin büyüklüğü nokta kaynak olarak kabul edilmiştir. Bu da elbette nötron yıldızları için kabul edilebilir bir durum değildir. Bu sebeple bu iki metrik arasında bir çözüm bulmak gereklidir (ör. Hartle ve Thorne 1968; Morsink vd. 2007; Bauböck vd. 2013). Günümüzde kabul edilen en başarılı çözüm Hartle-Thorne metriği ya da yaklaşımı olarak ifade edilen (Hartle ve Thorne 1968) metriğin kullanılmasıdır. Yüzeyden çıkan fotonlara dönmenin iki önemli ve temel etkisi vardır. *Bu etkiler* Doppler ivmelenmesi (Doppler boosting) ve uzay-zamanda oluşan alan sürüklenmesi *olarak sıralanabilir.* Bu durumda uzaktaki bir gözlemci için nötron yıldızından gelen fotonların enerji dağılımı şu parametrelere bağlıdır, nötron yıldızının kütlesi (M), yarıçapı (R), dönme frekansı (ν), dönme ekseninin kutbu ile gözlemcinin bakış doğrultusunun yaptığı açı (θ), dönme açısal momentumu (J), uzay-zamanın kuadropol momenti (Q) ve yüzey eksentirisitesi (e). Bu parametrelerin hepsi ayrı ayrı gözlenen ışınımın tayfsal ve zamansal özelliklerini değiştiriyor olsa da, dönme açısal momenti, yıldızın yüzey eliptisitesi (basıkığı) ve uzay-zaman kuadrupol momentini nötron yıldızının kütle ve yarıçapı cinsinden yazabilmek mümkündür (Ravenhall ve Pethick 1994; Lattimer ve Prakash 2001; Bauböck vd. 2013; Yagi ve Yunes 2013).

Bauböck vd. (2012; 2013; 2015) bu ek etkilerin özellikle nötron yıldızı yarıçap ölçümlerine olan etkisini hesaplamışlardır. Ancak bu hesabı yaparken kullandıkları yöntemlerde, nötron yıldızının yüzeyinden çıkan süreklilik ışınımı olarak karacisim ışınımını baz almışlardır. Projemiz başlamadan önce, İstanbul Üniversitesinden bir ekip, Arizona Üniversitesi ve Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE)'den bir ekip ile bu

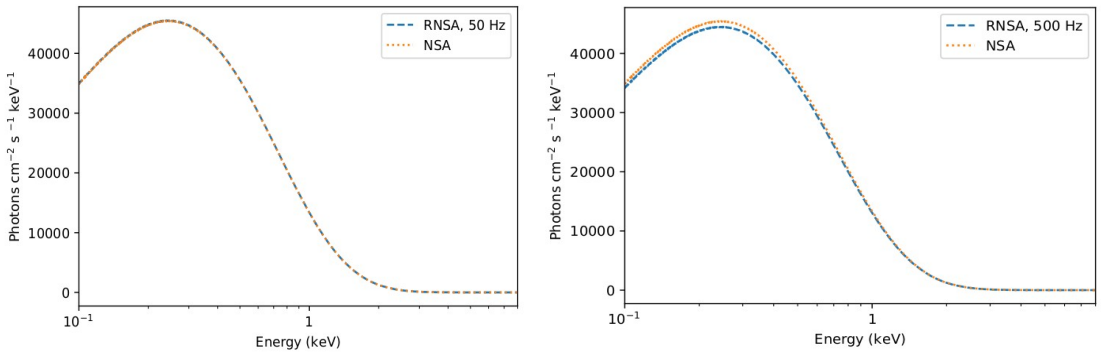
hesapları, nötron yıldızı atmosfer modellerine adapte edecek ve böylece yaygın olarak kullanılan X-ışın tayfsal analiz programları olan Xspec (Arnaud 1996) ve Sherpa (Freeman vd. 2001) programlarında kullanılabilecek bir araç geliştirilmiştir. Bu çalışmalar 2019 Ekim ayında, bir Avrupa Birliği projesi olan PHAROS (The multi-messenger physics and astrophysics of neutron stars) destekli bir ziyaret ile de desteklenmiştir. Projemiz kapsamında yapılan çalışmalar sonucu bu araç kullanılarak ilk, veri ile doğrudan karşılaştırılabilir model geliştirilmiştir. Bu model rapor metninde kısaca RNSA olarak isimlendirilmiştir. Model tüm rölativistik etkilerin doğrudan hesaplanması ve bunların sonuçlarının çeşitli parametrelere bağlı olarak tablo edilmesi ile çalışmaktadır. Bu kapsamda, M=1.1-1.9 $M_\odot$ (0.1 $M_\odot$'lik adımlar ile), R=8-21 km (birer kilometrelik adımlar ile), θ =10-90° (5'er derecelik adımlar ile) ve v=100-800 Hz (50 Hz'lik adımlar ile) olacak şekilde parametre uzayı taranmış ve her bir durumda yüzeyden çıkacak (yüzey ışınımının tayfı nasıl olursa olsun) fotonlar üzerindeki rölativistik etki hesaplanmıştır. Böylece model herhangi bir başka modelce üretilmiş tayfı almakta ve istenen parametrelere göre enerji dağılımında oluşacak farklılığı tablolardan itibaren hesaplayarak uzaktaki bir gözlemcinin nasıl bir tayf göreceğini hesaplamaktadır. Aşağıda önce bu yeni modelin orijinal NSA modeline kıyasla farkı verilmiş ardından her iki model gözlemsel verilere uygulanarak elde ettiğimiz sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.1 RNSA ile NSA modellerinin karşılaştırması

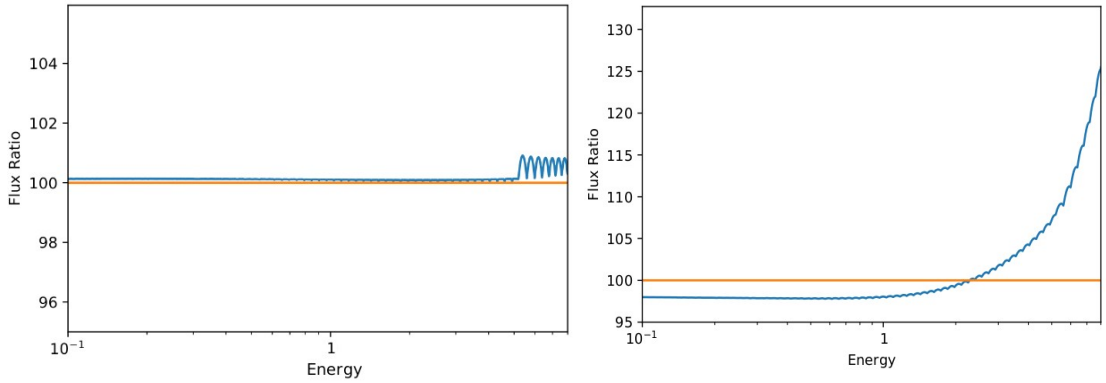
Projemiz kapsamında kullanacağımız ve ekibimizin geliştirdiği yeni modelin (RNSA) yüksek hızlarda tayflarda farklılıklar öngörürken, düşük dönme hızlarında Schwarzschild metriği kullanılarak oluşturulmuş olan NSA modeli ile öngörülene yakınsaması beklenir. Öncelikle bunu test amacıyla aynı tayfsal parametreler kullanılarak bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaya bir örnek Tablo 1'de verilen değerler için üretilen simülasyonlar ile yapılmış ve elde edilen sonuç tayflar ve tayfların farkı Şekil 1 ve 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilen X-ışın model tayfları için kullanılan parametreler.

Parametre	**Model**	
	NSA	rNSA
Yüzey Sıcaklığı (keV)	0.2	0.2
Kütle (M⊙)	1.4	1.4
Yarıçap (km)	10.0	10.0
Manyetik Alan Şiddeti (G)	0.0	0.0
Dönme Frekansı (Hz)	--	550
Bakış doğrultusu ile dönme ekseni arasındaki açı (°)	--	90
Normalizasyon ($1/D_{pc}^2$, $x10^{-8}$)	1.0	1.0



Şekil 1. NSA ve RNSA modellerinin akı değerlerinin karşılaştırılması. Sağdaki panelde, yüksek dönme frekanslarına doğru geçildiğinde rölativistik etkinin oluşturduğu fark belirgin bir biçimde görülebiliyor.



Şekil 2. NSA ve RNSA modellerinin akının bir oranı olarak enerji üzerinden bir karşılaştırılması. Panelde bulunan soldaki grafikte NSA modeli ve 50 hz için RNSA modeli kullanılmış olup; sağ taraftaki grafikte ise 550 hz'lik modele ait veriler kullanılmıştır. Dönmenin etkisi belirgin olarak görülmektedir.

Çalışmanın sonucu, beklendiği gibi 50 Hz gibi nötron yıldızları için Schwarzschild metriği ile ifade edilebilecek dönme hızlarında her iki modelinde %1 mertebesinde hassasiyette aynı sonuçları ürettiğini göstermektedir (bkz. Şekil 2 sol panel). Öte yandan yüksek dönme hızlarında RNSA modeli ile öngörülen X-ışın tayfı NSA modelinde önı inın da odel arad deki duyarlılığı azaldığı için hem de proje kapsamında incelediğimiz kaynaklar sönük ve yumuşak X-ışın tayflarına sahip oldukları için daha da zorlaşacaktır.

3.2 Verileri Kullanılan Uydular ve Analiz Teknikleri

Proje kapsamında günümüz X-ışın astronomisinin en önemli uydu gözlemevleri olarak uzun bir süredir görev yapmakta olan Chandra ve XMM-Newton gözlemevlerinden elde edilmiş veriler kullanılmıştır. Her bir kaynağın tüm gözlemleri zaten proje başvurumuz esnasında detaylı şekilde çıkarılmıştı. Bu çalışmanın ardından patlama evresi RXTE/ASM ya da MAXI ile gözlenebilmiş kaynakların uzun dönemli ışık eğrileri çıkarılmış ve patlama zamanları ve patlama sonrasında kaynaklar sakin evrelerine geçtikten sonra elde edilmiş Chandra ve/veya XMM-Newton gözlemleri listelenmiştir. Bu liste daha sonra uygun gözlemlerin seçiminde kullanılmıştır. Uygun gözlemleri seçerken; gözlemlerin patlamadan sonra kaynak sakin evrede iken yapılmış olmasına, soğumanın en azından bir miktar gözlenebilmiş olması için kaynakların Chandra ya da XMM-Newton uyduları ile birden fazla gözleminin yapılmış olmasına, gözlem sırasında kaynağın görüş alanında ve tespit edilmiş olmasına ve bazı durumlarda ise kaynağın satüre olmamış olmasına dikkat edilmiştir. Bu şekilde her bir kaynak için projemiz kapsamında kullanılan gözlemler Bulgular kısmında verilmiştir. Proje başvurumuz sırasında verdiğimiz geniş listedeki pek çok kaynak yukarıdaki şartlardan en azından birini (çoğunlukla sakin evrede birden fazla gözlemi olmama ya da ASM ya da MAXI ile belirgin bir patlama ve sonrası sakin evre aşaması görülememe) sağlamadığı için kullanılamamıştır.

Bazı durumlarda ufak farklılıklar gerekse de tüm veriler sistematik olarak ve benzer şekilde analiz edilmişlerdir. Bu sebeple burada veri analizi kısaca özetlenmiştir. XMM-Newton verilerini analiz etmek için uydunun standart SAS programının (versiyon xmmsas_20180620_1732-17.0.0) veri indirgeme programı uygulanmıştır. Her bir gözlem için, gözlem verileri el verdikçe EPIC pn ve EPIC MOS verileri **epproc** ve **emproc** programları kullanılarak ve Kasım 2018 tarihi itibariyle sunulan kalibrasyon verileri ile kalibre edilmiştir. XMM-Newton gözlemleri, bu uydunun yörüngesinin de bir sonucu olarak zaman zaman güneşten gelen yüksek enerjili parçacıklarca etkilenmektedir. Bu etkiler özellikle sakin evredeki DKXÇ'ler gibi sönük kaynakların tayflarında önemli etkiler yaratabildiği için bu zamanların gözlemlerden atılması gerekir. Bunun için SAS bünyesindeki **espfilt** programı kullanılmış ve her bir gözlem için Good Time Interval'lar oluşturulmuş ve kaynaklara ait X-ışın tayfları gözlemlerin geriye kalan kısımlarından elde edilmiştir. Her bir X-ışın tayfı için ayrıca aynı CCD çipi üzerinden olmak üzere boş bir bölgeden bir de arkaplan bölgesi seçilmiş ve spektrel analizde bu tayf kaynak tayfından çıkarılmıştır.

Benzer şekilde Chandra verileri de CIAO programının 4.9 sürümü ve CALDB 4.7.6 sürümü kullanılarak analiz edilmiştir. Her bir veri CIAO'nun bir paketi olarak dağıtılan **chandra_repro** ile indirgenmiş **specextract** ile de X-ışın tayfları çıkarılmıştır. XMM-

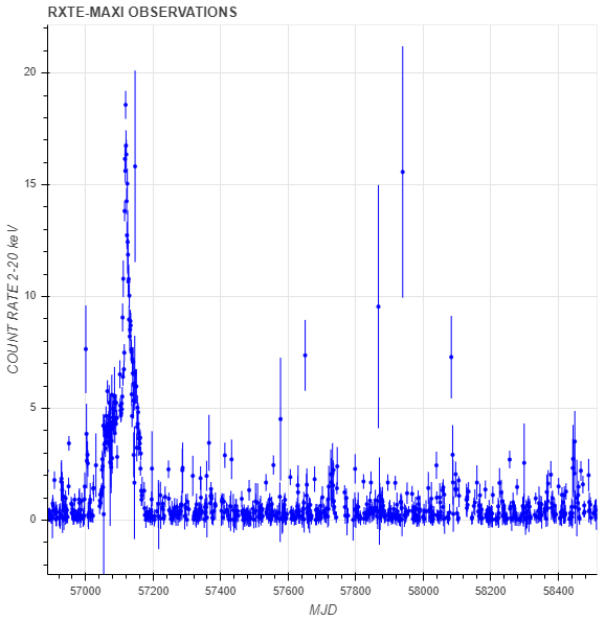
Newton'da olduğu gibi kaynak ile aynı çip üzerinde olmak üzere uygun bir bölgeden background spektrumu da bu aşamada çıkarılmıştır.

Oluşan tüm X-ışın tayfları her bir kanalda en az 25 sayım olacak şekilde gruplanmıştır. Gruplandırılan X-ışın tayfları **xspec** (Arnaud 1996) ve χ^2 **yöntemi** kullanılarak modellenmiştir. Her bir analizde yıldızlararası soğurma **xspec**'de tanımlı **phabs** modeli yıldızlararası ortamın metal bollukları kullanılarak (**wilm**, Wilms vd. 2000) hesaba katılmıştır. Analiz için öncelikle her bir patlama sonrasında elde edilmiş tüm tayflar simultane olarak fit edilmiştir. Bu modelleme sırasında hidrojen kolon yoğunluğu ve ısısal olmayan bileşeni temsilen kullanılan güç kanunu modelinin eğimi (foton indeksi) bütün tayflarda aynı olacak şekilde birbirine bağlanmıştır. Isısal olmayan bileşenin her bir tayftaki katkısı önceden belirlenemeyeceği için, bu modelin normalizasyonu serbest bırakılmış böylece, örneğin istatistiksel olarak hiçbir etkisinin olmadığı durumlarda bu modelin normalizasyonu çok küçük değerlere gidebilmiştir. Bu şekilde NSA modeli kapsamında sıcaklık ve akının patlama sonrası evrimi çıkarılabilmiştir. Bu aşamadan sonra belirlenmiş yıldızlararası ortam değeri ve ısısal olmayan bileşene ait değerler sabit alınarak aynı veriler tek tek NSA ve bir kez de RNSA modeli ile modellenmiştir. RNSA ile modelleme sırasında nötron yıldızının dönme ekseni ile bizim bakış doğrultumuz arasındaki açı her durumda 90 derece alınmış ve yıldızın dönme frekansı olarak ölçülebilmiş değere en yakın olacak şekilde tablo edilmiş değerler arasından seçilmiştir. Eğim açısının 90 derece alınmasının sebebi rölativistik etkilerin bu durumda en fazla olmasının beklenmesinden dolayıdır. Bu şekilde tekrar yapılan modelleme ile RNSA modelinin öngördüğü sıcaklıklar tayin edilmiştir.

3.3 Verileri Kullanılan Kaynaklar

Proje kapsamında yapılan çalışmalarda yukarıda değinilen şartları sağlayan kaynaklara ait X-ışın verileri analiz edilmiştir. Bu kaynaklara ait kısa bazı tanıtıcı bilgiler aşağıda sunulmuştur. Kullanılan tüm gözlemler, Bulgular başlığı altında her bir kaynak için ayrı ayrı tablolar halinde toplanmıştır.

3.3.1 1RXS J180408.9-342058



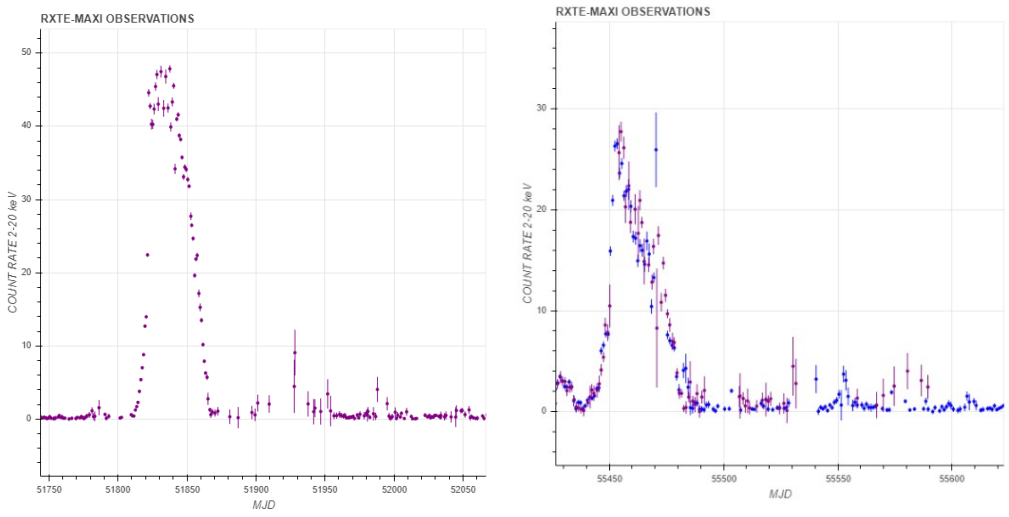
Şekil 3. 1RXS J180408.9-342058'e ait MAXI verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi. Kaynağın patlama sonrası, sakin evreye geçtiği andan itibaren elde edilmiş olan XMM ve Chandra gözlemleri kullanılmıştır.

1RXS J180408.9-342058 X-ışın kaynağı, ilk kez 2012 yılında INTEGRAL uydusunun bir Tip I termonükleer X-ışın patlaması keşfetmesi sonrasında nötron yıldızı (NY) düşük kütleli X-ışın kaynağı (DKXÇ) olarak tanımlandı (Chenevez vd. 2012). Chenevez vd. (2012) çalışmasında kaynağın uzaklığı Eddington ışıma gücü üst limit olarak varsayılarak 5.8 kpc olarak hesaplanmıştır. 22 Ocak 2015 tarihine dek kaynak sakin evrede kalmış sonrasında ise Swift'in BAT dedektörü ile yeni bir patlama tespit edilmiştir (Krimm vd. 2015a). Tespit edilen bu patlamada Tip I termonükleer X-ışın patlaması görülmemiş olup yavaş bir parlama gözlemlenmiştir. 3 Nisan 2015'te ise, baskın olan sert X-ışınlarının düşüşe geçtiği ve kaynağın çok daha yumuşak X-ışın bölgesinde (2-10 keV) parlaklığının arttığı tespit edilmiştir. Böylece, kaynağın tayfsal olarak daha yumuşak X-ışın bölgesine geçiş yaptığı fikri ortaya atılmıştır (Degenaar vd. 2015).

3.3.2 AQL X-1

Aql X-1, yılda en az bir kez düzenli olarak X-ışın ve optik bölgede patlama gösteren bir kaynaktır (Kaluzienski vd. 1977; Priedhorsky & Terrell 1984; Charles vd. 1980). Bu nedenden dolayı DKXÇ değişenlerini daha iyi modelleyebilerek X-ışın patlamalarının nasıl oluştuğunu anlamamız açısından iyi bir zemin sağlar.

Aql X-1, Tip I X-ışın patlamaları gösterir. Kompakt bileşen bir nötron yıldızıdır. Bileşen yıldızı ise K1IV tipi bir yıldızdır. 2016 yılında Waterhouse vd. yaptığı çalışmada Aql X-1'in sakin evrede yapılan gözlemlerinin ayrıca kabuk soğumasını da iyi bir şekilde açıklayabileceği durumu tartışılmıştır. Sisteme **dair** yapılan ilk gözlemler 1965 yılın dayanır (Friedman, Byram ve Chubb 1967) ve otarihten bu yana X-ışınlarında da bu sisteme dair birçok gözlem yapımıştır. Son 20 yılda Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE), Monitor of All-Sky X-ray Image (MAXI), ve Neil Gehrels Swift Observatory (Swift) sayesinde Aql X-1'in davranışına dair birçok gözlem yapılmış ve iyi bir veri seti elde edilmiştir. Kaynağın uzaklığı 5 kpc olarak kabul edilmekte olup, sergilediği süreksiz davranışın kökeni hala tartışma konusudur (Brown, Bildsten & Chang 2002; Rutledge vd. 2002a; Campana & Stella 2003; Cackett vd. 2011; Coti Zelati vd. 2014; Waterhouse vd. 2016). Kaynak şu ana dek hem kısa

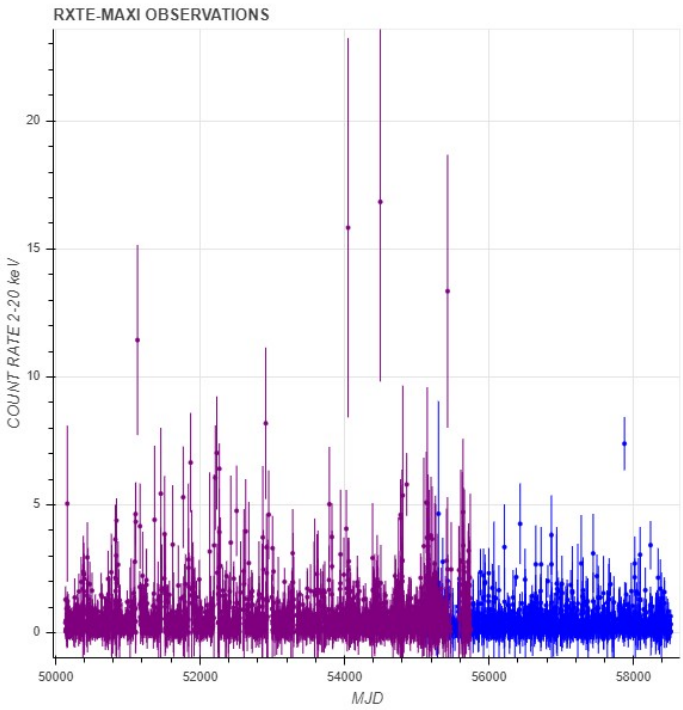


(<10^4 s) hem de uzun dönemli (aylar, yıllar) değişimler göstermiştir.

Aql X-1 üzerine çalışma yapmadan evvel diğer kaynaklarda rutin olarak yaptığımız üzere MAXI ve RXTE ışık eğrilerini elde ederek patlama gösterdiği zamanlar üzerinden sakin

evrede olduğu zamanları tespit ettik. 2001 yılı ve 2010 yılına ait olan patlamalardan sonraki sakin evreye ait olan XMM-Newton ve Chandra gözlemleri üzerinde çalışıldı (Cackett vd. 2011, Campana vd. 2014).

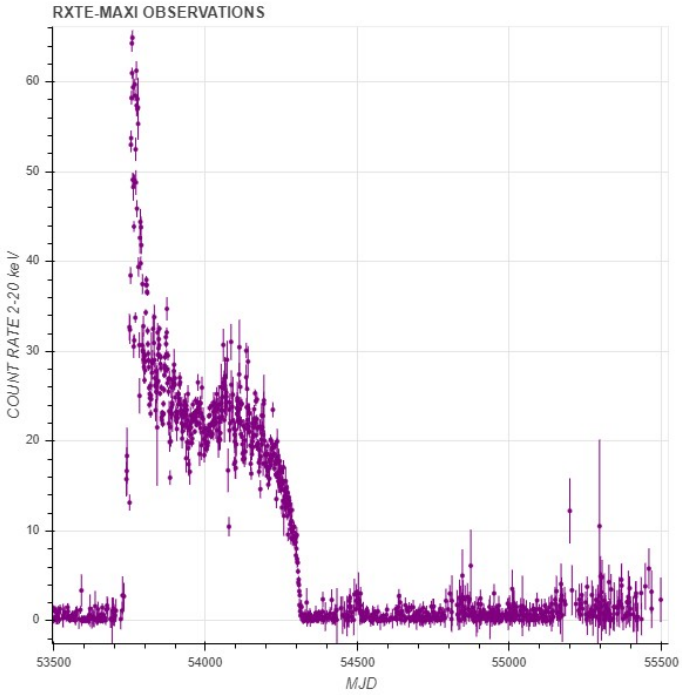
3.3.3 Cen X-4



Şekil 5. Cen X-4'e ait RXTE/ASM (mor) ve MAXI (mavi) verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi.

Cen X-4 şu ana kadar soğuması en iyi çalışılabilmiş süreksiz nötron yıldızlarından biridir ve birçok X-ışın gözlemevi tarafından gözlemlenmiştir. Cen X-4 bilinen en yakın sakin evre nötron yıldızı DKXÇ'lerinden biridir (D = 1.2 ± 0.3 kpc; Chevalier et al. 1989) ve on yıldan fazladır sakin evredeki X-ışın değişimi olduğu bilinmektedir (Campana et al. 1997). Bu evrede alınan tayfı hem ısısal hem de ısısal olmayan bileşen içerir.

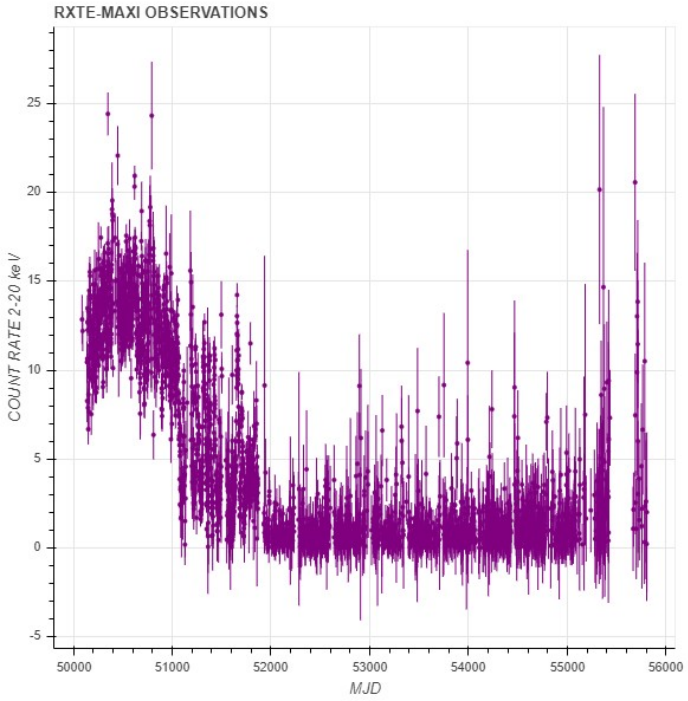
3.3.4 XTE J1701–462



Şekil 6. XTE J1701-462'ye ait RXTE/ASM (mor) verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi. Kaynağın sakin evreye geçtiği andan itibaren elde edilmiş olan XMM ve Chandra gözlemleri kullanılmıştır.

XTE J1701–462, Rossi X-Ray Timing Explorer (RXTE)'ın üzerinde bulunan the All-Sky Monitor (ASM; Levine et al. 1996) tarafından patlamaya geçtikten hemen sonra 18 Ocak 2006'da ilk kez görüntülendi. 1.6 yıllık uzun patlaması boyunca 1.5 L_{edd} parlaklığı ile galaksimizde gözlemlenen en parlak NY-DKXÇlerinden biri oldu. Kaynak 2007 yılı Ağustos ayında süreksiz evreye geçti. Kaynak NS-DKXÇnin gösterebileceği bütün tafsal değişimleri gösterdi. Kaynak patlaması boyunca ayrıca üç tane Tip I X-ışın patlaması da göstermiştir. Bu patlamalardan son iki tanesi fotosferik yarıçap genişlemesi de göstermiştir.

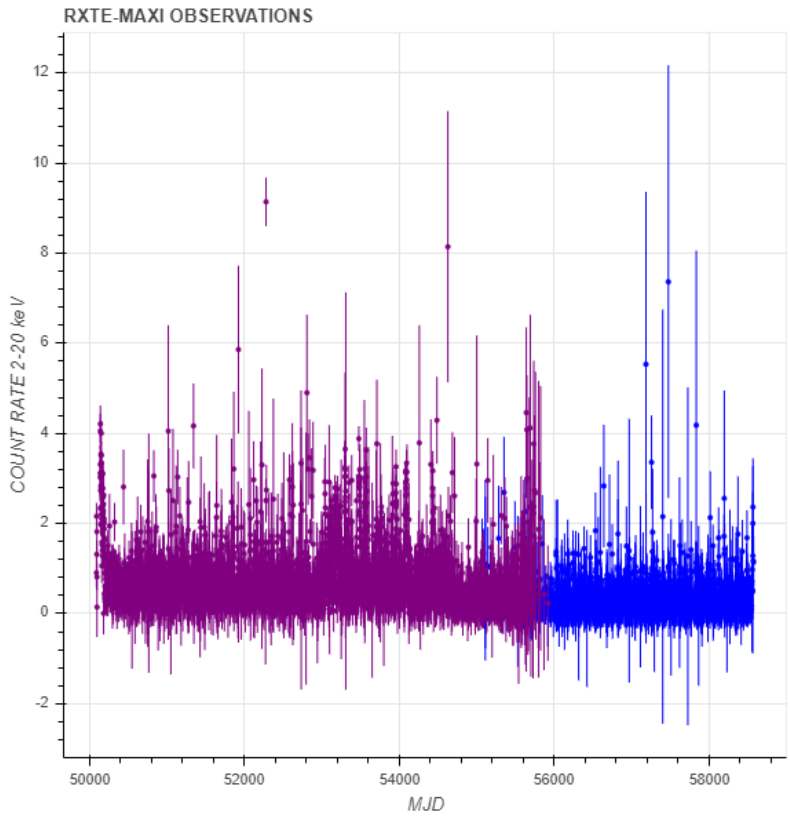
3.3.5 KS 1731-260



Şekil 7. KS 1731-260'a ait RXTE/ASM (mor) verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi. Kaynağın patlama sonrasında elde edilmiş olan gözlemleri dikkate alınmıştır.

KS 1731-260, kabuksal soğuma olduğunu bilinen dört nötron yıldızı değişkeninden biridir (Wijnands et al. 2001, 2002; Cackett et al. 2006). Kaynak 12.5 yıl patlama gösterdikten sonra 2001 yılında sakin evreye geçiş yapmıştır (Wijnands vd. 2001). Sonrasında hızlıca fark edildiği üzere böylesi uzun bir patlama kabuksal soğumanın gözlemlenmesi için çok iyi bir fırsat tanımaktaydı ve bunun üzerine Chandra ve XMM-Newton X-ışın gözlemevi vasıtasıyla gözlemlerinin yapılması için kampanya düzenlendi (Wijnands vd. 2001, 2002; Cackett vd. 2006). Kaynağın X-ışın akısı hızlıca düşüş göstermiştir ki bu, sakin evreye geçtiği ilk yıl içerisinde yaklaşık olarak 2.5 kat; takip eden ilk 1000 gün içerisinde ise yaklaşık olarak 5 kat oranında olmuştur.

3.3.6 EXO 0748–676



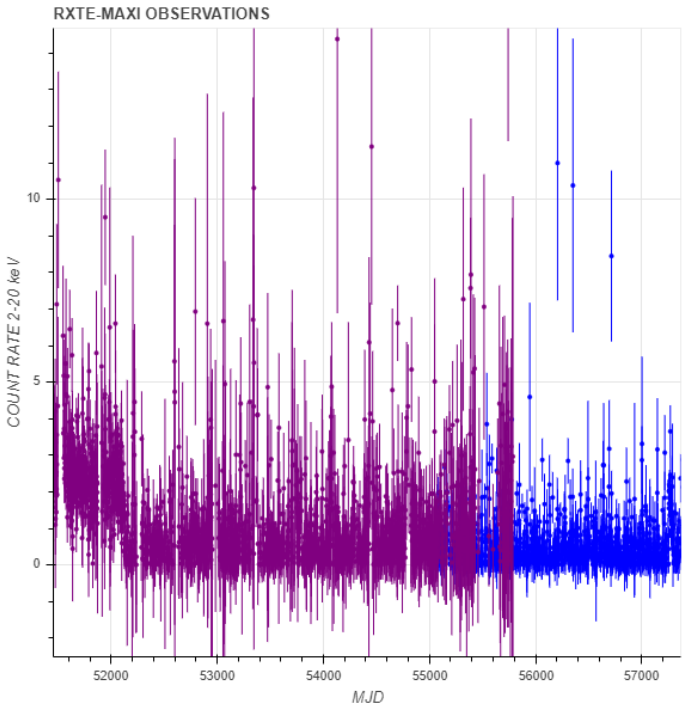
Şekil 8. EXO 0748–676'a ait RXTE/ASM (mor) ve MAXI (mavi) verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi.

EXO 0748–676, 1985 Şubat ayında EXOSAT ile keşfedildiğinden beri yoğun bir şekilde çalışılan bir DKXÇ'dir (Parmar et al. 1985). Gottwald vd. 1986 yılında tespit ettikleri Tip I X-ışın patlaması ile kaynakğın barındırdığı kompakt baş bileşenin nötron yıldızı olduğu anlaşıldı. Uzaklığı Helyum baskın fotosfer yaklaşımıyla 7.4 ± 0.9 kpc; Güneş kompozisyonu varsayımıyla ise 5.9 ± 0.9 kpc olarak hesaplandı. Parlama zamanı ve fotosferik yarıçap

genişlemesi gözlemlenen sistemde sadece Helyum yanması olduğu varsayılarak uzaklık 7.4 kpc olarak en iyi şekilde bulundu (Galloway vd. 2008). Yıllar içerisinde kaynağın X-ışın akısındaki değişimler kaynağın geçici X-ışın değişeni olarak tanımlanmasını sağladı.

Proje için EXO 0748-676'nın 2008 yılındaki patlamasından sonraki sakin evre gözlemleri kullanılmıştır.

3.3.7 MXB 1659-298

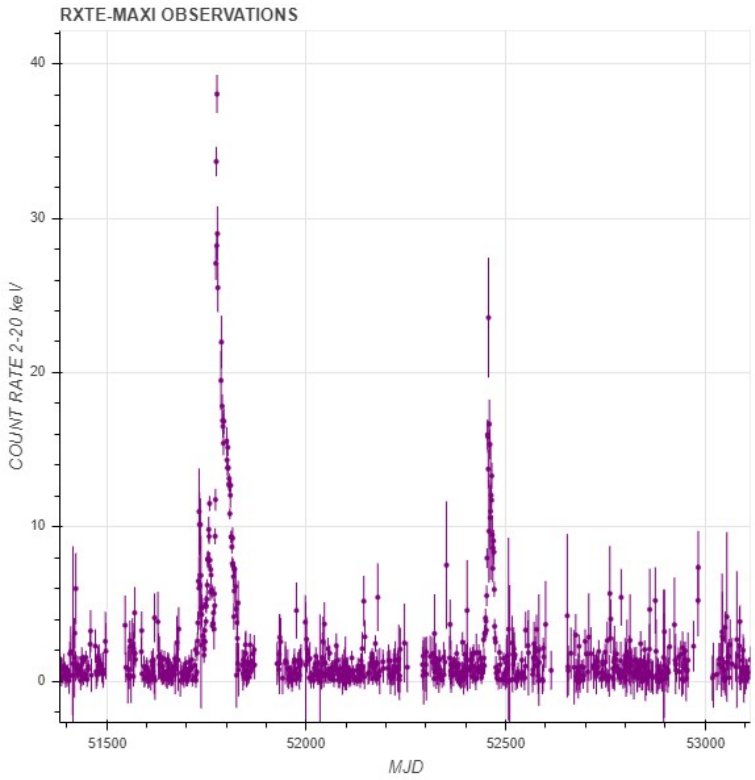


Şekil 9. MXB 1659-297'ye ait RXTE/ASM (mor) ve MAXI (mavi) verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrileri eğrisi. Kaynak sakin evreye geçtikten sonra alınan gözlemlerden faydalanılmıştır.

MXB 1659-29, Levin vd. tarafından 1976 yılının Ekim ayında keşfedilmiş bir geçici X-ışın kaynağıdır. Keşfedildiği sırada gösterdiği Tip X-ışın patlamalarından dolayı sistemde bulunan kompakt cismin bir nötron yıldızı olduğu sonucuna varılmıştır. Kaynağın ayrıca X-ışınlarında tutulmalar gösterdiği de sonradan gözlemlenmiştir. 1979 yılında kaynak tekrar gözlenmek istemiş ancak tesbit edilememiştir. 0.5-10 keV aralığında ROSAT teleskobu ile yapılan gözlemler ışığında kaynağın akısı 1991 ve 1992 yıllarında yaklaşık olarak 10^{-12} $erg^{-2}.s^{-2}$ olarak tespit edilmiştir (Verbunt 2001; Wijnands 2002). Yaklaşık olarak 21 yıl boyunca sakin evrede kalan kaynağın 1999 yılı Nisan ayında BeppoSAX X-ışın teleskobu ile bir patlama gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir (in 't Zand vd. 1999). Bu patlama ayrıca RXTE ASM, RXTE PCA ve XMM-Newton X-ışın teleskobu tarafından da etraflıca çalışılmıştır. Yaklaşık

olarak 2.5 yıl süren patlama sonrasında MXB 1659-29, 2001 yılında yeniden sakin evreye geçiş yaptı ve RXTE'nin PCA dedektörü tarafından alanda bir daha gözlemlenemedi. Kaynağın sakin evreye geçmesi ile birlikte kabuğun soğumaya başladığı düşünülerek birçok XMM-Newton ve Chandra gözlemi yapılmış ve soğumaya dair varsayımlar üzerinde durulmuştur (Wijnands et al. 2004; Wijnands 2004, 2005).

3.3.8 Swift J174805.3-244637

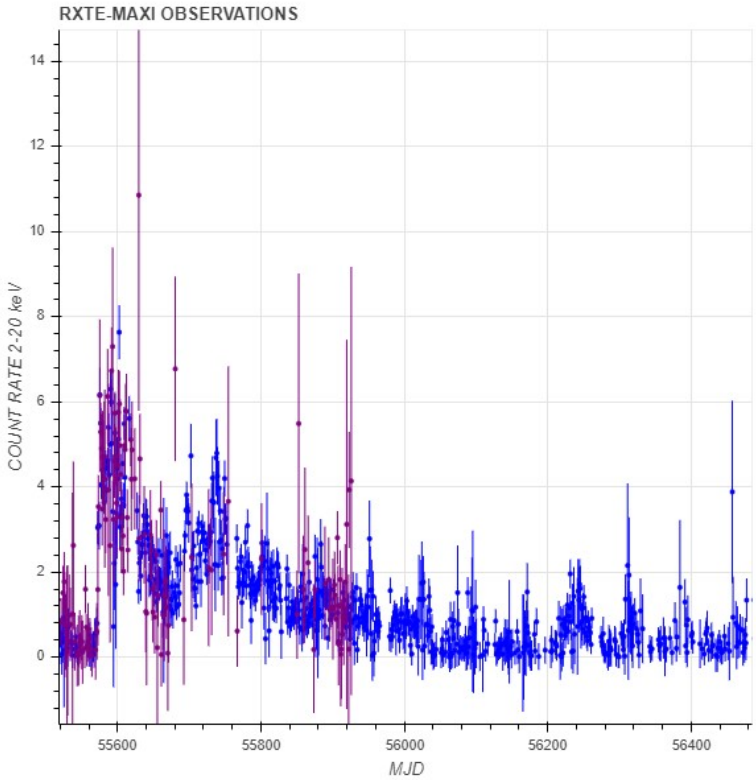


Şekil 10. Swift J174805.3-244637 ait RXTE/ASM (mor) verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi.

Terzan 5, Samanyolu'nda bulunan, 4.6-8.7 kpc ($N_H \simeq 10^{22}$ cm^{-2}; Heinke vd. 2006b; Bahramian vd. 2014) uzaklıkta bulunan ve oldukça soğurulmuş bir küresel kümedir. Bünyesinde büyük sayılarda birçoğu sakin evre nötron yıldızı DKXÇ olduğu düşünülen sönük X-ışın nokta kaynağı barındırmaktadır (Heinke vd. 2006b). Bu kaynaklardan birisi de 2012 yılında keşfedilen bir DKXÇ, geçici nötron yıldızı kaynağı olan Swift J174805.3-244637 oldu (Bahramian vd. 2014). Kaynağın patlaması ilk kez 2012 Temmuz ayında gözlemlenmiştir. Sonrasında ise 7-8 hafta kadar boyunca parlaklığını korumaya devam etmiştir. Bu sırada kaynağın parlaklığı yaklaşık olarak ~10^{36} erg/s mertebelerinde ölçülmüştür. Ayrıca bu sırada gözlenen bir termonükleer X-ışın patlaması sayesinde kaynağın uzaklığı 5.5 kpc (Degenaar vd. 2015) olarak tespit edilmiştir. 2003 ve 2012 yılları arasında ufak tefek ışık değişimleri gözlense de kaynak sakin evre akısını korumaya devam etti. 2012 yılında ise tekrar patlama

geçirmesi ve hemen sonrasında tekrar sakin evreye geçmesi, nötron yıldızlarının kabuk soğumalarının doğasını anlamamız açısından bu kaynağı eşsiz bir deney aracı yapmaktadır.

3.3.9 MAXI J0556−332



Şekil 11. MAXI J0556−332'e ait RXTE/ASM (mor) ve MAXI (mavi) verileri kullanılarak oluşturulmuş uzun dönemli ışık eğrisi.

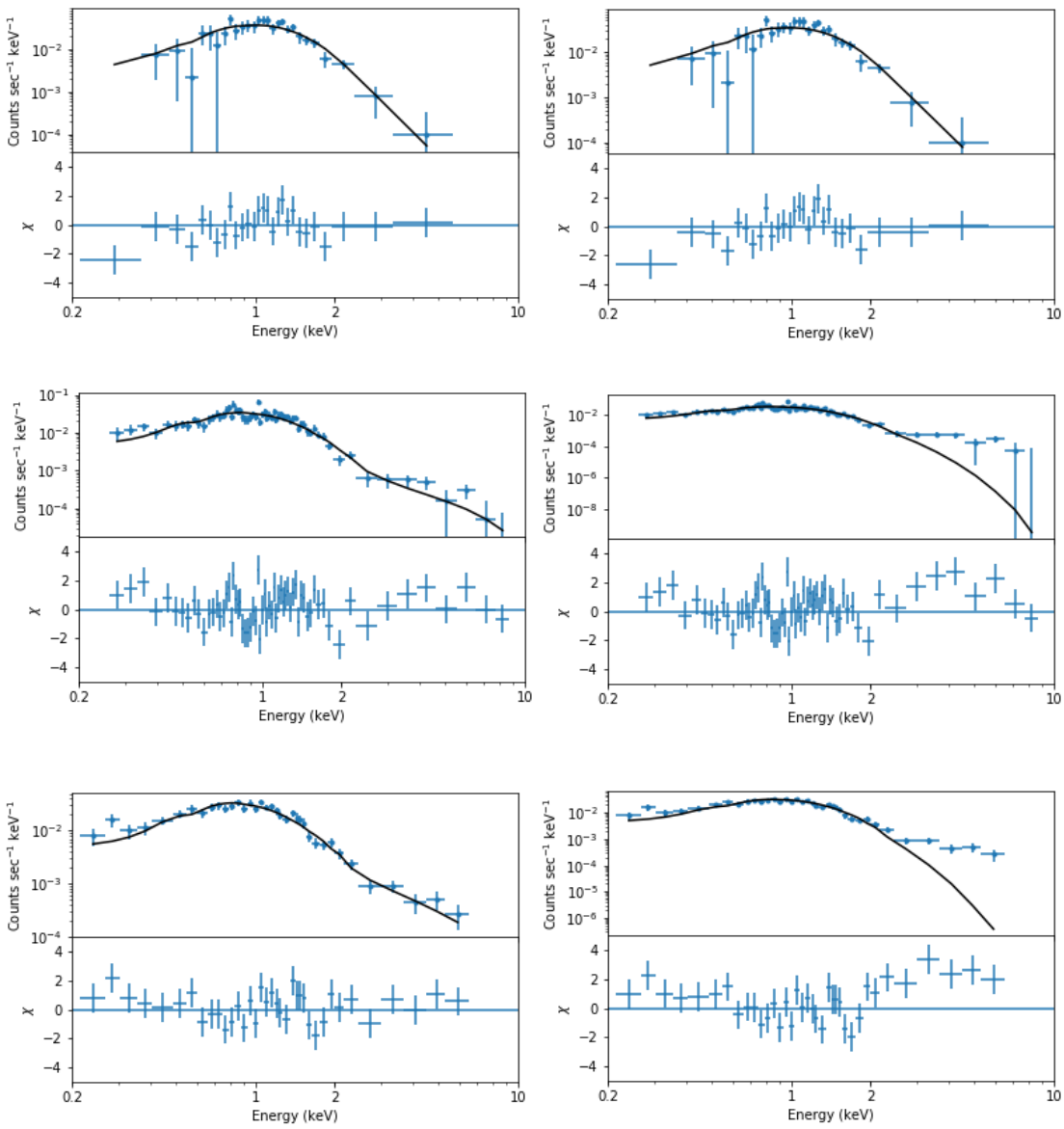
MAXI J0556−332, 2011 yılında keşfedilmiş bir geçici X-ışın nötron yıldızı içeren DKXÇ'dir. Keşfedildikten hemen sonra yaklaşık olarak 16 ay süren bir patlama sergilemiştir. Sonrasında 2012 yılında yaklaşık olarak 2 ay (Sugizaki vd. 2012) ve 2016 yılında da yaklaşık olarak 3 ay (Negoro vd. 2016) süren iki patlama daha gerçekleştirmiştir. Sugizaki vd. 2013 yılında yaptıkları çalışmalarında MAXI, Swift ve RXTE gözlemlerini kullanarak kaynağın 17 kpc; sonrasında da Homan vd. 2014 yılında hemen sonrasında Swift, Chandra ve XMM-Newton gözlemleri kullanarak yaptıkları çalışma ile kaynağın 45 kpc uzaklıkta olduğunu öne sürmüşlerdir. Ho vd. 2014 yılında yayınladıkları çalışmalarında birinci ve ikinci patlama sonrasındaki sakin evre üzerine çalışmış ve çok sıcak bir nötron yıldızı kabuğu olduğu sonucuna varmışlardır. Bundan yola çıkarak ise, ikinci patlamanın aslında nötron yıldızının kabuğunu pek de ısıtmamış olduğu varsayımını ortaya atmışlardır. Deibel vd. ise 2015 yılında yaptıkları çalışmalarında birinci patlama sonrasında büyük bir miktarda sığ ısıtma sürecinin olduğunu bulmuşlar ve bunun şimdiye dek bulunmuş gereken en büyük DKXÇ nötron yıldızı sıcaklığıdır.

4. BULGULAR

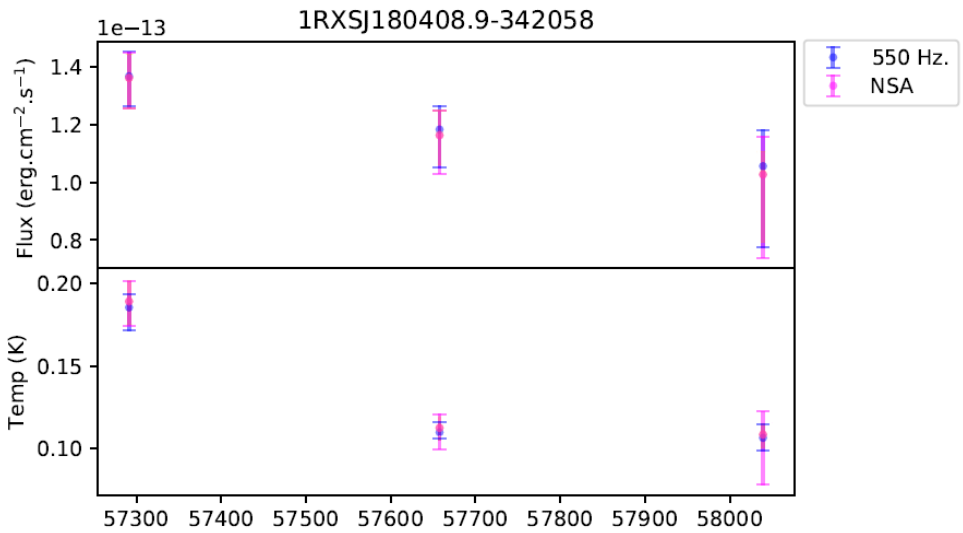
Aşağıda her bir kaynak için kullanılan gözlemler, elde edilen X-ışın tayfları ve veri ile en iyi uyum sağlayan NSA ve RNSA model parametreleri verilmiştir.

4.1. 1RXS J180408.9-342058

Kaynağın projemiz amaçlarına uygun az sayıda (üç adet) gözlemi bulunmaktadır. Bu gözlemler hem NSA hem de RNSA modeli ile modellenmiştir. Hidrojen kolon yoğunluğu ve foton indeksi değerleri Bölüm 3.2'de açıklandığı şekilde, sırasıyla N_H = 0.348x10^{22} cm^{-2} ve Γ=2.97 olarak bulunmuştur. NSA modelinin normalizasyonu, D, cismin parsek (pc) cinsinden uzaklığı olmak üzere, 2.97x10^{-8} olarak hesaplanmış ve analizde bu şekilde kullanılmıştır. Her bir gözlemde elde edilen X-ışın tayfları Şekil 12'de gösterilmiştir. Ayrıca elde edilen tayfsal parametreler Tablo 2'de verilmiştir. Son olarak Şekil 13'de ise elde edilen verilerden itibaren nötron yıldızının soğuma eğrisi gösterilmiştir. Modelleme sonucu elde edilen χ^2 / dof NSA ve RNSA modelleri için sırasıyla 1.208/120 ve 1.53/120'dir.



Şekil 12. 1RXS J180408.9-342058'den patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir.



Şekil 13. 1RXS J180408.9-342058'e ait soğuma eğrisi. Üst panel akı; alt panel ise keV biriminden sıcaklığı göstermektedir. X-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.

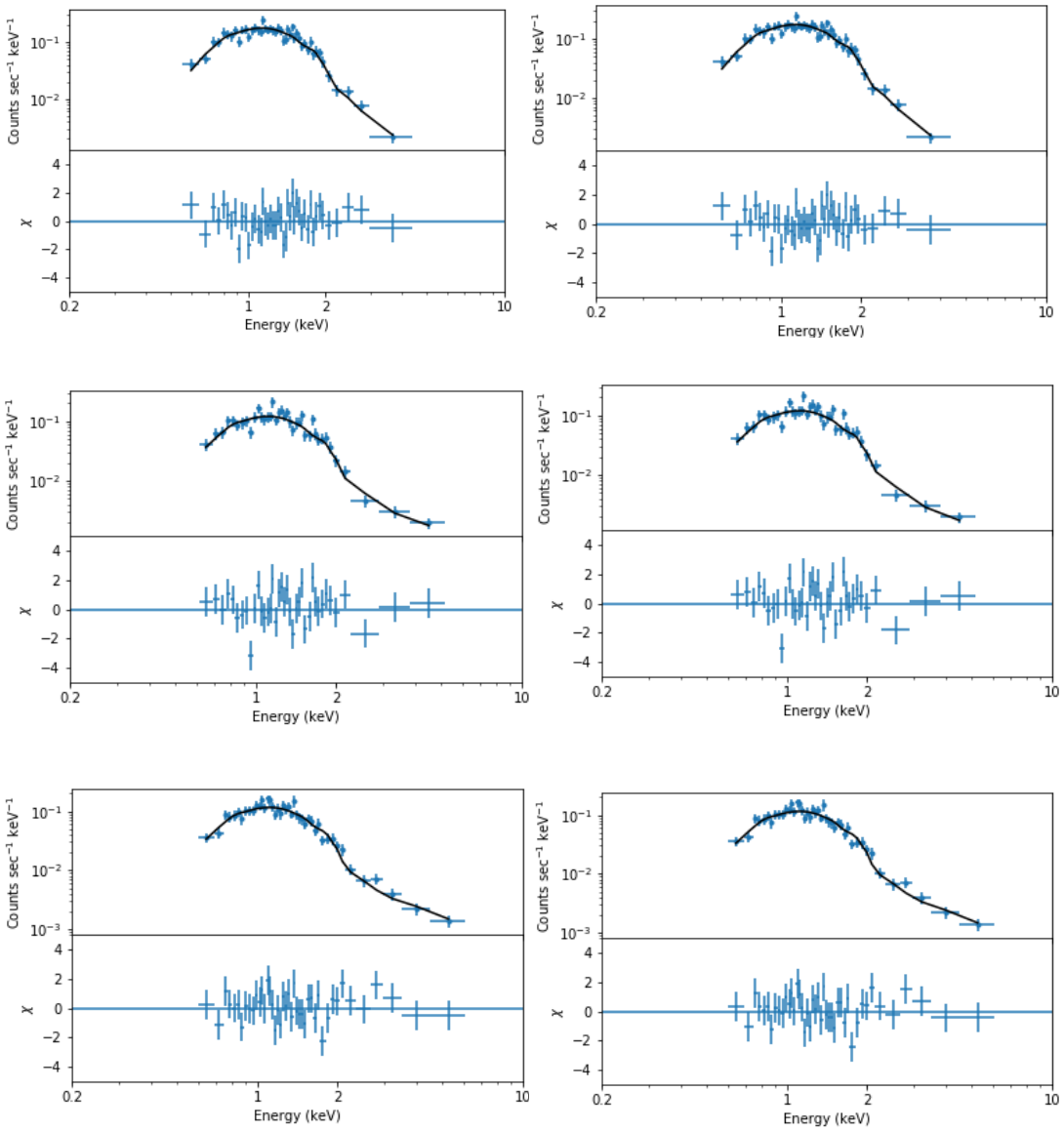
Tablo 2. 1RXS J180408.9-342058 için yapılan simültane fitlere ait sonuçlar.

Tarih (MJD)	Poz Süresi (ks)	kT (keV)	kT (keV)	$F_{x\ NSA}$ ($x10^{-13}$ erg/cm^2/s^{-1})	$F_{x\ RNSA}$ ($x10^{-13}$ erg/cm^2/s^{-1})	$norm_{PL}$ ($x10^{-6}$)
57291	32.7	0.19±0.01	0.19±0.03	1.36 ±0.09	1.36±0.09	1.6
57657	78.0	0.11±0.09	$0.11^{0.03/-0.05}$	$1.18^{0.09/-0.1}$	1.16±0.09	1.6
58039	81.7	$0.11^{0.01/-0.03}$	0.1±0.1	1.060.1/-02	1.020.1/-02	1.6

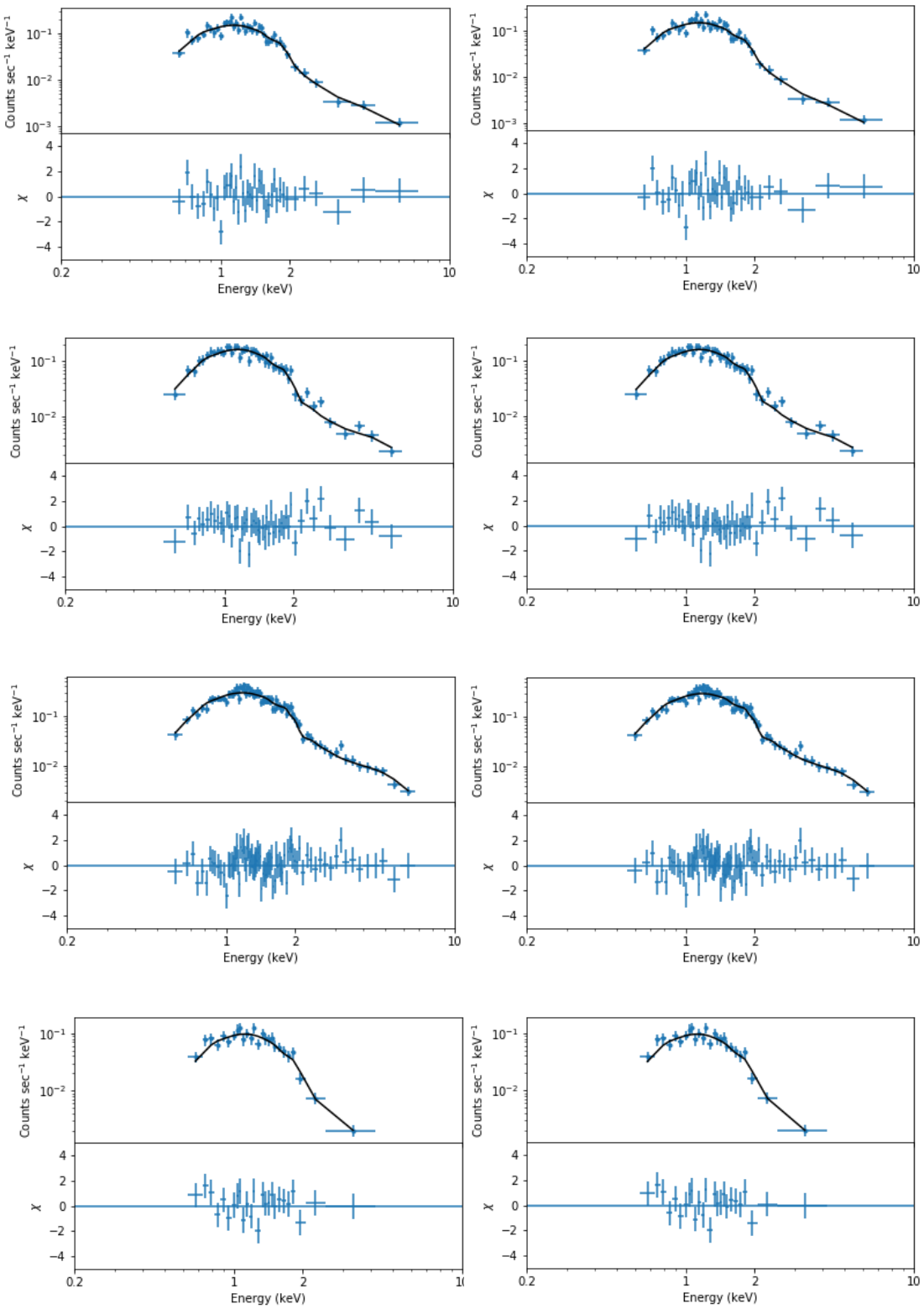
4.2 AQL X-1

Aql X-1 çok sık patlamalar yapmasıyla tanınan bir süreksiz X-ışın kaynağıdır. Sıklıkla patlamalar yapsa da patlamalar sonrasında sakin evrede yapılan gözlemler incelendiğinde projemiz amaçlarına uygun şekilde gözlenmiş elde edilmiş iki farklı patlaması olduğu görülmektedir. Bu gözlemler hem NSA hem de RNSA modeli ile modellenmiştir. Hidrojen kolon yoğunluğu ve foton indeksi değerleri Bölüm 3.2'de açıklandığı şekilde, sırasıyla N_H = $0.55x10^{22}$ cm^{-2} ve Γ=1.24 olarak bulunmuştur. NSA modelinin normalizasyonu, D, cismin parsek (pc) cinsinden uzaklığı olmak üzere, $4x10^{-8}$ olarak hesaplanmış ve analizde bu şekilde kullanılmıştır. Her bir gözlemde elde edilen X-ışın tayfları Şekil 14, Şekil 15, Şekil 16, Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19'da gösterilmiştir. Ayrıca elde edilen tayfsal parametreler Tablo 3'de NSA ve RNSA modelleri için verilmiştir. Son olarak Şekil 20'de elde edilen verilerden

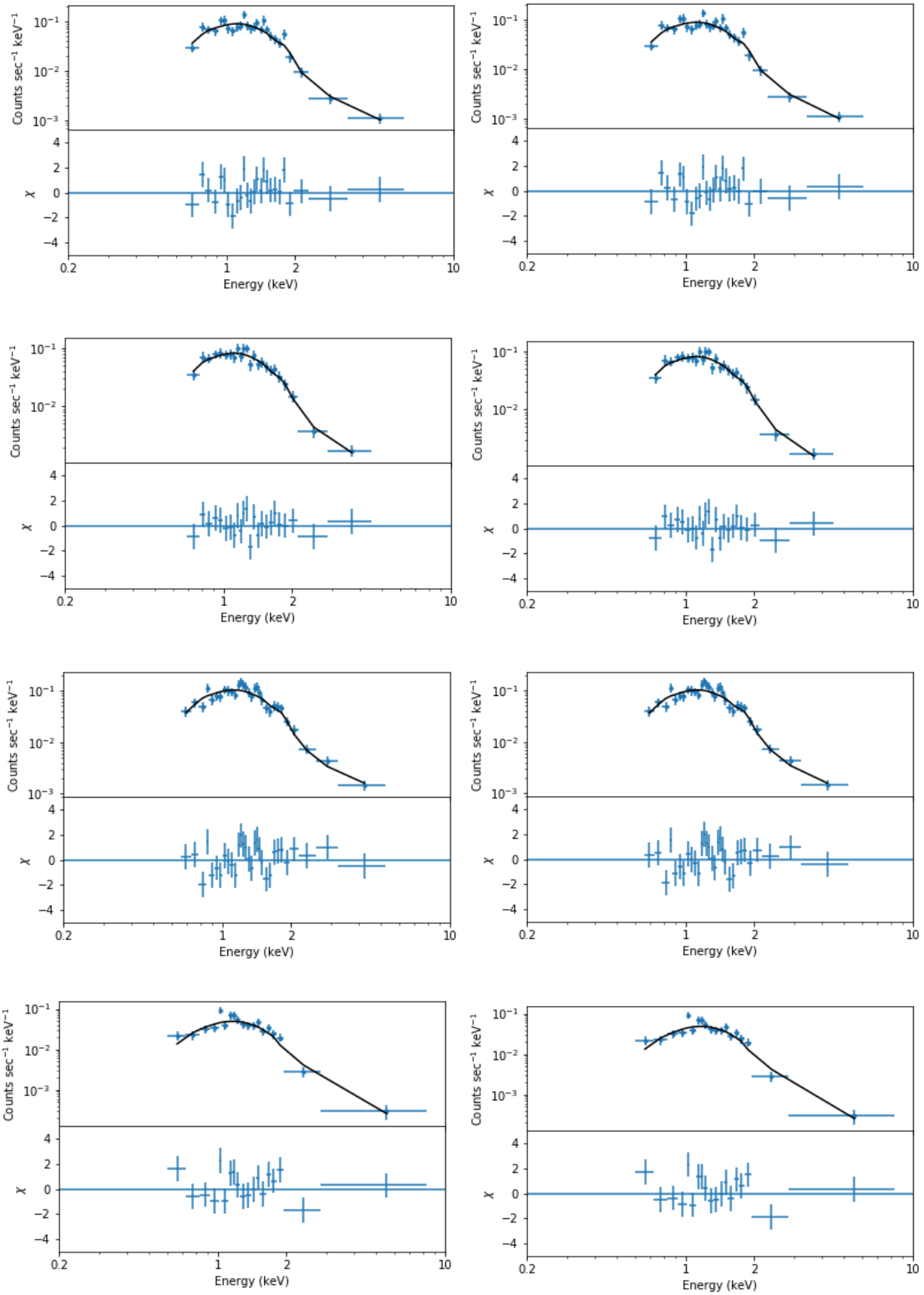
itibaren nötron yıldızının soğuma trendi gösterilmiştir. Modelleme sonucu elde edilen χ^2 / dof NSA ve RNSA modelleri için sırasıyla 0.996/473 ve 0.997/473'dür ve ikinci patlama için ise 0.88/401 ve 0.89/401'dir.



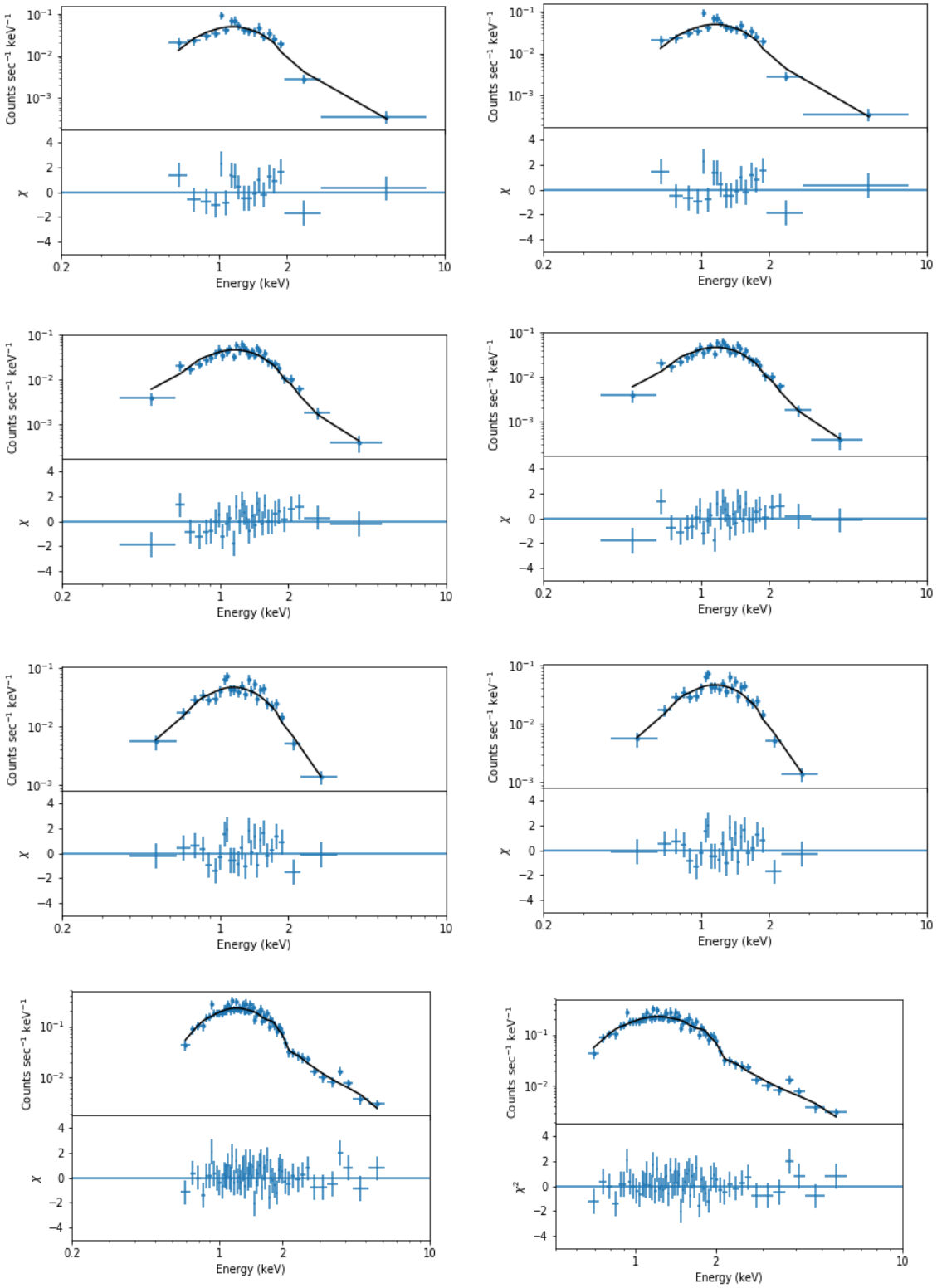
Şekil 14. Aql X-1'dan birinci patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir.



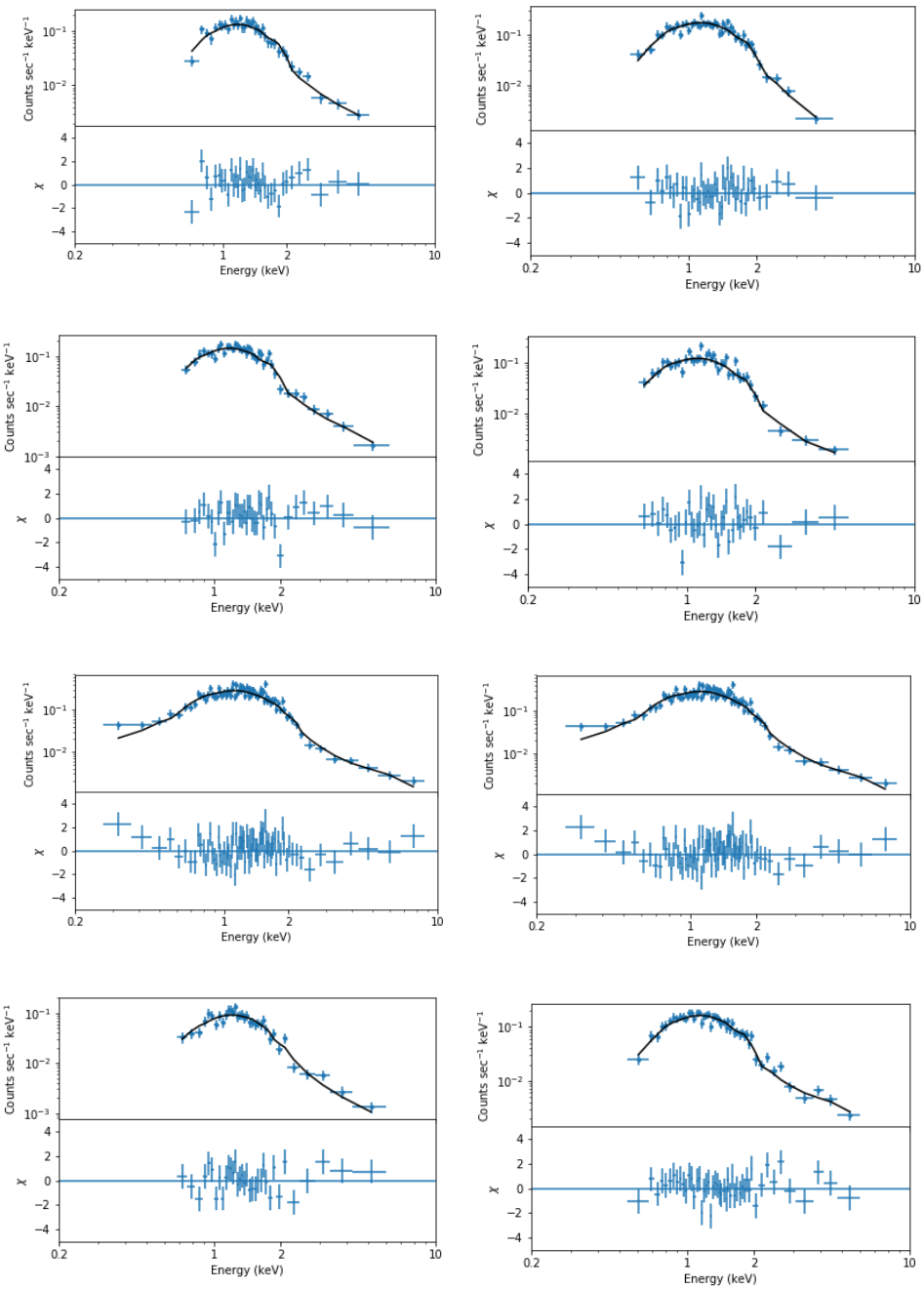
Şekil 15. Aql X-1'dan ikinci patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir.



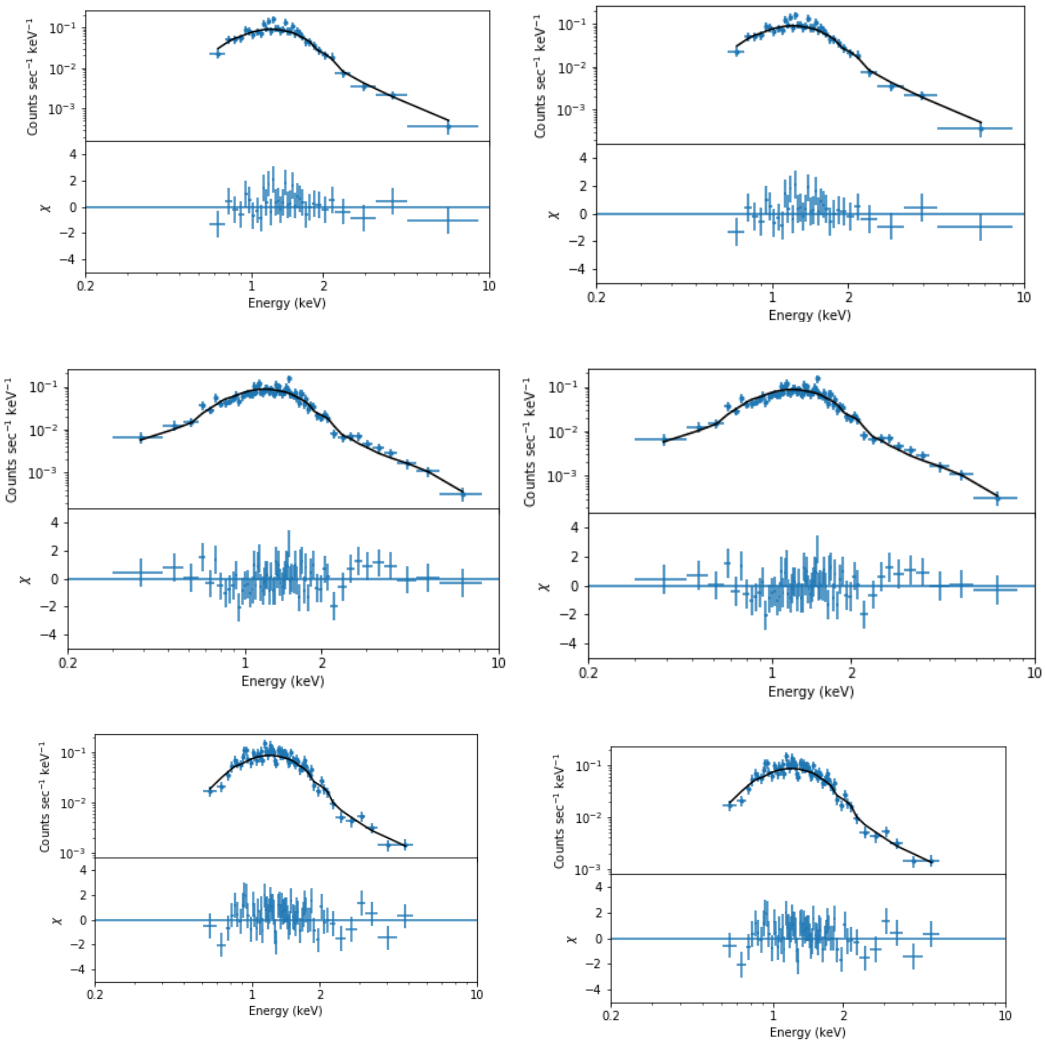
Şekil 16. Aql X-1'dan birinci patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir.



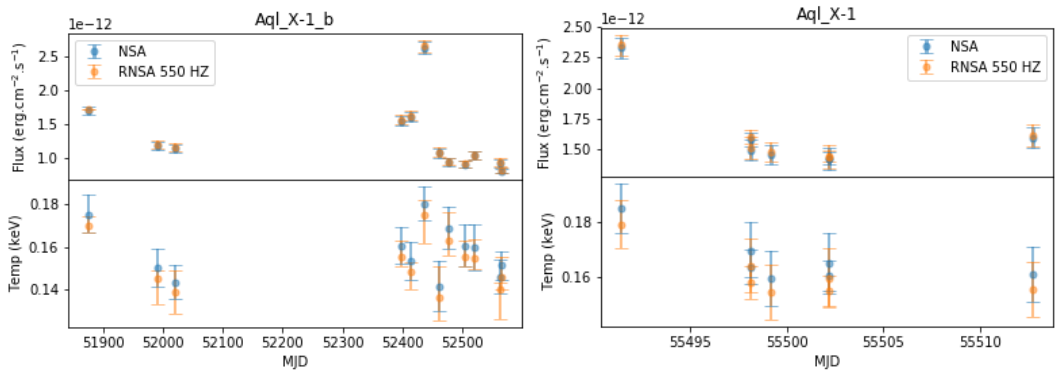
Şekil 17. Aql X-1'dan ikinci patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile birlikte en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir.



Şekil 18. Aql X-1'dan ikinci patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile birlikte en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir.



Şekil 19. Aql X-1'dan ikinci patlaması sonrasında elde edilen sakin evre X-ışın tayfları. Her panelde X-ışın verileri ile birlikte en iyi uyum sağlayan model siyah çizgi ile gösterilmiştir. Alt paneller veri ile model arasındaki farkı her bir verinin hatasına normalize edilmiş şekilde göstermektedir. Sol ve sağ paneller sırasıyla NSA ve RNSA modellemelerini göstermektedir.



Şekil 20. Aql X-1'e ait soğuma eğrisi. Üst paneller akı, alt paneller ise sıcaklığı göstermektedir.

Tablo 3. Aql X-1'in birinci patlaması için yapılan simültane fitlere ait sonuçlar.

Tarih (MJD)	Poz Süresi (ks)	kT_{NSA} (keV)	kT_{RNSA} (keV)	$F_{x,NSA}$ ($x10^{-12}$ erg/cm^2/s^1)	$F_{x,RNSA}$ ($x10^{-12}$ erg/cm^2/s^1)	$norm_{PL}$ ($x10^{-5}$)
51876	7.31	0.17±0.009	0.16±0.01	1.76±014	1.70±0.06	1.55±0.6
51991	8.15	0.15±0.009	0.14±0.01	1.23±0.07	1.17±0.06	2.8±0.5
52019	10.19	0.14±0.008	0.13±0.01	1.19±0.06	1.14±0.06	3.77±0.6
52399	7.16	0.16±0.008	0.15±0.01	1.60±0.09	1.61±0.08	3.9±0.6
52414	7.67	0.15±0.009	0.14±0.01	1.67±0.09	1.65±0.09	7.35±0.8
52461	6.55	0.14±0.01	0.13±0.01	1.11±0.08	1.04±0.07	1.61±0.1
52478	7.17	0.17±0.1	0.16±0.01	0.96±0.07	0.91±0.05	0.0
52504	7.86	0.16±0.01	0.15±0.01	0.92±0.07	0.87±0.05	0.0
52521	7.65	0.16±0.08	0.15±0.01	1.06±0.06	1.01±0.06	2.22±0.5
52562	7.453	0.14±0.07	0.14±0.01	0.941±0.07	0.90±0.06	0.0
52564	13.93	0.15±0.08	0.14±0.01	0.832±0.08	0.80±0.04	0.4±0.1

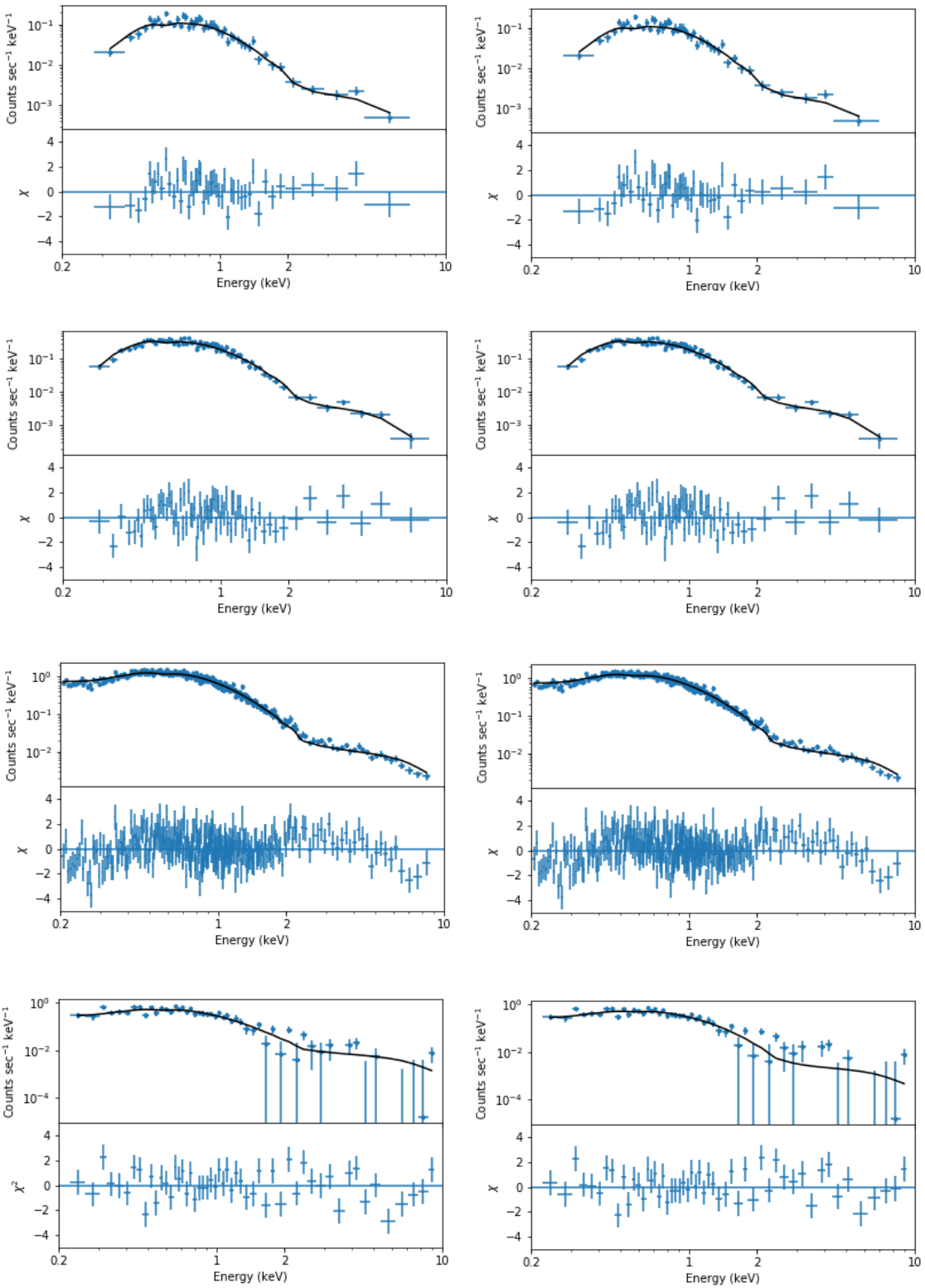
Tablo 4. Aql X-1'in ikinci patlaması için yapılan simültane fitlere ait sonuçlar.

Tarih (MJD)	Poz Süresi	kT_{NSA} (keV)	kT_{RNSA} (keV)	$F_{x,NSA}$ ($x10^{-12}$	$F_{x,RNSA}$ ($x10^{-12}$	$norm_{PL}$ ($x10^{-5}$)

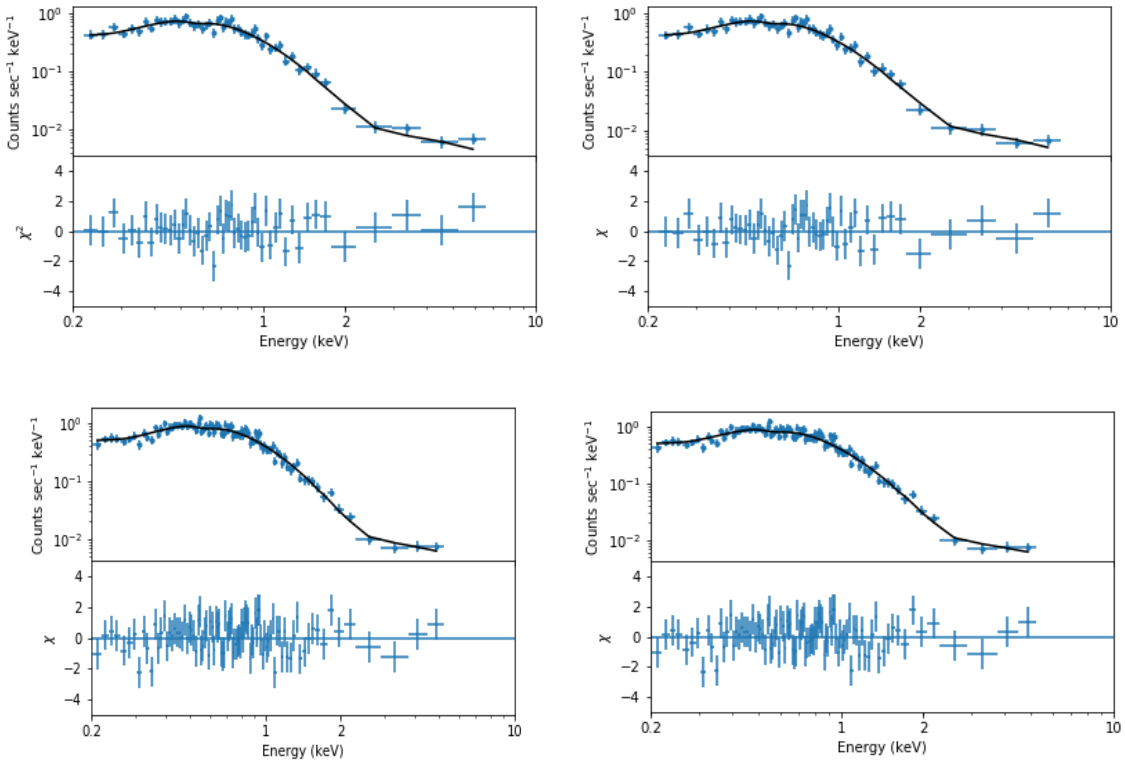
	(ks)			erg/cm^2/s^1)	erg/cm^2/s^1)	
55491	7.01	0.18±0.09	0.18±0.01	2.32 ±1.16	2.35±0.04	8.35±0.9
55499	7.01	0.16±0.01	0.16±0.01	1.46±0.09	1.47±0.03	4.45±0.7
55512	7.01	0.16±0.01	0.16±0.01	1.59±0.10	1.61±0.03	4.69±0.6
55498	7.62	0.16±0.06	0.17±0.06	1.58±0.05	1.59±0.02	3.11±0.3
55502	14.9	0.16±0.05	0.16±0.05	1.43±0.04	1.44±0.01	2.89±0.2

4.3. Cen X-4

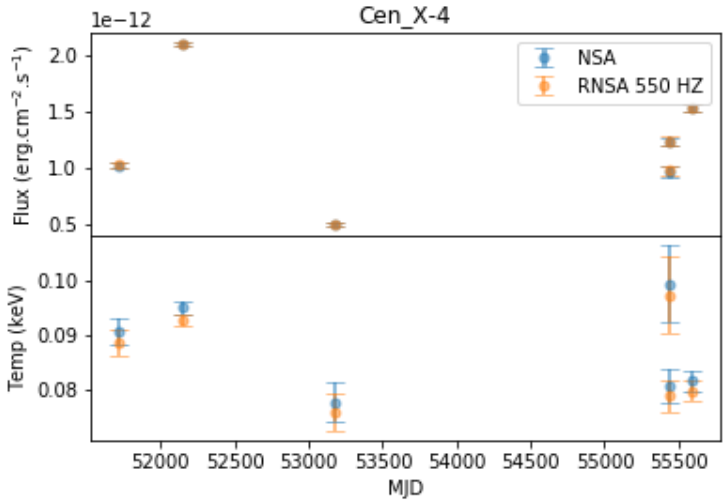
Cen X-4 şu ana kadar soğuması en iyi çalışılabilmiş süreksiz nötron yıldızlarından biridir ve birçok X-ışın gözlemevi tarafından gözlemlenmiştir ve sakin evrede olduğu gözlemleri projemiz kapsamında kullanılmıştır. Bu gözlemler hem NSA hem de RNSA modeli ile modellenmiştir. Hidrojen kolon yoğunluğu ve foton indeksi değerleri Bölüm 3.2'de açıklandığı şekilde, sırasıyla N_H = 0.063x10^{22} cm^{-2} ve Γ=0.92 olarak bulunmuştur. NSA modelinin normalizasyonu, D, cismin parsek (pc) cinsinden uzaklığı olmak üzere, 7x10^{-7} olarak hesaplanmış ve analizde bu şekilde kullanılmıştır. Tayfsal parametreleri Tablo 5'te ve tayfları Şekil 21 ve Şekil 22'de gösterilmiştir. Son olarak ise, uzun dönemli akı ve sıcaklık değişimi Şekil 23'de gösterilmiştir. Modelleme sonucu elde edilen χ^2 / dof NSA ve RNSA modelleri için sırasıyla 1.14/583 ve 1.14/583'dür.



Şekil 21. Cen X-4 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol kolondaki grafikler NSA, sağ kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.



Şekil 22. Cen X-4 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol kolondaki grafikler NSA, sağ kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.



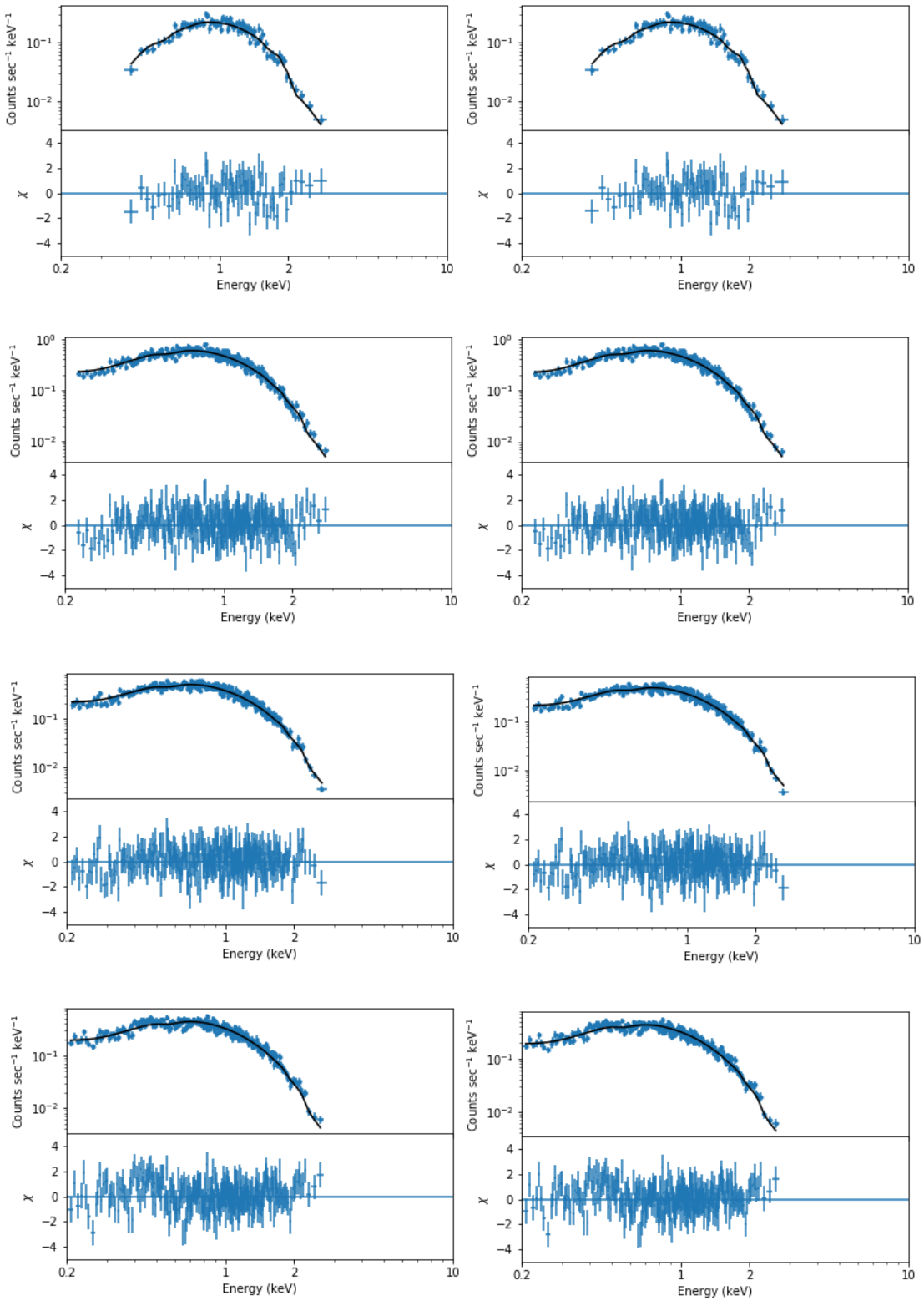
Şekil 23. Cen X-4' e ait ışık eğrisi. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. X-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.

Tablo 5 Cen X-4'a ait tayfsal parametreler.

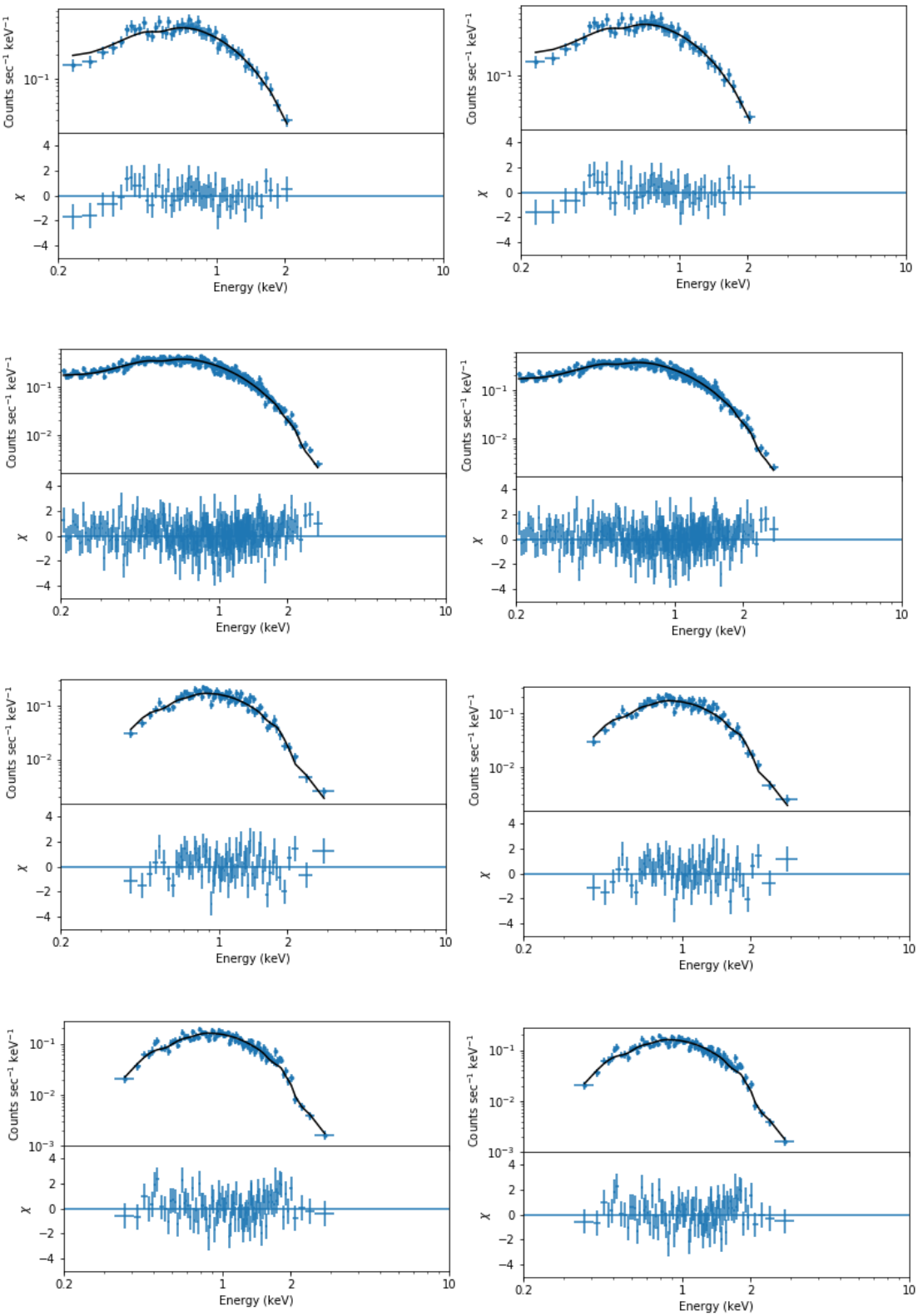
Tarih (MJD)	Poz Süresi (ks)	kT_{NSA} (keV)	kT_{RNSA} (keV)	$F_{x,NSA}$ ($x10^{-12}$ erg/cm^2/s^1)	$F_{x,RNSA}$ ($x10^{-12}$ erg/cm^2/s^1)	$norm_{PL}$ ($x10^{-5}$)
53177	11.18	0.07±0.003	0.08±0.003	0.49±0.02	0.46±0.02	1.4±0.1
51718	10.54	0.09±0.002	0.09±0.02	1.02±0.02	1.01±0.02	2.62±0.3
52141	53.4	0.1±0.00111	0.09±0.001	2.11±0.02	2.13±0.02	4.66±0.2
55433	20.8	0.09±0.006	0.1±0.007	0.97±0.05	0.92±0.04	1.07±0.1
55443	22.8	0.08±0.002	0.08±0.003	1.24±0.04	1.24±0.04	3.5±0.4
55586	14.9	0.08±0.002	0.08±0.001	1.53±0.03	1.53±0.03	3.33±0.3

4.4 EXO 0748–676

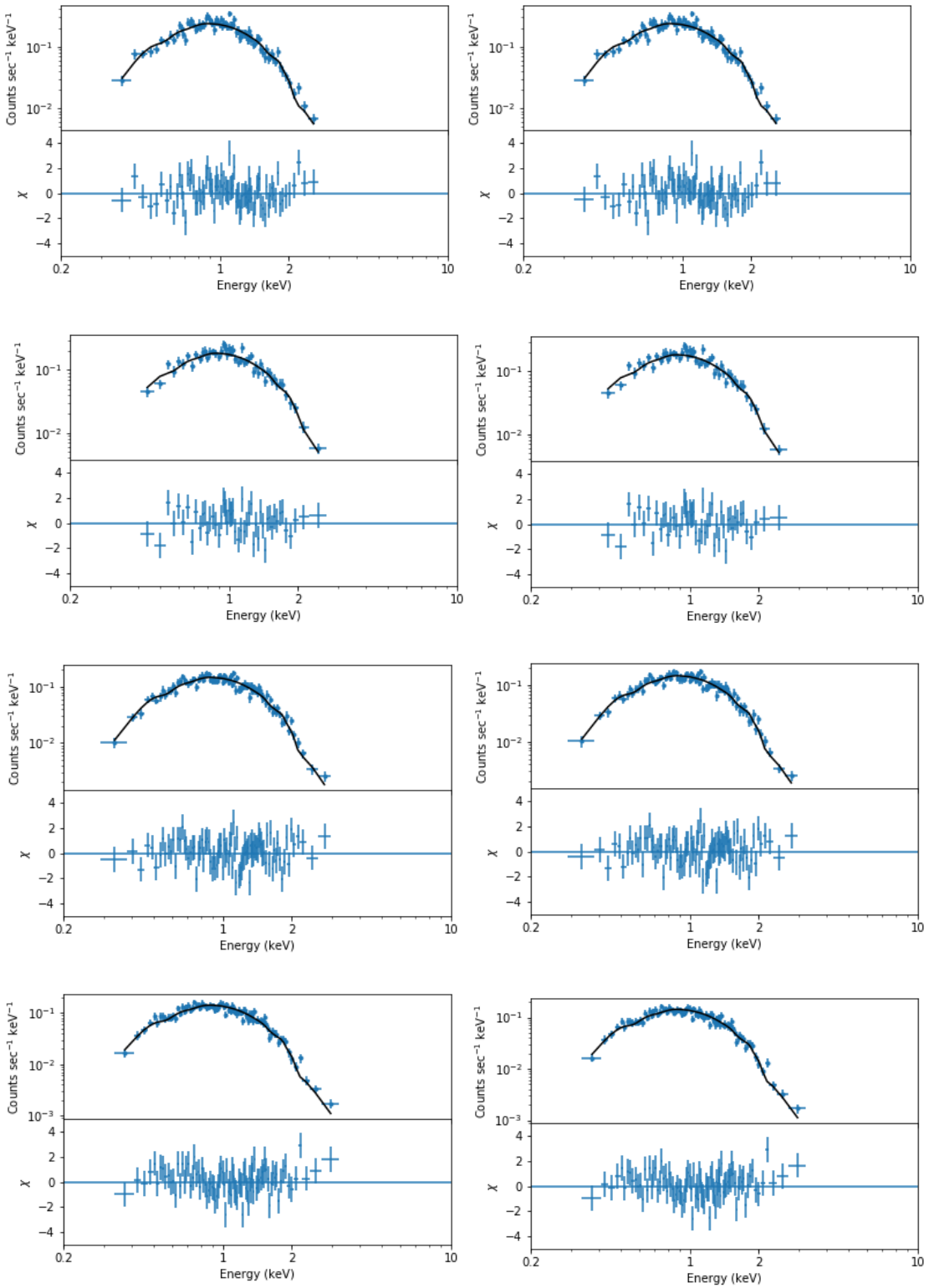
EXO 0748–676, oldukça yoğun olarak çalışılan bir nötron yıldızı barındıran X-ışın çiftidir. Gösterdiği patlamalar sonrasında elde edilen sakin evre gözlemleri kabuk soğumasının anlaşılması için büyük bir olanak sağlanmaktadır. Proje kapsamında alınan sakin evre gözlemleri NSA ve RNSA modelleri ile modellenmiştir. Hidrojen kolon yoğunluğu Bölüm 3.2'de açıklandığı şekilde, N_H = 0.54x10^{22} cm^{-2} olarak bulunmuştur. Bu kaynağın verilerinde ısısal olmayan bileşen gerek duyulmamıştır. NSA modelinin normalizasyonu, D, cismin parsek (pc) cinsinden uzaklığı olmak üzere, 2x10^{-8} olarak hesaplanmış ve analizde bu şekilde kullanılmıştır. Tayfsal parametreler Tablo 6'da, tayflar Şekil 24, Şekil 25, Şekil 26, Şekil 27'de ve ışık eğrisi ise Şekil 28'de gösterilmiştir. Modelleme sonucu elde edilen χ^2 / dof NSA ve RNSA modelleri için sırasıyla 1.03/1900 ve 1.04/1900'dür.



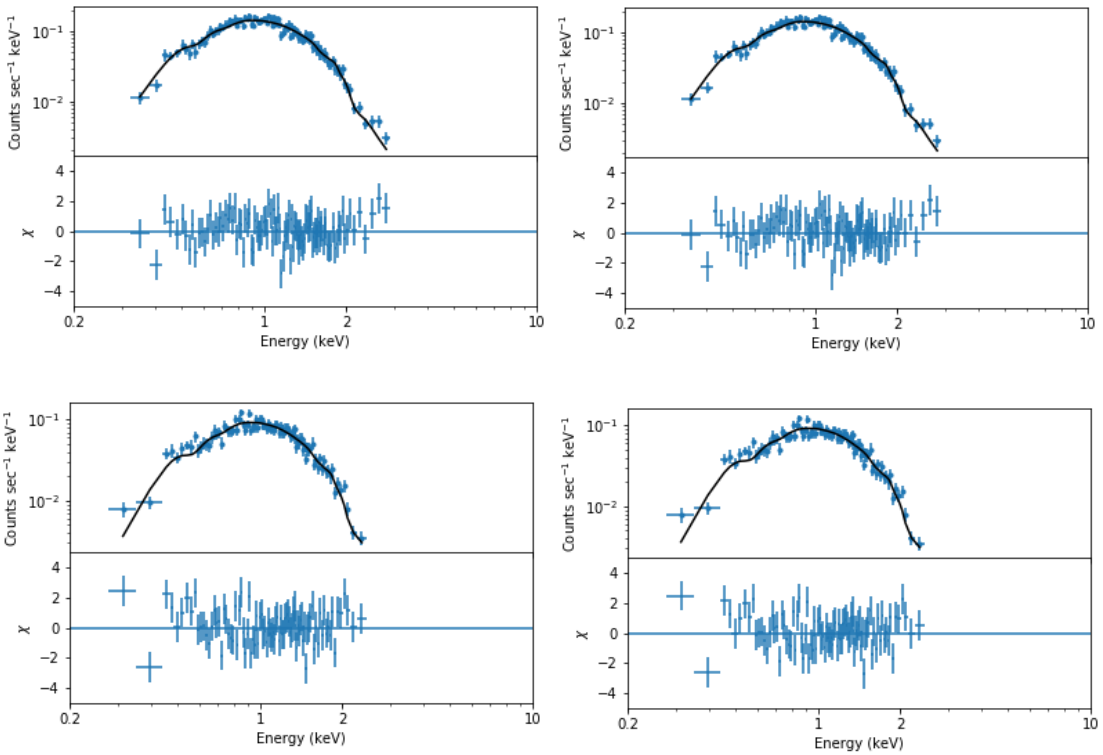
Şekil 24. EXO 0748–676 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütün grafikler NSA, sağ kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.



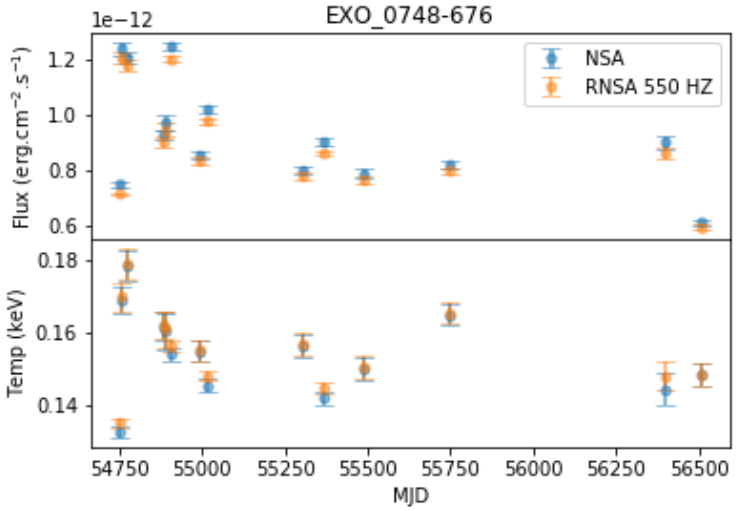
Şekil 25. EXO 0748–676 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütün grafikler NSA, sağ kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.



Şekil 26. EXO 0748–676 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütün grafikler NSA, sağ kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.



Şekil 27. EXO 0748–676 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütün grafikler NSA, sağ kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.



Şekil 28. EXO 0748–676'e ait ışık eğrisi. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. x-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.

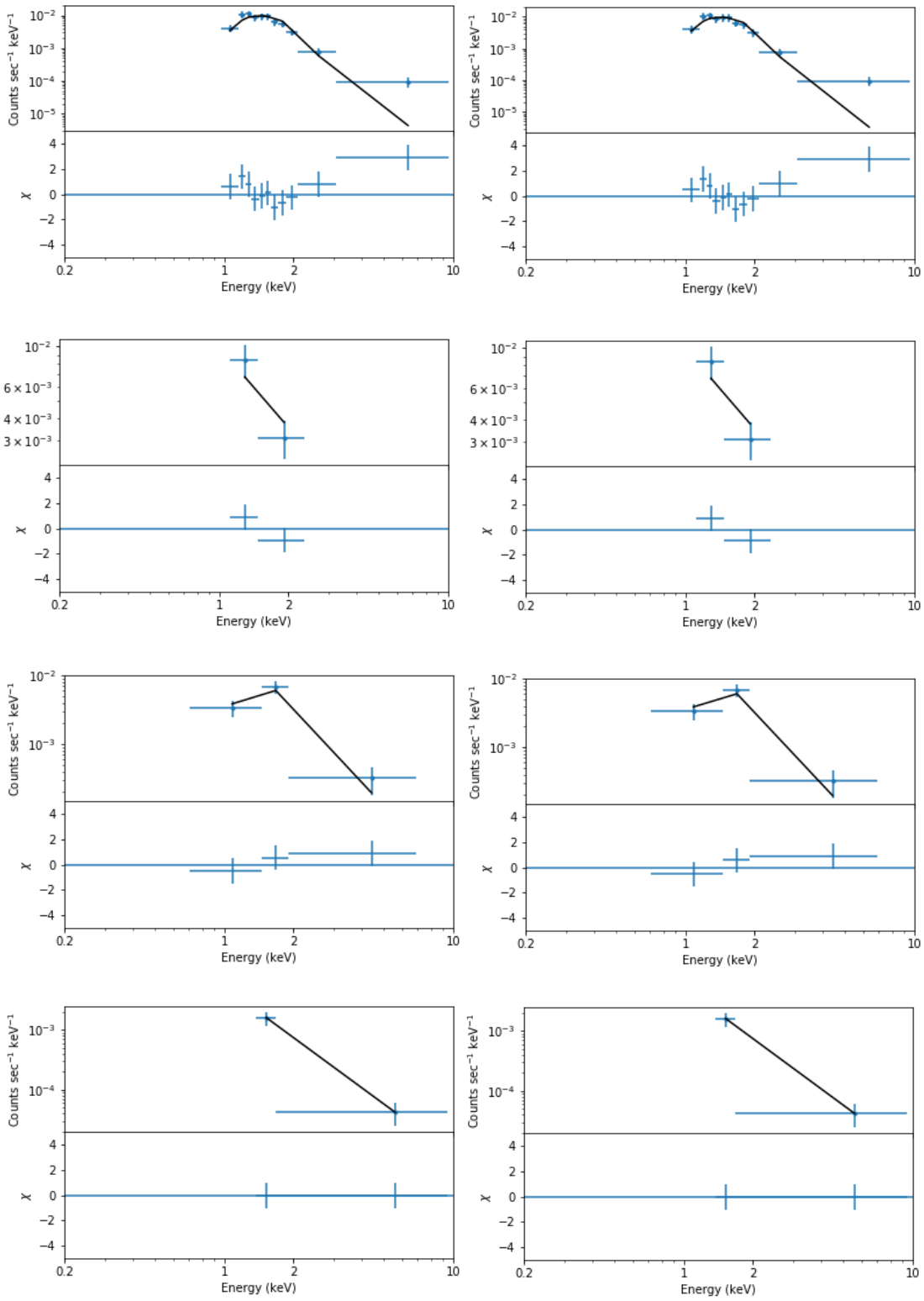
Tablo 6. EXO 0748–676'e ait tayfsal parametreler.

Tarih (MJD)	Poz Süresi (ks)	kT_{NSA} (keV)	kT_{RNSA} (keV)	$F_{x,NSA}$ ($x10^{-12}$ erg/cm^2/s^1)	$F_{x,RNSA}$ ($x10^{-12}$ erg/cm^2/s^1)
54752	15.2	0.18±0.04	0.18±0.04	1.20±0.02	1.18±0.02
54776	29.8	0.15±0.01	0.16±0.01	1.24±0.01	1.2±0.01
54908	47.2	0.15±0.01	0.15±0.01	1.01±0.01	0.97±0.007
55013	109.8	0.14±0.01	0.15±0.01	0.90±0.01	0.86±0.007
55364	105	0.14±0.04	0.15±0.04	0.90±0.02	0.86±0.02
56397	104.4	0.13±0.01	0.14±0.01	0.75±0.08	0.71±0.001
54886	17.6	0.16±0.03	0.16±0.03	0.92±0.02	0.90±0.01
54993	30.0	0.15±0.03	0.16±0.03	0.85±0.01	0.83±0.01
54755	14.7	0.17±0.04	0.17±0.03	1.23±0.02	1.2±0.02
54888	10.6	0.16±0.05	0.16±0.04	0.98±0.02	0.94±0.02
55306	30.1	0.16±0.03	0.16±0.03	0.80±0.01	0.78±0.01
55490	30.0	0.15±0.03	0.15±0.03	0.80±0.01	0.76±0.01
55745	40.0	0.17±0.02	0.17±0.02	0.81±0.01	0.80±0.01
56505	45.0	0.15±0.03	0.15±0.03	0.61±0.01	0.60±0.01

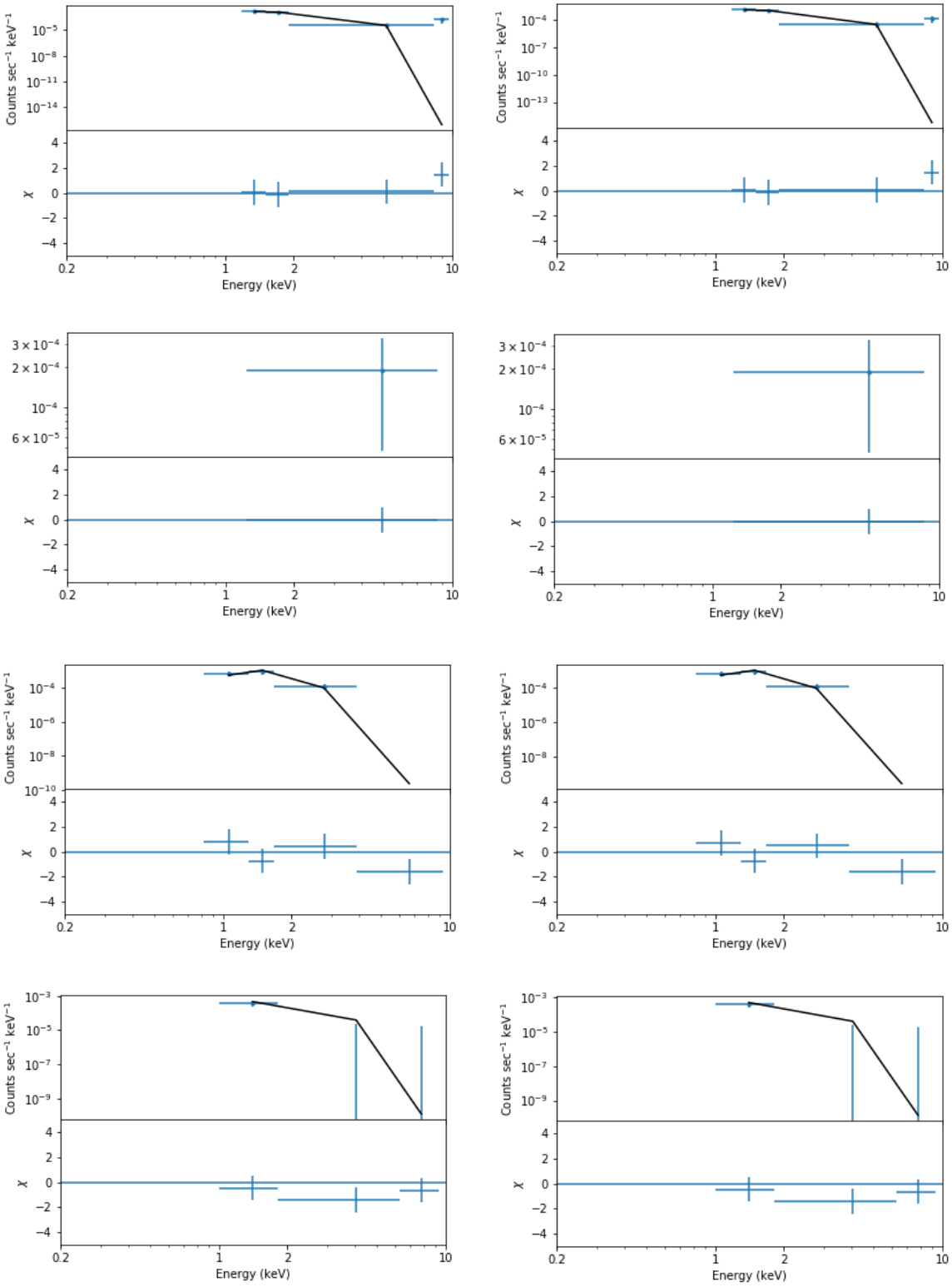
4.5. KS 1731-260

KS 1731-260, oldukça yoğun olarak çalışılan bir nötron yıldızı barındıran X-ışın çiftidir. Gösterdiği patlamalar sonrasında elde edilen sakin evre gözlemleri kabuk soğumasının anlaşılması için büyük bir olanak sağlanmaktadır. Proje kapsamında alınan sakin evre gözlemleri NSA ve RNSA modelleri ile modellenmiştir. Bu gözlemler hem NSA hem de RNSA modeli ile modellenmiştir. Hidrojen kolon yoğunluğu Bölüm 3.2'de açıklandığı şekilde, N_H = 2.98x10^{22} cm^{-2} olarak bulunmuştur. Bu kaynağında veri analizinde ısısal

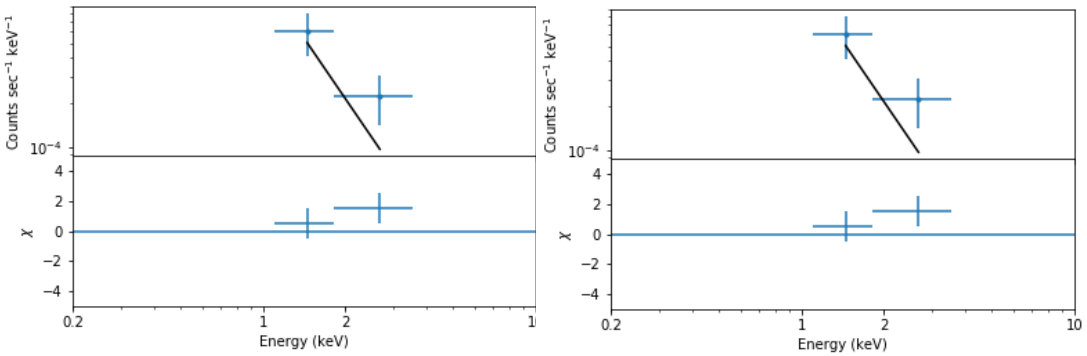
olmayan bir bileşene ihtiyaç duyulmamıştır. NSA modelinin normalizasyonu, D, cismin parsek (pc) cinsinden uzaklığı olmak üzere, $2x10^{-7}$ olarak hesaplanmış ve analizde bu şekilde kullanılmıştır. Tayfsal parametreler Tablo 7'da, tayflar Şekil 29, Şekil 30 ve Şekil 31'de ve ışık eğrisi ise Şekil 32'de gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği üzere kaynak pek çok durumda oldukça sönük kalmıştır buna rağmen yapılan modelleme sonucu elde edilen χ^2 / dof NSA ve RNSA modelleri için sırasıyla 1.662/17 ve 1.659/17'dür.



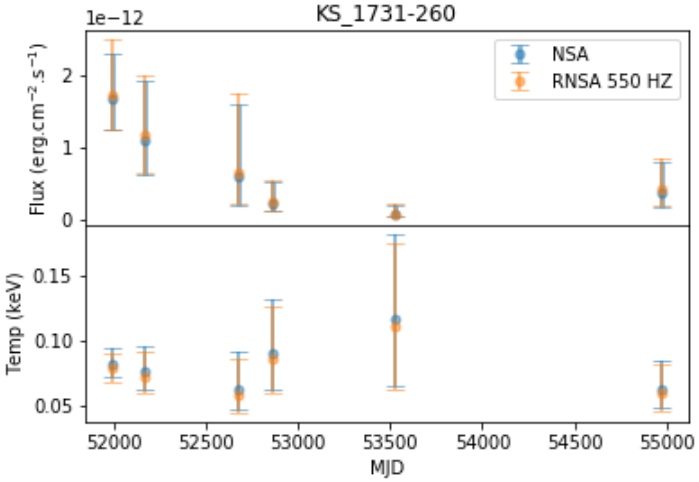
Şekil 29. KS 1731-260 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Birinci kolondaki grafikler NSA, ikinci kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.



Şekil 30. KS 1731-260 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Birinci kolondaki grafikler NSA, ikinci kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.



Şekil 31. KS 1731-260 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Birinci kolondaki grafikler NSA, ikinci kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.



Şekil 32. KS 1731-260'e ait ışık eğrisi. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. x-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.

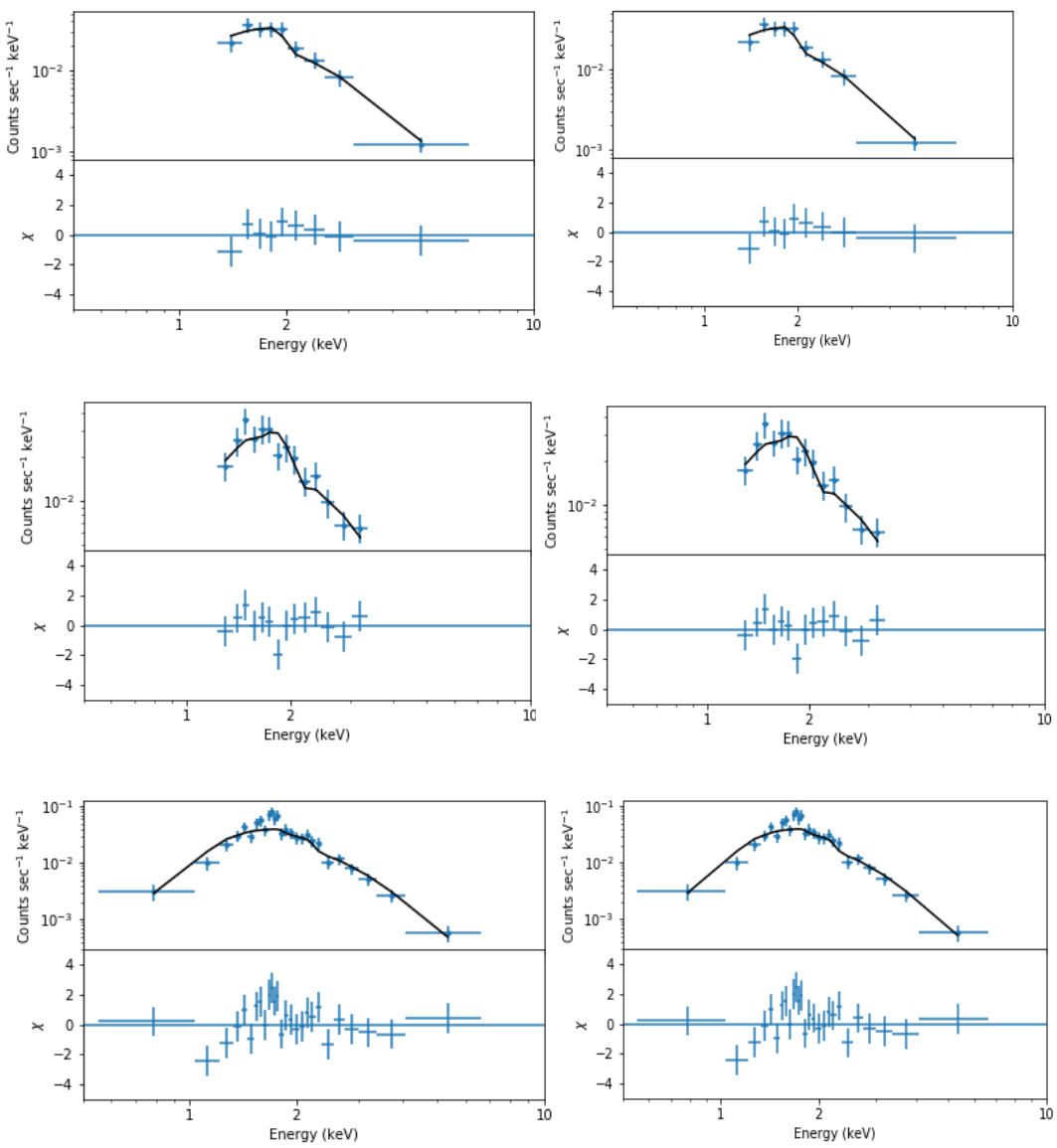
Tablo 7. KS 1731-260'a ait tayfsal parametreler.

Tarih (MJD)	Poz Süresi (ks)	kT_{NSA} (keV)	kT_{RNSA} (keV)	$F_{x,NSA}$ ($x10^{-12}$ erg/cm^2/s^1)	$F_{x,RNSA}$ ($x10^{-12}$ erg/cm^2/s^1)
51995	20.4	0.08±0.01	0.07±0.01	1.66±0.5	1.97±0.8
52165	25.2	0.07±0.01	0.07±0.01	1.09±0.8	1.37±1.0
52166	25.7	0.07±0.01	0.07±0.01	1.09±0.8	1.37±1.0
52681	30.0	0.06±0.01	0.06±0.01	0.60±1.2	0.60±1.4
52859	30.1	0.09±0.03	0.08±0.03	0.22±0.2	0.25±0.2
53525	39.0	0.06±0.01	0.06±0.01	0.37±0.4	0.45±0.5

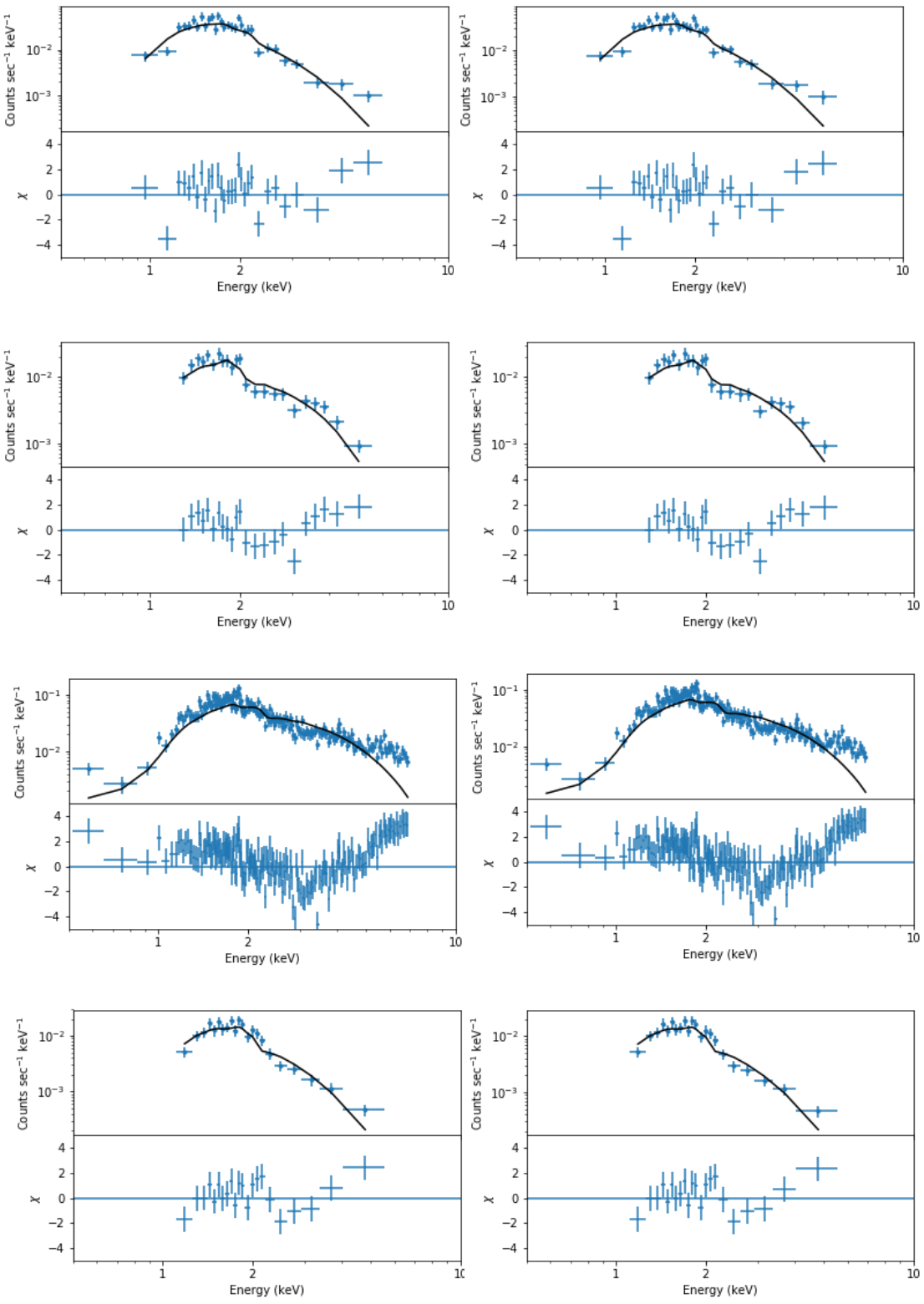
54969	31.3	0.11±0.09	0.10±0.05	0.06±0.06	0.07±0.07

4.6. XTE J1701–462

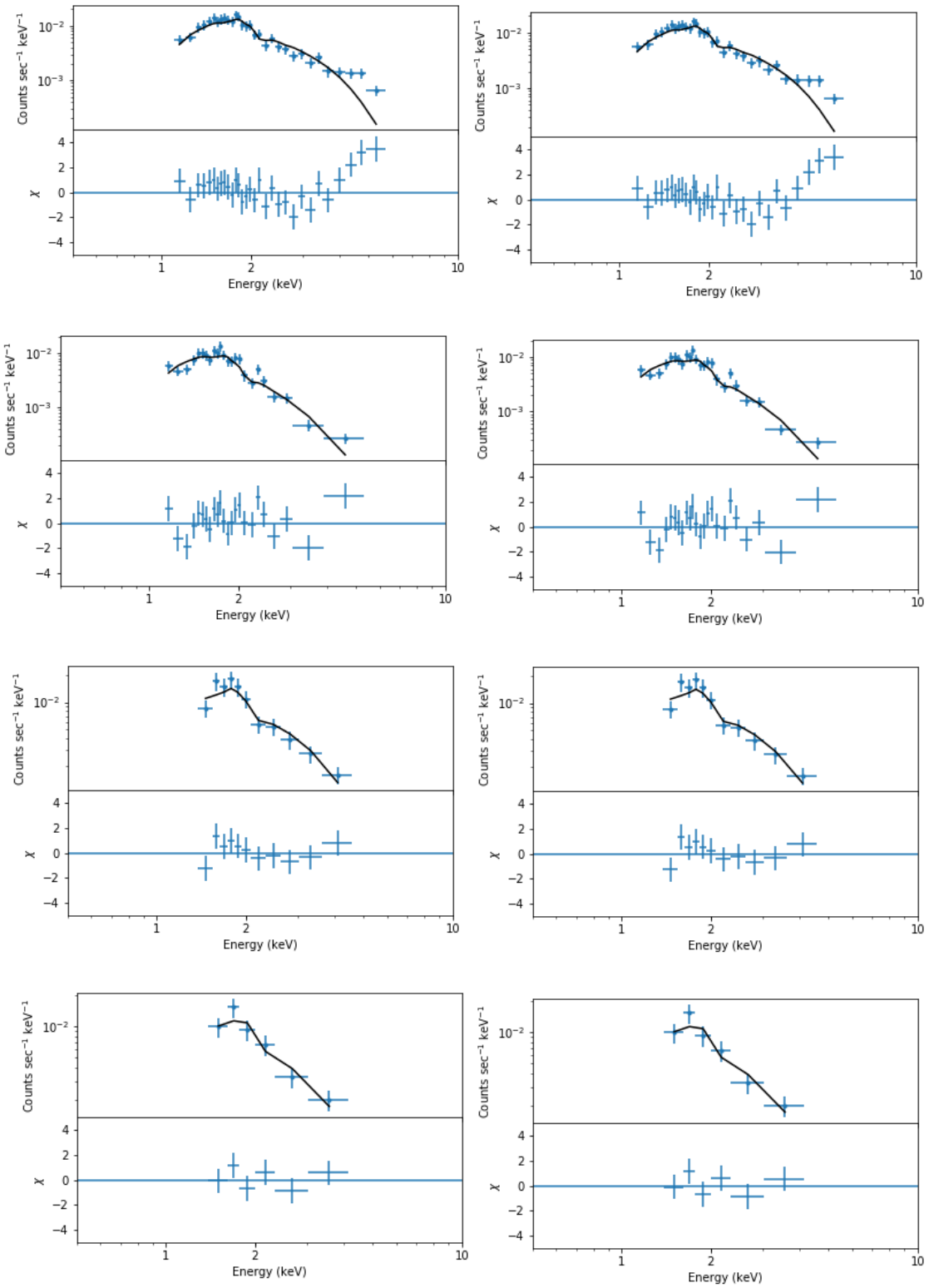
XTE J1701–462, 2007'de geçtiği sakin evre ile soğuma araştırmalarına katkıda bulunmuş bir kaynaktır. Bu bağlamda, alınan sakin evre gözlemleri NSA ve RNSA modelleri ile modellenmiştir. Hidrojen kolon yoğunluğu Bölüm 3.2'de açıklandığı şekilde, $N_H = 2.95 \times 10^{22}$ cm^{-2} olarak bulunmuştur. Bu kaynağında veri analizi sırasında ısısal olmayan bileşene gerek görülmemiştir. NSA modelinin normalizasyonu, D, cismin parsek (pc) cinsinden uzaklığı olmak üzere, 1.2×10^{-8} olarak hesaplanmış ve analizde bu şekilde kullanılmıştır. Tayfsal parametreler Tablo 8'da, tayflar Şekil 33, Şekil 34, Şekil 35, Şekil 36 ve Şekil 37'de ve ışık eğrisi ise Şekil 38'de gösterilmiştir. Modelleme sonucu elde edilen χ^2 / dof NSA ve RNSA modelleri için sırasıyla 1.88/474 ve 1.85/474'dür.



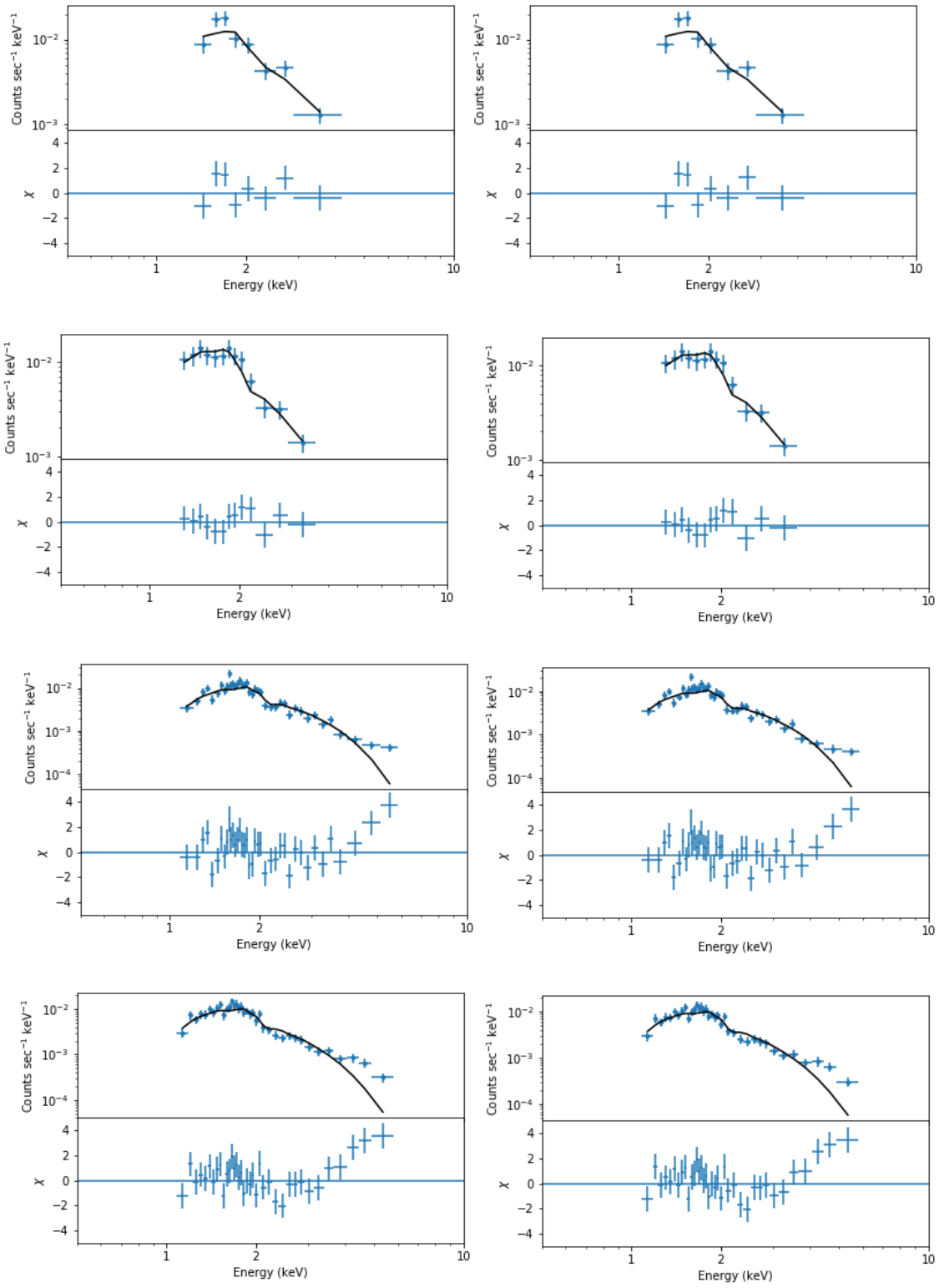
Şekil 33. XTE J1701–462 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütun NSA, sağ sütun ise RNSA modeline ait sonuçları göstermektedir.



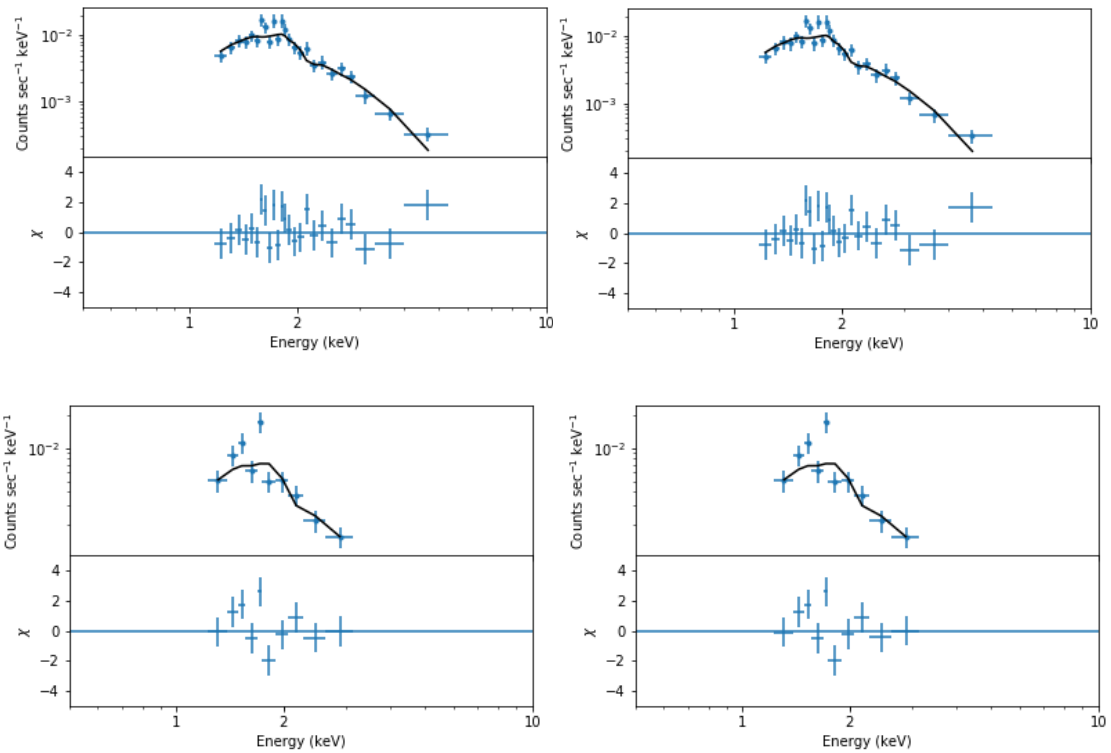
Şekil 34. XTE J1701–462 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütun NSA, sağ sütun ise RNSA modeline ait sonuçları göstermektedir.



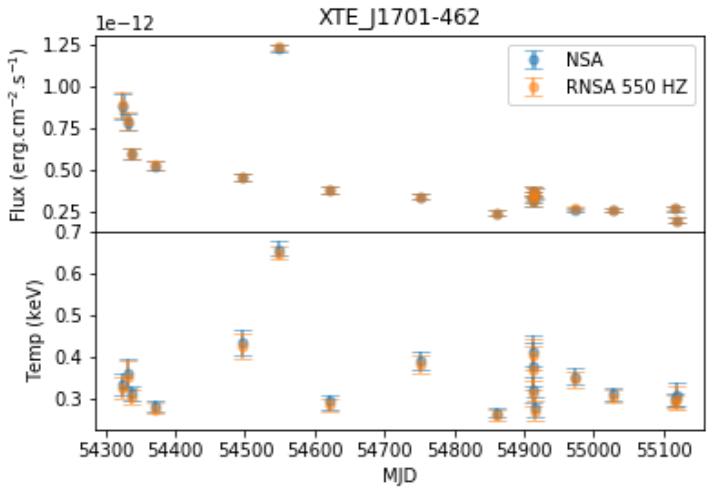
Şekil 35. XTE J1701–462 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütun NSA, sağ sütun ise RNSA modeline ait sonuçları göstermektedir.



Şekil 36. XTE J1701–462 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütun NSA, sağ sütun ise RNSA modeline ait sonuçları göstermektedir.



Şekil 37. XTE J1701–462 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol sütun NSA, sağ sütun ise RNSA modeline ait sonuçları göstermektedir.



Şekil 38. XTE J1701–462'e ait ışık eğrisi. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. X-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.

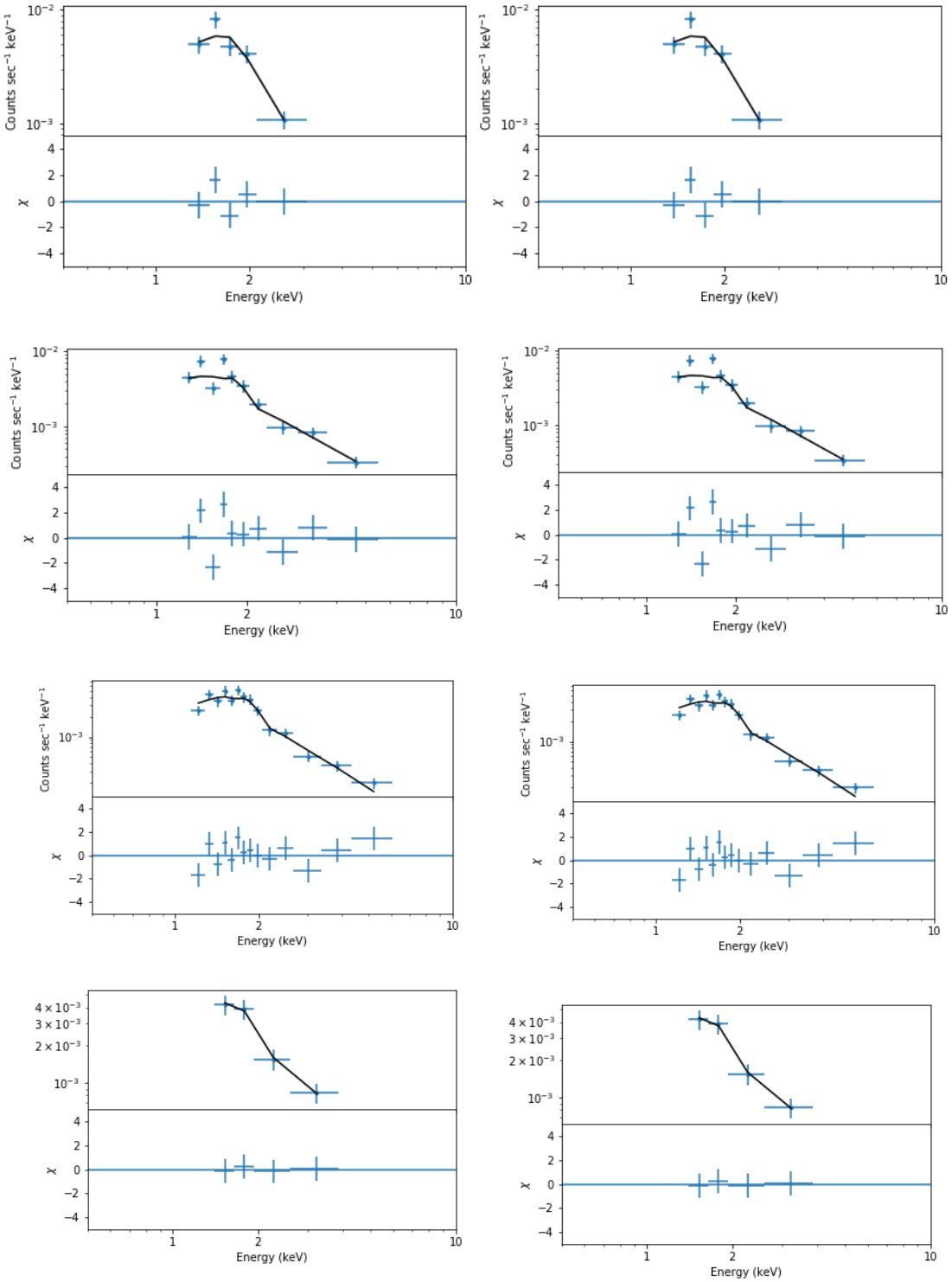
Tablo 8 XTE J1701–462'ye ait tayfsal parametreler.

Tarih (MJD)	Poz Süresi (ks)	kT_{NSA} (keV)	kT_{RNSA} (keV)	$F_{x,NSA}$ ($x10^{-13}$ erg/cm^2/s^1)	$F_{x,NSA}$ ($x10^{-13}$ erg/cm^2/s^1)
54325	5.17	0.33±0.02	0.33±0.02	8.81±0.07	8.84±0.07
54333	9.68	0.36±0.03	0.36±0.03	7.81±0.05	7.86±0.05
54338	28.9	0.31±0.02	0.30±0.02	5.90±0.03	5.93±0.03
54371	27.9	0.28±0.01	0.28±0.01	5.22±0.03	5.25±0.03
54496	20.2	0.43±0.03	0.43±0.03	4.50±0.02	4.53±0.03
54547	55.5	0.65±0.02	0.65±0.03	12. ±0.02	1.23±0.02
54620	30.1	0.29±0.02	0.29±0.02	3.75±0.02	3.76±0.02
54753	40.4	0.39±0.02	0.38±0.02	3.36±0.02	3.39±0.02
54862	30.2	0.27±0.01	0.26±0.01	2.39±0.01	2.40±0.01
54913	40.4	0.41±0.03	0.40±0.04	3.65±0.03	3.68±0.03
54914	9.1	0.38±0.05	0.37±0.05	3.08±0.04	3.10±0.04
54914	12.0	0.32±0.03	0.31±0.03	3.37±0.03	3.38±0.03
54916	19.8	0.28±0.02	0.27±0.02	3.53±0.03	3.55±0.03
54974	63.1	0.35±0.02	0.35±0.02	2.62±0.01	2.64±0.01
55027	66.3	0.32±0.02	0.30±0.01	2.57±0.01	2.58±0.01
55117	44.1	0.30±0.02	0.29±0.02	2.65±0.01	2.66±0.01
55118	26.1	0.31±0.03	0.30±0.03	1.93±0.02	1.94±0.02

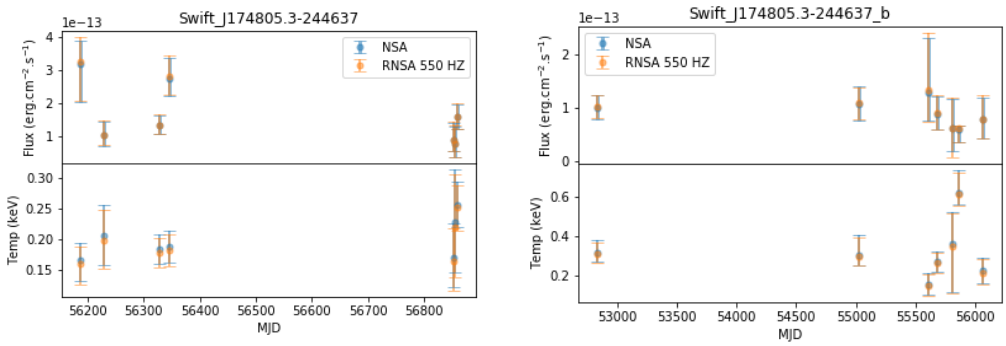
4.7. Swift J174805.3-244637

Terzan 5'te bulunan DKXÇ'lerinden biri olan Swift J174805.3-244637, sakin evre nötron yıldızı çalışmaları için eşsiz örneklerden biridir. Işık eğrisinde irili ufaklı değişimler olsa da gösterdiği sakin evre ışıtması çalışmamız için muazzam yarar sağlamıştır. Bu bağlamda, alınan sakin evre gözlemleri NSA ve RNSA modelleri ile modellenmiştir. Bu gözlemler hem NSA hem de RNSA modeli ile modellenmiştir. Hidrojen kolon yoğunluğu ve foton indeksi değerleri Bölüm 3.2'de açıklandığı şekilde, sırasıyla N_H = 2.63x10^{22} cm^{-2} ve Γ=1.4 olarak bulunmuştur. NSA modelinin normalizasyonu, D, cismin parsek (pc) cinsinden uzaklığı olmak üzere, 3.3x10^{-8} olarak hesaplanmış ve analizde bu şekilde kullanılmıştır. Modelleme sonucu patlama öncesi ve sonrası analizde elde edilen χ^2 / dof NSA ve RNSA modelleri için sırasıyla 1.46/67 ve 1.46/67 ve 1.62/79 ve 1.65/79'dur.

Tayfsal parametreler Tablo 9'da, tayflar Şekil 39'da ve ışık eğrisi ise Şekil 40'da gösterilmiştir.



Şekil 39. Swift J174805.3-244637 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Birinci kolondaki grafikler NSA, ikinci kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.



Şekil 40. Swift J174805.3-244637'e ait ışık eğrileri. Sol taraftaki ışık eğrisi verileri patlama öncesinde alınmışken; sağdaki eğrinin verileri patlama sonrasında alınmıştır. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. x-ekseni MJD cinsinden zamanı temsil etmektedir.

Tablo 9. Swift J174805.3-244637'a ait tayfsal parametreler.

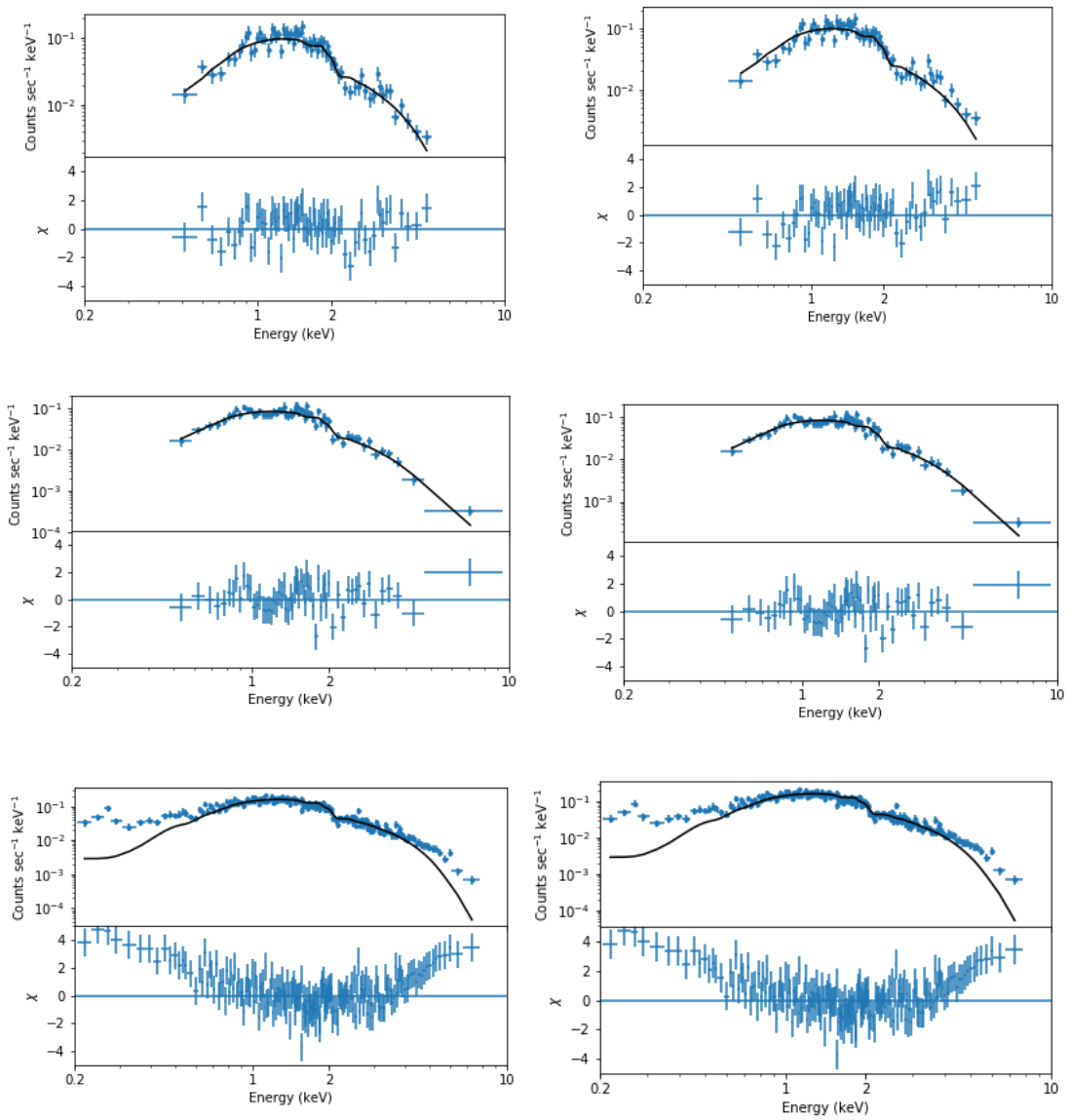
Tarih (MJD)	Poz Süresi (ks)	kT_{NSA} (keV)	kT_{RNSA} (keV)	$F_{x,NSA}$ ($x10^{-13}$ ergcm^{-2}s-1)	$F_{x,RNSA}$ ($x10^{-13}$ ergcm^{-2}s^{-1})	$norm_{PL}$ ($x10^{-6}$)
56328	30.0	0.17±0.03	0.16±0.03	3.17±0.1	3.27±1.17	1.71±1.7
56345	49.9	0.21±0.04	0.20±0.04	1.04±0.3	1.06±0.3	8.38±1.5
56346	85.3	0.18±0.02	0.18±0.02	1.34±0.2	1.36±0.2	5.17±8.6
56853	30.0	0.17±0.15	0.16±0.13	0.7±0.6	0.71±0.3	0.11±5.0
56855	72.6	0.17±0.5	0.16±0.05	0.89±0.3	0.99±0.3	8.11±1.1
56859	23.3	0.19±0.03	0.18±0.03	2.76±0.5	2.82±0.6	7.04±2.1
56188	32.0	0.26±0.04	0.25±0.04	1.59±0.04	1.6±0.4	7.89±1.9
56228	30.0	0.23±0.08	0.22±0.08	0.79±0.40	0.80±0.4	0.17±0.15
56345	49.9	0.62±0.05	0.61±0.05	0.60±0.20	0.60±0.2	0.56±0.5
56853	30.0	0.16±0.05	0.15±0.05	1.28±0.5	1.32±0.5	8.08±2.4
56855	72.6	0.27±0.05	0.26±0.05	0.88±0.3	0.89±0.3	8.94±2.1
56859	23.3	0.36±0.2	0.34±0.2	0.60±0.4	0.61±0.4	7.77±6.7
56188	32.0	0.23±0.06	0.22±0.06	0.77±0.4	0.78±0.4	8.88±2.1

4.8. MAXI J0556−332

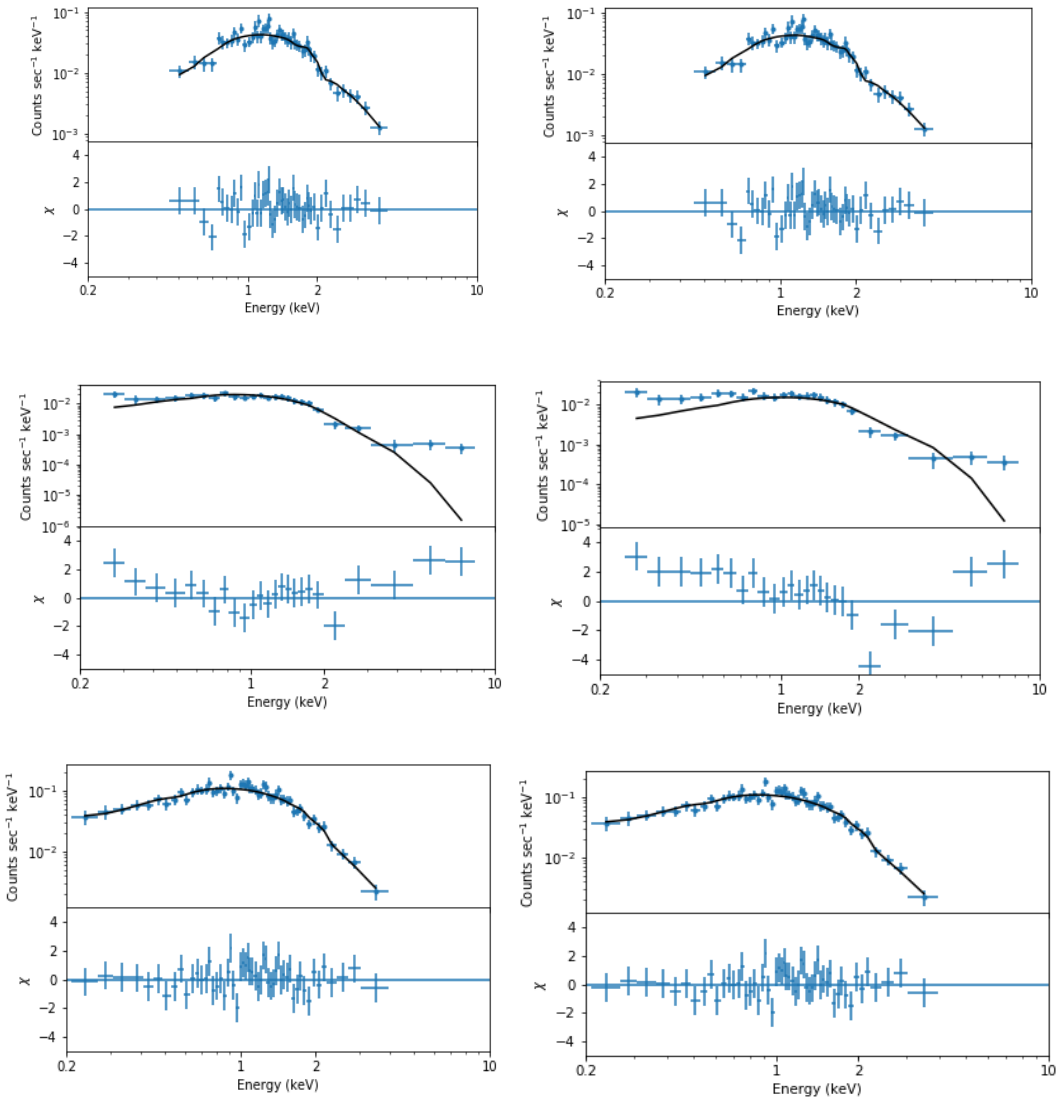
MAXI J0556−332, keşfedildikten hemen sonra yaklaşık olarak 16 ay süren bir patlama dönemi sergileyip 2 ay boyunca sakin evrede seyretmiştir. Sonrasındaki sergilediği patlamalar yıldızın ısınmasına pek katkı sağlamamıştır ve kaynak soğumaya devam etmiştir. Çalışmamız kapsamında, kaynağa ait sakin evre gözlemleri NSA ve RNSA modelleri ile modellenmiştir. Hidrojen kolon yoğunluğu ve foton indeksi değerleri Bölüm 3.2'de açıklandığı şekilde, sırasıyla N_H = 0.04x10^{22} cm^{-2} ve Γ=1.24 olarak bulunmuştur. Modelleme sonucu

analizde elde edilen χ^2 / dof NSA ve RNSA modelleri için sırasıyla 1.52 / 759 ve 1.57 / 759 bulunmuştur.

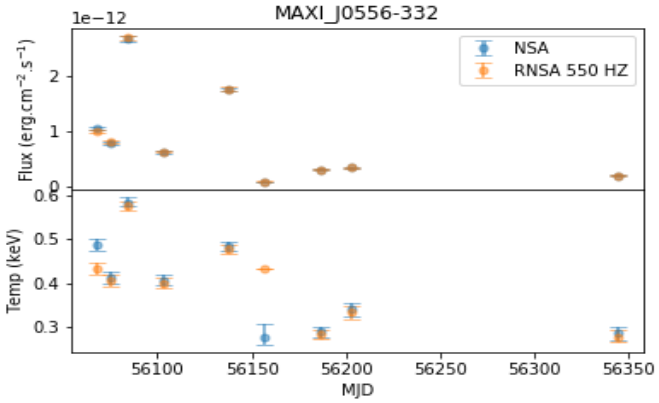
NSA modelinin normalizasyonu, D, cismin parsek (pc) cinsinden uzaklığı olmak üzere, $5x10^{-10}$ olarak hesaplanmış ve analizde bu şekilde kullanılmıştır. Tayfsal parametreler Tablo 10'da, tayflar Şekil 41 ve Şekil 42'de ve ışık eğrisi ise Şekil 43'de gösterilmiştir.



Şekil 41. MAXI J0556−332 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Birinci kolondaki grafikler NSA, ikinci kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.



Şekil 42. MAXI J0556−332 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Birinci kolondaki grafikler NSA, ikinci kolondaki grafikler ise RNSA modeline aittir.



Şekil 43. MAXI J0556−332 'e ait ışık eğrisi. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. x-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.

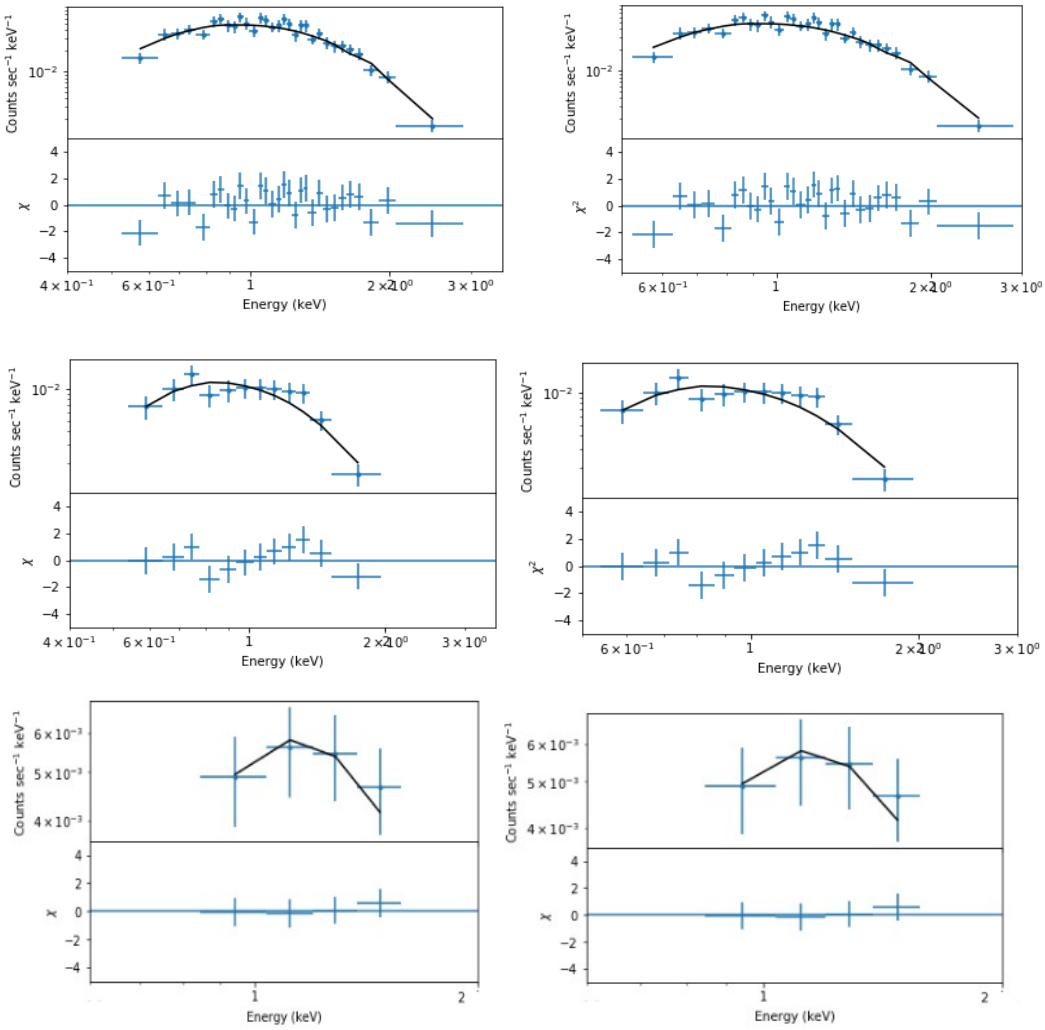
Tablo 10. MAXI J0556−332'ye ait tayfsal parametreler.

Tarih (MJD)	Poz Süresi (ks)	kT_{NSA} (keV)	kT_{RNSA} (keV)	$F_{x,NSA}$ ($x10^{-12}$ erg/cm^2/s^1)	$F_{x,RNSA}$ ($x10^{-12}$ erg/cm^2/s^1)
56328	30.0	0.49±0.01	0.43±0.01	1.0±0.01	1.0±0.03
56345	49.9	0.41±0.01	0.40±0.01	0.8±0.02	0.8±0.02
56346	85.3	0.49±0.01	0.48±0.01	1.7±0.03	1.7±0.03
56853	30.0	0.29±0.01	0.28±0.01	0.2±0.07	0.2±0.07
56855	72.6	0.59±0.01	0.56±0.01	2.6±0.05	2.6±0.05
56859	23.3	0.41±0.01	0.4±0.01	0.6±0.02	0.6±0.02
56188	32.0	0.34±0.01	0.33±0.01	0.3±0.01	0.3±0.01
56228	30.0	0.28±0.02	0.27±0.02	0.08±0.005	0.1±0.005
56345	49.9	0.30±0.01	0.28±0.01	0.3±0.009	0.3±0.009
56853	30.0	0.50±0.01	0.43±0.01	1.0±0.03	1.0±0.03
56855	72.6	0.41±0.01	0.40±0.01	0.8±0.02	0.8±0.02
56859	23.3	0.49±0.01	0.48±0.01	1.7±0.03	1.7±0.03

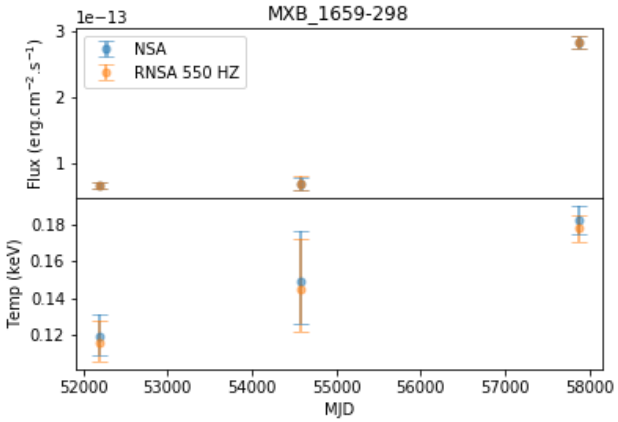
56188	32.0	0.30±0.01	0.28±0.01	0.2±0.007	0.2±0.007

4.9. MXB 1659-298

MXB 1659-29, nötron yıldızlarının kabuk soğumasına dair üzerinde en çok çalışılan kaynaklardan biridir. Çeşitli teleskoplarla uzunca süreler boyunca sakin evrede gözlemleri alınmış ve üzerine çalışılmıştır. Çalışma doğrultusunda, kaynağa ait sakin evre gözlemleri NSA ve RNSA modelleri ile modellenmiştir. Hidrojen kolon yoğunluğu Bölüm 3.2'de açıklandığı şekilde, N_H = 0.2x10^{22} cm^{-2} olarak bulunmuştur. Bu kaynağın analizinde ısısal olmayan bileşene gerek görülmemiştir. Modelleme sonucu analizde elde edilen χ^2 / dof NSA ve RNSA modelleri için sırasıyla 1.52 / 39 ve 1.01 / 39 bulunmuştur. NSA modelinin normalizasyonu, D, cismin parsek (pc) cinsinden uzaklığı olmak üzere, 1x10^{-8} olarak hesaplanmış ve analizde bu şekilde kullanılmıştır. Tayfsal parametreler Tablo 11'da, tayflar Şekil 44'de ve ışık eğrisi ise Şekil 45'da gösterilmiştir.



Şekil 44. MXB 1659-298 için sakin evre sırasında alınan gözlemlere ait tayfsal analizler. Sol kolonda NSA, sağ kolonda ise RNSA modeline ait sonuçlar verilmiştir.



Şekil 45. MXB 1659-298 'e ait ışık eğrisi. Üst tarafta bulunan panel akı; alt tarafta bulunan panel ise sıcaklığı göstermektedir. x-ekseni, MJD biriminden zamanı temsil etmektedir.

Tablo 11. MXB 1659-298'ye ait tayfsal parametreler.

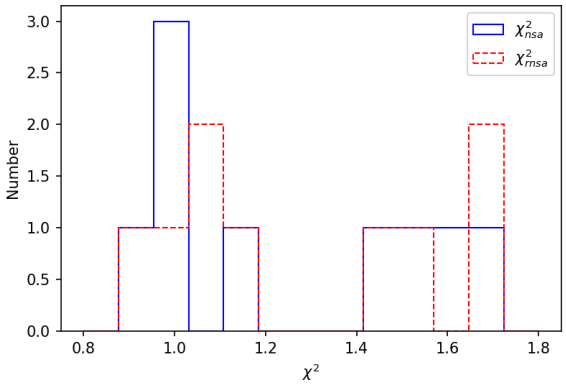
Tarih (MJD)	Poz Süresi (ks)	kT_{NSA} (keV)	kT_{RNSA} (keV)	$F_{x,NSA}$ ($x10^{-12}$ erg/cm^2/s^1)	$F_{x,RNSA}$ ($x10^{-12}$ erg/cm^2/s^1)
57868	30.1	0.18±0.007	0.18±0.007	2.83±0.1	2.84±0.1
52198	19.8	0.12±0.01	0.12±0.01	0.06±0.05	0.07±0.05
54584	28.0	0.15±0.02	0.14±0.02	0.07±0.1	0.07±0.1

5. SONUÇLAR

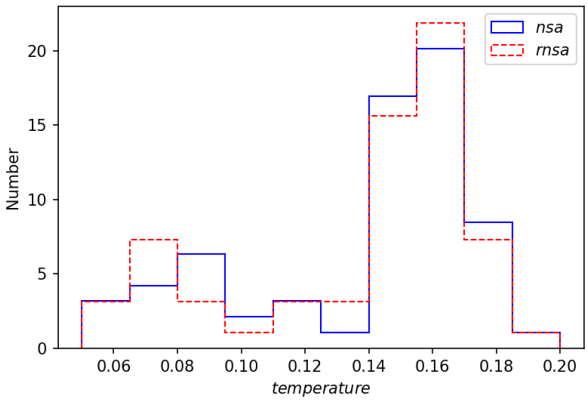
DKXÇ'ler uzun ömürleri sebebiyle çoğunlukla yaşlı nötron yıldızları barındırırlar. Bu uzun süren hayatları boyunca bileşen yıldızdan aktarılan ve yığılma diskinde Kepleryen yörüngelerde hareket eden madde tarafından açısal momentum aktarımına maruz kalarak hızlanır ve milisaniye hızlarında kendi eksenleri etraflarında dönerler. Bu yüksek hızlı dönmeleri ise, DKXÇ aşamasında yapılan X-ışın tayfsal çalışmalarında çoğunlukla ihmal edilir ve X-ışın tayfları aslen dönmeyen cisimler için geliştirilmiş olan Schwarzschild metriği kullanılarak geliştirilmiş atmosfer modelleri ile modellenir. Bu hızlı destek projesinin kapsamında, yüksek hızlarda dönmenin yarattığı rölativistik etkilerin kaynakların X-ışın tayfsal analizlerinde elde edilen bulgulardaki olası etkileri araştırılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda Chandra ve XMM-Newton gibi modern X-ışın uydularının arşivlerinde bulunan 9 farklı DKXÇ'nin sakin evrelerinde elde edilmiş veriler

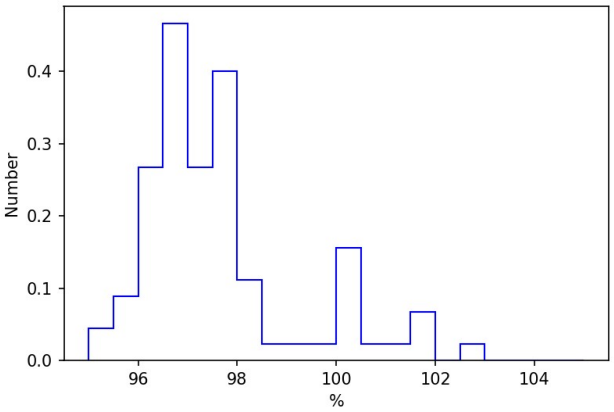
sistematik bir şekilde analiz edilmiş. Her bir gözlemden çıkarılan X-ışın tayfları hem klasik NSA modeli ile hem de proje kapsamında geliştirilen ve Bauböck (2013, 2015) çalışmalarında hesaplanan rölativistik etkilerin hesaba katıldığı RNSA modeli ile modellenmiştir. Toplamda 100'ü aşkın X-ışın tayfı analiz edilmiştir. Her bir durumda NSA ve RNSA modelleri için elde edilen χ ve sıcaklık değerlerinin histogramları Şekli 46 ve 47'de verilmiştir. Görülebileceği üzere RNSA modeli NSA modelinde istatistik olarak anlamlı bir iyileşme sağlamamıştır. Yine de elde edilen yüzey sıcaklığı değerleri yaklaşık %3 kadar farklı çıkmaktadır (bkz. Şekil 48). NSA modeli çerçevesinde kütleçekimsel kırmızıya kayma zaten hesaba katıldığı için bu fark Doppler ivmelenmesi ve alan sürüklenmesi gibi ikincil etkilerden ötürüdür. Her ne kadar belirgin bir fark var gibi görünse de henüz bu farkın soğuma eğrilerinde önemli bir değişime yol açıp açmayacağı çalışılamamıştır. Çalışmalarımıza devam etmeyi planlamaktayız ve bu sonuçların soğuma eğrilerine etkileri üzerine de eğileceğiz. Ancak unutulmamalıdır ki, soğuma çalışmaları asıl olarak soğuma hızı üzerinden yapılmaktadır. Çalışmamız boyunca iki model arasında istatistiksel limitler dahilinde hep aynı farkı bulmamız soğuma hızının değişmediği sadece tüm sıcaklık değerlerinin sabit bir şekilde azaldığı ya da arttığını göstermektedir. Bu durumda soğuma hızlarında önemli bir değişiklik olmayacağı yani RNSA modelini kullanmanın tek başına soğuma eğrilerinde önemli bir farklılık yaratmayacağı çıkarılabilir. Bu durum Bulgular kısmında verilen NSA ve RNSA modelleri ile elde edilmiş soğuma eğrilerinin benzerliğinden de anlaşılabilmektedir.



Şekil 46. RNSA ve NSA χ2 verilerini karşılaştırması.



Şekil 47. Tayfsal analiz sonucu elde edilen RNSA ve NSA sıcaklıklarının karşılaştırması.



Şekil 48. RNSA ve NSA sıcaklık farklarının yüzde cinsinden dağılımı.

5.1. İNCELENEN NOTRON YILDIZLARININ KÜTLE VE YARIÇAPLARI ÜZERINE LİMİTLER

Nötron yıldızlarının yıldız evrimi ve benzeri astrofiziksel konulardaki önemleri kadar bir başka önemleri de yoğun madde fiziği için önemli bir laboratuvar ortamı olmalarıdır. Yaklaşık 10km yarıçap ve Güneş'in 1.4 katı kütleleri ile Evren'de hala yüzeyi olan en yoğun madde nötron yıldızı maddesidir ve nötron yıldızlarının merkezi yoğunlukları ve buradaki maddenin kompozisyonu hala tam olarak bilinememektedir (bkz. Özel & Freire 2016). Her ne kadar bir nötron yıldızının merkezindeki yoğunluk, oradaki parçacık kompozisyonu ya da parçacıkların birbirleri ile nasıl etkileştiği gibi konuları doğrudan ölçmek mümkün değilse de, genel rölativistik Tolman-Oppenheimer-Volkoff denklemleri nötron yıldızlarının global ve en azından prensipte ölçülebilir olan kütle ve yarıçapları ile nötron yıldızının içindeki maddenin hal denklemini birbirine bağlar. Böylece nötron yıldızlarının kütle ve yarıçaplarının gözlemsel yöntemler ile ölçülebilmesi nötron yıldızı maddesinin hal denkleminin bulunabilmesi ve

dolayısıyla da parçacık kopmozisyonu ve bunların birbirleri ile etkileşmelerinin anlaşılması için son derece büyük önem arz etmektedir.

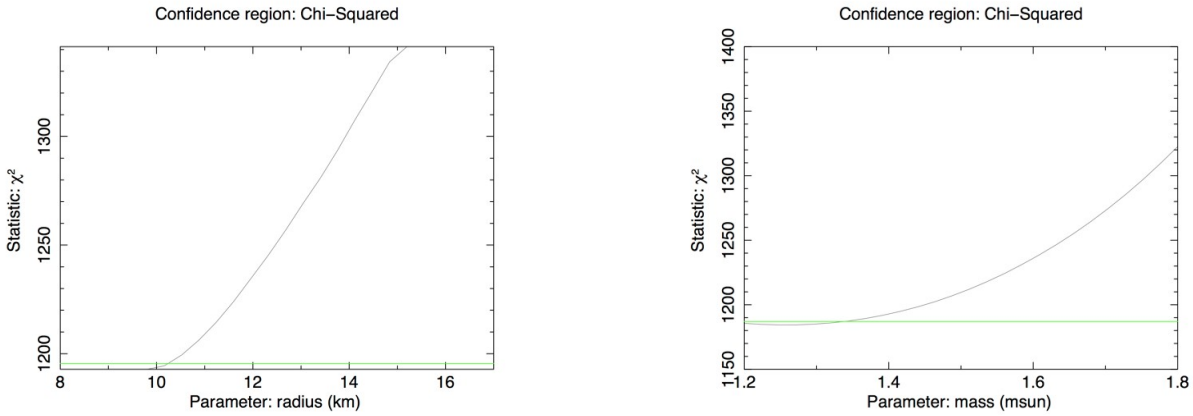
Bu sebepler ile nötron yıldızlarının kütle ve yarıçaplarının gözlemsel olarak belirlenmesi önemli bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmalar, bazen çift nötron yıldızlarının radyo bandındaki gözlemlerine dayanmaktadır, ancak her ne kadar çok hassas olsa da bu çalışmalar nötron yıldızlarının sadece kütleleri ile ilgili doğrudan bilgi sağlarlar. Bu sebeple, özellikle son yıllarda X-ışın gözlemlerine dayanmaktadır. Düşük kütleli X-ışın çiftleri ve bu sistemlerdeki nötron yıldızlarının yüzeylerinden gelen ısısal ışınım nötron yıldızının kütle ve yarıçapına limit koymak için kullanılabilmektedir, tabii eğer uzaklık, görüş doğrultusundaki hidrojen kolon yoğunluğu, nötron yıldızı yüzeyindeki atmosferin kompozisyonu ya da özellikleri doğru şekilde bilinebilirse (bkz. ör. Baillot d'Etivaux, vd. 2019; Özel & Freire 2016; Özel vd. 2016; Heinke vd. 2014). Tüm bu bağımsız yollardan belirlenebilmesi çok zor parametreler belirlenebilse bilse nötron yıldızları rölativistik cisimler olduğu için örneğin kütleçekimsel kırmızıya kayma sebebiyle gözlenen ısısal ışınım hep kütle ve yarıçapın bir fonksiyonu olmakta ve bu sebeple tek başına kütle ve yarıçapın belirlenmesi mümkün olamamaktadır. Bunun yerine Kütle-Yarıçap uzayında bir bant şeklinde bölge istatistik olarak X-ışın tayflarına yapılan modelleme ile işaretlenmekte ya da kütle ya da yarıçaptan birisi sabit alınarak diğeri belirlenmektedir. Bu engeli aşmanın yollarından birisi düşük kütleli X-ışın çiftlerinden gözlenen termonükleer X-ışın patlamalarındaki iki gözlemsel olayı (Eddington Limitine ulaşma anındaki akı ve soğuma evresindeki ışınım yapan görünen yarıçapın ölçümü) kullanmaktır (bkz. ör., Özel 2006, Güver vd. 2010, Özel vd. 2016, Bogdanov vd. 2016; Nattila, vd. 2016). Yine de bu ölçümlerde gerek atmosferik kompozisyondaki belirsizlikler, gerekse yine uzaklık ve benzeri sistemden bağımsız belirsizlikler önemli bir rol oynamaktadır (bazı sistematik durumlar hakkında detaylı bilgi için bkz. Güver vd. 2012a, 2012b, 2016).

Projemiz kapsamında yapılan çalışmalarda aslında dolaylı olarak kütle ve yarıçap değerlerinin belirlenebilmesine yardımcı olacak işler yapılmıştır. Bu sebeple proje başvurumuzda ısısal ışınımı incelenen nötron yıldızlarının kütle ve yarıçaplarına limitler konmasına dair çalışmalarda da bulunacağına değinilmiştir. Yukarıda da belirtildiği gibi X-ışın bölgesinde yapılan çalışmalar nötron yıldızlarının yarıçaplarının belirlenmesine yönelik en umut veren çalışmalar olsalar da pek çok dezavantajları da bulunmaktadır. Bunların başında sistemlerin çoğunun uzaklıklarının bağımsız yollar ile hassas bir şekilde belirlenememiş olması, görüş doğrultusundaki yıldızlararası madde miktarının net olarak bilinmemesi, atmosferik kompozisyonun bilinmemesi ve proje kapsamında düşük kütleli X-ışın çiftlerinin sakin evreleri incelendiği için gözlem verilerinin sinyal – gürültü oranlarının genellikle düşük olması gelmektedir.

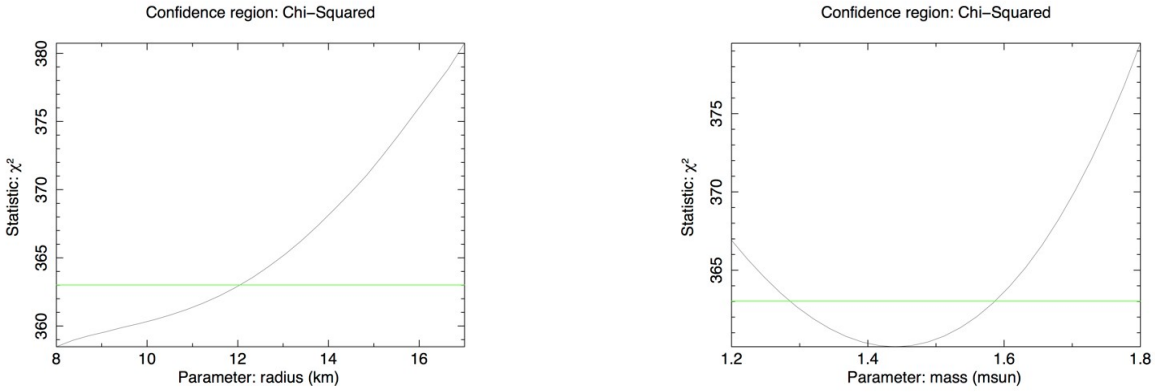
Bütün bu olası problemlere rağmen proje kapsamında bazı sistemler (Aql X-1, Cen X-4, MAXI J0556-332, EXO 0748-676, XTE J1701-462) kütle yarıçap parametreleri açısından da incelenmiştir. Bu çalışma yapılırken her bir X-ışın tayfında bulunan sıcaklık parametreleri serbest bırakılmış ve kütle ve/veya yarıçap parametreleri serbest bırakılarak bu parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Yukarıda değinilen eksikliklerin de etkisiyle her bir kaynakta aynı başarıma ulaşılamamış ve sadece bazı kaynaklarda anlamlı olabileceği düşünülen değerlere ulaşılmıştır. Örneğin MAXI J0556-332'deki nötron yıldızı için M=1.4 $M_\odot$ için, sadece 1 sigmada, R < 10.5 km gibi bir limit bulunabilmiştir. Öte yandan aynı nötron yıldızının kütlesi, R = 10.0 km için, 1.26 +/- 0.05 $M_\odot$ olarak belirlenebilmiştir (bkz. Şekil 49). Benzer şekilde Aql X-1'daki nötron yıldızının yarıçapı için, M=1.4 $M_\odot$ için, sadece 1 sigmada, R < 12 km gibi bir limit bulunabilmiştir. Öte yandan aynı nötron yıldızının kütlesi, R = 10.0 km için, 1.44 +/- 0.09 $M_\odot$ olarak belirlenebilmiştir (bkz. Şekil 50). İncelenen sistemler için eldeki veriler hassas bir şekilde kütle ve yarıçapın belirlenmesine imkan vermemektedir. Bunun sebebi yukarıda değinildiği gibi görünen yarıçapın doğrudan bir fonksiyonu olan uzaklığın doğru şekilde

belirlenmemiş olması ya da yine tayfsal analizde modellemenin içinde doğrudan katkı yapan Hidrojen kolon yoğunluğu parametresinin etkileri olabilir.

Unutulmaması gereken bir diğer faktör de her ne kadar literatürde NSA modeli sıklıkla kütle ve yarıçap ölçümü için kullanıldıysa da aslında modelin amacı bu parametreleri belirlemek değildir böyle olunca bizim modelimiz RNSA'de bu anlamda önemli bir eksiği içinde barındırmaktadır. NSA modeli hazırlanırken oluşturulan radyatif transfer denklemi çıktıları hep tek bir yüzey çekim ivmesi için hesaplanmıştır. Bu da anlaşılabileceği gibi aslında belirli bir küte-yarıçap ikilisine denk gelmektedir. Kütle ve yarıçap ölçümü yapılırken kullanılması gereken model farklı daha atmosferik ışınım hesaplanırken farklı yüzey çekim ivmelerini de içinde barındırmalıdır. Bu anlamda kullanılan modellerden birisi NSAGRAV isimli modeldir (Zavlin vd. 1996). Bu model içinde dönmenin etkilerinin hesaba katıldığı bir versiyon üzerinde ekibimiz çalışmalarını tamamlamış ancak henüz bu modelin testleri devam etmektedir.



Şekil 49 MAXI J0556-332 için yarıçap (sol panel) ve kütleye (sağ panel) dair güvenirlik eğrileri.



Şekil 50 Aql X-1 için yarıçap (sol panel) ve kütleye (sağ panel) dair güvenirlik eğrileri.

Sonuç olarak proje kapsamında yapılan çalışmalar ile RNSA isminde yeni bir model geliştirilmiş ve XSPEC'e adapte edilmiştir. Proje kapsamında yapılan çalışmaların son kontrollerinin ardından bu sonuçların yayına hazırlanması konusunda da çalışmalarımız devam edecektir. Henüz yayın aşamasına olduğumuz için paylaşılmadı ancak yakında XSPEC programının yazarı Keith Arnaud ile görüşerek modelimizin XSPEC içinde standart dağıtılan modellerden biri olmasını sağlamayı planlamaktayız. Ayrıca bu çalışmaları ana konusu olarak belirlemiş fakat özellikle bu cisimlerin soğuma eğrilerine odaklanmış bir yüksek lisans tezi de tamamlanma aşamasındadır.

Kaynaklar Listesi

Abbott, B. P. vd. 2017, "Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A", The Astrophysical Journal Letters, Cilt 848, Sayı 2, Sayfa 27.

Aguilera, D. N.; Pons, J. A.; Miralles, J. A., 2008. “2D Cooling of magnetized neutron stars”, Astronomy and Astrophysics, Cilt 486, Sayı 1, Sayfa 255-271.

Aguilera, D. N.; Pons, J. A.; Miralles, J. A. 2008b.” The Impact of Magnetic Field on the Thermal Evolution of Neutron Stars”, The Astrophysical Journal Letters, Cilt 673, Sayı 2.

Aguilera, D. N.; Cirigliano, V.; Pons, J. A.; Reddy, S.; Sharma, R., 2009.” Superfluid Heat Conduction and the Cooling of Magnetized Neutron Stars”, Physical Review Letters, Cilt 102, Sayı 9.

Arnaud, K. A., 1996. “XSPEC: The First Ten Years”, Astronomical Data Analysis Software and Systems V, A.S.P. Conference Series, Cilt 101, Sayfa 17.

Asai, K., Dotani, T., Kunieda, H., ve Kawai, N. 1996a. "ASCA Observation of the Rapid Burster in Quiescence", Publications of the Astronomical Society of Japan, Cilt 48, Sayfa L27-L31.

Asai, K., Dotani, T., Mitsuda, K., vd. 1996b. "ASCA Observation of the Rapid Burster in Quiescence", Publications of the Astronomical Society of Japan, Cilt 48, Sayfa L27-L31.

Asai, K., Dotani, T., Hoshi, R., vd. 1998. "ASCA Observations of Transient X-Ray Sources in Quiescence", Publications of the Astronomical Society of Japan, Cilt 50, Sayfa 611-619.

Baiyln, C., 1998, "Observations of a New Outburst of AQL X-1 or CEN X-4", RXTE Proposal #30073, bib. code: 1998rxte.prop30073B.

Baillot d'Etivaux, N.; Guillot, S.; Margueron, J.; Webb, N. A.; Catelan, M.; Reisenegger, A., “New constraints on the nuclear equation of state from the thermal emission of neutron stars in quiescent low-mass X-ray binaries”, eprint arXiv:1905.01081

Bauböck, M.; Psaltis, D.; Özel, F.; Johannsen, T., 2012. “A Ray-tracing Algorithm for Spinning Compact Object Spacetimes with Arbitrary Quadrupole Moments. II. Neutron Stars”, The Astrophysical Journal, Cilt 753, Sayı 2, Sayfa 8.

Bauböck, M.; Berti, E.; Psaltis, D.; Özel, F., 2013. “Relations between Neutron-star Parameters in the Hartle-Thorne Approximation”, The Astrophysical Journal, Cilt 777, Sayı 1, Sayfa 6.

Bauböck, M.; Özel, F.; Psaltis, D.; Morsink, S. M., 2015. “Effects of Spot Size on Neutron-Star Radius Measurements from Pulse Profiles”, The Astrophysical Journal, Cilt 811, Sayı 2, Sayfa 8.

Bauböck, M.; Özel, F.; Psaltis, D.; Morsink, S. M., 2015, “Rotational Corrections to Neutron-star Radius Measurements from Thermal Spectra”, The Astrophysical Journal, Cilt 799, Sayı 1, Sayfa 9.

Baym, G.; Pethick, C., 1975, "Neutron Stars", Annual Review of Nuclear Science, Cilt. 25, Sayfa 27-77.

Baym, G.; Pethick, C., 1979, "Physics of Neutron Stars", Annual review of astronomy and astrophysics, Cilt 17, Sayfa 415-443.

Brown, E. F., Bildsten, L., Rutledge, R. E. 1998, "Crustal Heating and Quiescent Emission from Transiently Accreting Neutron Stars", The Astrophysical Journal, Cilt 504, Sayı 2, Sayfa L95-L98.

Brown, E. F.; Bildsten, L.; Chang, P., 2002. “Variability in the Thermal Emission from Accreting Neutron Star Transients”, The Astrophysical Journal, Cilt 574, Sayı 2, Sayfa 920-929.

Bogdanov, S.; Heinke, C. O.; Özel, F.; Güver, T., 2016, “Neutron Star Mass-Radius Constraints of the Quiescent Low-mass X-Ray Binaries X7 and X5 in the Globular Cluster 47 Tuc”, The Astrophysical Journal, Cilt 831, Sayı 2, article id. 184, 11 sayfa.

Cackett, E. M.; Wijnands, R.; Heinke, C. O.; Edmonds, P. D.; Lewin, W. H. G.; Pooley, D.; Grindlay, J. E.; Jonker, P. G.; Miller, J. M., 2005. “X-Ray Variability during the Quiescent State of the Neutron Star X-Ray Transient in the Globular Cluster NGC 6440”, The Astrophysical Journal, Cilt 620, Sayı 2, Sayfa 922-928.

Campana, S., Colpi, M., Mereghetti, S., Stella, L., Tavani, M. 1998a, "The neutron stars of Soft X-ray Transients", The Astronomy and Astrophysics Review , Cilt 8 , Sayı 4, Sayfa 279-316.

Campana, S., Stella, L., Mereghetti, S., Colpi, M., Tavani, M., Ricci, D., Fiume, D. D., & Belloni, T. 1998b., "Aquila X-1 from Outburst to Quiescence: The Onset of the Propeller Effect and Signs of a Turned-on Rotation-powered Pulsar", The Astrophysical Journal, Cilt 499, Sayı 1, Sayfa L65-L68.

Campana, S.; Stella, L., 2000. “On the Bolometric Quiescent Luminosity and Luminosity Swing of Black Hole Candidate and Neutron Star Low-Mass X-Ray Transients”, The Astrophysical Journal, Cilt 541, Sayı 2, Sayfa 849-859.

Campana, S.; Stella, L.; Mereghetti, S.; Cremonesi, D. 2000. "BeppoSAX observation of Cen X-4 in quiescence", Astronomy and Astrophysics, Cilt 358, Sayfa 583-586.

Campana, S.; Stella, L.; Israel, G. L.; Moretti, A.; Parmar, A. N.; Orlandini, M., 2002. “The Quiescent X-Ray Emission of Three Transient X-Ray Pulsars”, The Astrophysical Journal, Cilt 580, Sayı 1, Sayfa 389-393.

Campana, S., Stella, L., Gastaldello, F. et al. 2002a, "An XMM-Newton Study of the 401 Hz Accreting Pulsar SAX J1808.4-3658 in Quiescence", The Astrophysical Journal, Cilt 575, Sayı 1, Sayfa L15-L19.

Campana, S.; Stella, L., 2003. “The Evolution of the High-Energy Tail in the Quiescent Spectrum of the Soft X-Ray Transient Aquila X-1”, The Astrophysical Journal, Cilt 597, Sayı 1, Sayfa. 474-478.

Campana, S.; D'Avanzo, P.; Casares, J.; Covino, S.; Israel, G. L.; Marconi, G.; Hynes, R.; Charles, P.; Stella, L., 2004. “Indirect Evidence of an Active Radio Pulsar in the Quiescent State of the Transient Millisecond Pulsar SAX J1808.4-3658”, The Astrophysical Journal, Cilt 614, Sayı 1, Sayfa L49-L52.

Colpi, M., Geppert, U., Page, D., Possenti, A. 2001, "Charting the Temperature of the Hot Neutron Star in a Soft X-Ray Transient", The Astrophysical Journal, Cilt 548, Sayı 2, Sayfa L175-L178.

Corbet, R. H. D., 1996. “Transient X-Ray Sources, Luminosity Gaps, and Neutron Star Densities”, Astrophysical Journal Letters, Cilt. 457, Sayfa. L31.

Daigne, F.; Goldoni, P.; Ferrando, P.; Goldwurm, A.; Decourchelle, A.; Warwick, R. S. 2002. "XMM-Newton observation of the bursting pulsar GRO J1744-28 in quiescence", Astronomy and Astrophysics, Cilt 386, Sayfa 531-534.

D’Angelo, C. R., Fridriksson, J. K., Messenger, C., Patruno, A. 2015, "The radiative efficiency of a radiatively inefficient accretion flow", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Cilt 449, Sayı 3, Sayfa 2803-2817.

Degenaar, N.; Wolff, M. T.; Ray, P. S.; Wood, K. S.; Homan, J.; Lewin, W. H. G.; Jonker, P. G.; Cackett, E. M.; Miller, J. M.; Brown, E. F.; Wijnands, R. 2011. "Further X-ray observations of EXO 0748-676 in quiescence: evidence for a cooling neutron star crust", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Cilt 412, Sayı 3, Sayfa 1409-1418.

Degenaar, N.; Wijnands, R., 2011b. “The soft quiescent spectrum of the transiently accreting 11-Hz X-ray pulsar in the globular cluster Terzan 5”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Mektuplar, Cilt 412, Sayı 1, Sayfa L68-L72.

Degenaar, N., Patruno, A., Wijnands, R. 2012a, "The Quiescent X-Ray Properties of the Accreting Millisecond X-Ray Pulsar and Eclipsing binary Swift J1749.4-2807", The Astrophysical Journal, Cilt 756, Sayı 2, Sayfa 7.

Freeman, P.; Doe, S.; Siemiginowska, A., 2001. “Sherpa: a mission-independent data analysis application”, Proc. SPIE, Cilt 4477, Sayfa 76-87.

Edgar, R., 2004. “A review of Bondi-Hoyle-Lyttleton accretion”, New Astronomy Reviews, Cilt 48, Sayı.10, Sayfa. 843-859.

Fujimoto, M. Y., Hanawa, T., Iben, I., Jr., Richardson, M. B. 1984, "Thermal evolution of accreting neutron stars", Astrophysical Journal, Cilt 278, Sayfa 813-824.

Galloway, D. K.; Muno, M.P.; Hartman, J. M.; Psaltis, D.; Chakrabarty, D., 2008. “Thermonuclear (Type I) X-Ray Bursts Observed by the Rossi X-Ray Timing Explorer”, The Astrophysical Journal Supplement Series, Cilt 179, Sayı 2.

Garcia, M. R.; Callanan, P. J. 1999. "Two Neutron Star Soft X-Ray Transients in Quiescence: 4U 2129+47 and EXO 0748-676", The Astronomical Journal, Cilt 118, Sayı 3, Sayfa 1390-1394.

Güver, T.; Özel, F.; Cabrera-Lavers, A.; Wroblewski, P., 2010, “The Distance, Mass, and Radius of the Neutron Star in 4U 1608-52”, The Astrophysical Journal, Cilt 712, Sayı 2, Sayfa 964-973

Güver, T.; Psaltis, D.; Özel, F., 2012, “Systematic Uncertainties in the Spectroscopic Measurements of Neutron-star Masses and Radii from Thermonuclear X-Ray Bursts. I. Apparent Radii”, The Astrophysical Journal, Cilt 747, Sayı 1, article id. 76, 16 sayfa.

Güver, T.; Özel, F.; Psaltis, D., 2012, “Systematic Uncertainties in the Spectroscopic Measurements of Neutron-star Masses and Radii from Thermonuclear X-Ray Bursts. II. Eddington Limit”, The Astrophysical Journal, Cilt 747, Sayı 1, article id. 77, 12 sayfa.

Güver, T.; Özel, F.; Marshall, H.; Psaltis, D.; Guainazzi, M.; Díaz-Trigo, M., 2016, “Systematic Uncertainties in the Spectroscopic Measurements of Neutron-star Masses and Radii from Thermonuclear X-Ray Bursts. III. Absolute Flux Calibration”, The Astrophysical Journal, Cilt 829, Sayı 1, article id. 48, 14 sayfa.

Haensel, P., Zdunik, J. L. 1990b, "Equation of state and structure of the crust of an accreting neutron star", Astronomy and Astrophysics, Cilt 229, Sayı 1, Sayfa 117-122.

Hartle, J. B.; Thorne, K. S., 1968. “Slowly Rotating Relativistic Stars. II. Models for Neutron Stars and Supermassive Stars”, Astrophysical Journal, Cilt 153, Sayfa 807.

Heinke, C. O.; Rybicki, G. B.; Narayan, R.; Grindlay, J. E., 2006. “A Hydrogen Atmosphere Spectral Model Applied to the Neutron Star X7 in the Globular Cluster 47 Tucanae”, The Astrophysical Journal, Cilt 644, Sayı 2, pp. 1090-1103.

Heinke, C. O.; Cohn, H. N.; Lugger, P. M.; Webb, N. A.; Ho, W. C. G.; Anderson, J.; Campana, S.; Bogdanov, S.; Haggard, D.; Cool, A. M.; Grindlay, J. E., 2014, “Improved mass and radius constraints for quiescent neutron stars in ω Cen and NGC 6397”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Cilt 444, Sayı 1, sayfa 443-456

Heiselberg, H.; Pandharipande, V., 2000, "Recent Progress in Neutron Star Theory", Annual Reviews of Nuclear and Particle Science, Cilt 50, Sayı 481-524.

Jonker, P. G.; Méndez, M.; Nelemans, G.; Wijnands, R.; van der Klis, M. 2003. "Chandra observations of the neutron star soft X-ray transient RX J170930.2-263927 returning to quiescence", Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, Cilt 341, Sayı 3, Sayfa 823-831.

Jonker, P. G., Buxton, M., McClintock, J. E., 2004a, “Optical counterpart of XTE J1709-267”, The Astronomer’s Telegram, Cilt 262, 1

in't Zand, J. J. M.; van Kerkwijk, M. H.; Pooley, D.; Verbunt, F.; Wijnands, R.; Lewin, W. H. G. 2001., "Identification of the Optical and Quiescent Counterparts to the Bright X-Ray Transient in NGC 6440", The Astrophysical Journal, Cilt 563, Sayı 1, Sayfa L41-L44.

Lattimer, J. M.; Prakash, M., 2001. “Neutron Star Structure and the Equation of State”, The Astrophysical Journal, Cilt 550, Sayı 1, Sayfa 426-442.

Menou, K.; Esin, A. A.; Narayan, R.; Garcia, M. R.; Lasota, J. P.; McClintock, J. E,1999. “Black Hole and Neutron Star Transients in Quiescence”, The Astrophysical Journal, Cilt 520, Sayı 1, Sayfa 276-291.

Menou, K.; McClintock, J. E., 2001. “The Quiescent Emission Spectrum of Centaurus X-4 and Other X-Ray Transients Containing Neutron Stars”, The Astrophysical Journal, Cilt 557, Sayı 1, Sayfa 304-310.

Miralda-Escude, J., Paczynski, B., Haensel, P. 1990, "Thermal Structure of Accreting Neutron Stars and Strange Stars", Astrophysical Journal Cilt 362, Sayı 572

Morsink, S. M.; Leahy, D. A.; Cadeau, C.; Braga, J., 2007. “The Oblate Schwarzschild Approximation for Light Curves of Rapidly Rotating Neutron Stars”, The Astrophysical Journal, Cilt 663, Sayı 2, Sayfa 1244-1251.

Nättilä, J.; Steiner, A. W.; Kajava, J. J. E.; Suleimanov, V. F.; Poutanen, J., 2016, “Equation of state constraints for the cold dense matter inside neutron stars using the cooling tail method”, Astronomy & Astrophysics, Cilt 591, id.A25, 23 sayfa.

Nowak, Michael A.; Heinz, Sebastian; Begelman, M. C., 2002. “Hiding in Plain Sight: Chandra Observations of the Quiescent Neutron Star 4U 2129+47 in Eclipse”, The Astrophysical Journal, Cilt 573, Sayı 2, Sayfa 778-788.

Ögelman, H. 1995. Sayfa 101. Lives of Neutron Stars, Editör: Alpar, M.A.; Kiziloglu, Ü. ve van Paradijs, J. Dordrecht: Kluwer.

Özel, F.; Psaltis, D.; Kaspi, V. M., 2001.“Constraints on Thermal Emission Models of Anomalous X-Ray Pulsars”, The Astrophysical Journal, Cilt 563, Sayı 1, Sayfa 255-266.

Özel, F., 2004. “A Model for the Optical/IR Emission from Magnetars”, arXiv:astro-ph/0404144.

Özel, F., 2006, “Soft equations of state for neutron-star matter ruled out by EXO 0748 – 676”, Nature, Cilt 441, Sayı 7097, sayfa 1115-1117

Özel, F.; Baym, G.; Güver T., 2010a. “Astrophysical measurement of the equation of state of neutron star matter”, Physical Review D, Cilt 82, Sayı 10.

Özel, F., 2013, "Surface emission from neutron stars and implications for the physics of their interiors", Reports on Progress in Physics, Cilt 76, Sayı 1.

Özel, F.; Freire, P., 2016. “Masses, Radii, and the Equation of State of Neutron Stars”, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Cilt 54, Sayfa 401-440.

Özel, F.; Psaltis, D.; Güver, T.; Baym, G.; Heinke, C.; Guillot, S., 2016 “The Dense Matter Equation of State from Neutron Star Radius and Mass Measurements”, The Astrophysical Journal, Cilt 820, Sayı 1, 28, 25 sayfa.

Page, D; Lattimer, James M.; Prakash, Madappa; Steiner, Andrew W. 2009. "Neutrino Emission from Cooper Pairs and Minimal Cooling of Neutron Stars", The Astrophysical Journal, Cilt 707, Sayı 2, Sayfa 1131-1140.

Page, D.; Prakash, M.; Lattimer, J. M.; Steiner, A. W., 2011. “Rapid Cooling of the Neutron Star in Cassiopeia A Triggered by Neutron Superfluidity in Dense Matter”, Physical Review Letters, Cilt 106, Sayı 8.

Ravenhall, D. G.; Pethick, C. J., 1994. “Neutron star moments of inertia”, Astrophysical Journal, Kısım 1, Cilt 424, Sayı 2, Sayfa 846-851

Pavlov, G. G.; Shibanov, Y. A.; Zavlin, V. E.; Meyer, R. D., 1995. Sayfa 71. “Neutron Star Atmospheres”, “The Lives of the Neutron Stars. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on the Lives of the Neutron Stars, Dordrecht, The Netherlands, Boston, Massachusetts: Kluwer Academic

Pechenick, K. R.; Ftaclas, C.; Cohen, J. M., 1983. “Hot spots on neutron stars - The near-field gravitational lens”, Astrophysical Journal, 1. Kısım, Cilt 274, Sayfa 846-857.

Pons, J. A.; Geppert, U., 2007. “Magnetic field dissipation in neutron star crusts: from magnetars to isolated neutron stars”, Astronomy and Astrophysics, Cilt 470, Sayı 1, Sayfa 303-315.

Pons, J. A.; Link, B.; Miralles, J. A.; Geppert, U., 2007. “Evidence for Heating of Neutron Stars by Magnetic-Field Decay”, Physical Review Letters, Cilt 98, Sayı 7.

Ravenhall, D. G.; Pethick, C. J., 1994. “Neutron star moments of inertia”, Astrophysical Journal, Kısım 1, Cilt 424, Sayı 846-851

Ritter, H.; Kolb, U., 2003. “Catalogue of cataclysmic binaries, low-mass X-ray binaries and related objects”, Astronomy and Astrophysics, Cilt 404, Sayfa 301-303.

Rutledge, R. E., Bildsten, L., Brown, E. F., Pavlov, G. G., & Zavlin, V. E. 2001a, "Quiescent Thermal Emission from the Neutron Star in Aquila X-1", The Astrophysical Journal, Cilt 559, Sayı 2, Sayfa 1054-1059.

Rutledge, R. E., Bildsten, L., Brown, E. F., Pavlov, G. G., Zavlin, V. E. 2001b, "Quiescent Thermal Emission from the Neutron Star in Aquila X-1", The Astrophysical Journal, Cilt 559, Sayı 2, Sayfa 1054-1059.

Rutledge, R. E.; Bildsten, L; Brown, E. F.; Pavlov, G. G.; E. Zavlin, V. E., 2002a. “A Possible Transient Neutron Star in Quiescence in the Globular Cluster NGC 5139”, The Astrophysical Journal, Cilt 578, Sayı 1.

Sato, K. 1979, "Nuclear Compositions in the Inner Crust of Neutron Stars", Progress of Theoretical Physics, Cilt 62, Sayı 4, Sayfa 957-968.

Steiner, A. W.; Lattimer, J. M.; Brown, E. F., 2010. “The Equation of State from Observed Masses and Radii of Neutron Stars”, The Astrophysical Journal, Cilt 722, Sayı 1, Sayfa 33-54.

Stella, L.; Campana, S.; Colpi, M.; Mereghetti, S.; Tavani, M., 1994. “Do quiescent soft X-ray transients contain millisecond radio pulsars?”, Astrophysical Journal, 2. Kısım-Mektuplar, Cilt 423, Sayı. 1, Sayfa L47-L50.

Stella, L.; Campana, S.; Mereghetti, S.; Ricci, D.; Israel, G. L. 2000. "The Discovery of Quiescent X-Ray Emission from SAX J1808.4-3658, the Transient 2.5 Millisecond Pulsar", The Astrophysical Journal, Cilt 537, Sayı 2, Sayfa L115-L118.

Strohmayer T. ve Bildsten L. 2006. Sayfa 113, Compact Stellar X-Ray Sources, Editör: Lewin, W. ve van der Klis, M., Cambridge: Cambridge University Press.

Suleimanov, V. F.; Pavlov, G. G.; Werner, K., 2012. “ Magnetized Neutron Star Atmospheres: Beyond the Cold Plasma Approximation”, The Astrophysical Journal, Cilt 751, Sayı 1, Sayfa 7.

Tomsick, J. A., Gelino, D. M., Halpern, J. P., Kaaret, P. 2004, "The Low Quiescent X-Ray Luminosity of the Neutron Star Transient XTE J2123-058", The Astrophysical Journal, Cilt 610, Sayı 2, Sayfa 33-940.

Ushomirsky, G.; Rutledge, R. E., 2001. “Time-variable emission from transiently accreting neutron stars in quiescence due to deep crustal heating”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Cilt 325, Sayı 3, Sayfa 1157-1166.

van Paradijs J., 1978. “Average properties of X-ray burst sources”, Nature, Cilt. 274, Sayfa 650-653.

Verbunt, F.; Belloni, T.; Johnston, H. M.; van der Klis, M.; Lewin, W. H. G. 1994. "ROSAT observations of soft X-ray transients in quiescence", Astronomy and Astrophysics, Cilt 285, Sayfa 903-911.

Wachter, S.; Patel, S. K.; Kouveliotou, C.; Bouchet, P.; Özel, F.; Tennant, A.F.; Woods, P. M.; Hurley, K.;Becker, W.; Slane, P., 2004. ” Precise Localization of the Soft Gamma Repeater SGR 1627–41 and the Anomalous X-Ray Pulsar AXP 1E1841–045 with Chandra”, The Astrophysical Journal, Cilt 615, Sayı 2.

Wijnands, R., Nowak, M., Miller, J. M., Homan, J., Wachter, S., & Lewin, W. H. G. 2003, "A Chandra Observation of the Neutron Star X-Ray Transient and Eclipsing Binary MXB 1659-29 in Quiescence", The Astrophysical Journal, Cilt 594, Sayı 2, Sayfa 952-960.

Wijnands, R., Heinke, C. O., & Grindlay, J. E. 2002, "A Chandra Observation of the Globular Cluster Terzan 1: The Neutron Star X-Ray Transient X1732-304 in Quiescence", The Astrophysical Journal, Cilt 572, Sayı 2, Sayfa 1002-1005.

Wijnands, R., Miller, J. M., Markwardt, C., Lewin, W. H. G., & van der Klis, M. 2001, "A Chandra Observation of the Long-Duration X-Ray Transient KS 1731-260 in Quiescence: Too Cold a Neutron Star?", The Astrophysical Journal, Cilt 560, Sayı 2, Sayı L159-L162.

Wijnands, R., Degenaar, N. Page, D., 2017, "Cooling of Accretion-Heated Neutron Stars", Journal of Astrophysics and Astronomy, Cilt 38, Sayı 3, Sayfa 16.

Wijnands, R., Heinke, C. O., Pooley, D. et al. 2005a, "The Hard Quiescent Spectrum of the Neutron Star X-Ray Transient EXO 1745-248 in the Globular Cluster Terzan 5", The Astrophysical Journal, Cilt 618, Sayı 2, Sayfa 883-890.

Wijnands, R., Degenaar, N., Armas Padilla, M.et al. 2015,"Low-level accretion in neutron star X-ray binaries", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Cilt 454, Sayı 2, Sayfa 1371-1386.

Wijnands, R., Degenaar, N., Page, D. 2013, "Testing the deep-crustal heating model using quiescent neutron-star very-faint X-ray transients and the possibility of partially accreted crusts in accreting neutron stars", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Cilt 432, Sayı 3, Sayfa 2366–2377

Woods P. M. ve Thompson C. 2006. Sayfa 547. Compact Stellar X-Ray Sources, Editör: Lewin, W. ve van der Klis, M., Cambridge: Cambridge University Press.

Yagi, K.; Yunes, N., 2013. “I-Love-Q: Unexpected Universal Relations for Neutron Stars and Quark Stars”, Science, Cilt 341, Sayı 6144, Sayfa 365-368.

Zampieri, L.; Turolla, R.; Zane, S.; Treves, A., 1995. “X-ray spectra from neutron stars accreting at low rates”, The Astrophysical Journal, 1. Kısım, Cilt. 439, Sayı 2, Sayfa 849-853.

Zavlin, V. E.; Pavlov, G. G.; Shibanov, Yu. A., 1996. “Model neutron star atmospheres with low magnetic fields. I. Atmospheres in radiative equilibrium”, Astronomy and Astrophysics, Cilt 315, Sayfa 141-152.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. TOLGA GÜVER
Proje No:	117F509
Proje Başlığı:	Süreksiz Kütle Aktarımı Yapan Nötron Yıldızlarının Soğuması
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İSTANBUL Ü. FEN F. ASTRONOMİ VE UZAY BİLİMLERİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/05/2018 - 15/05/2019
Onaylanan Bütçe:	27900.0
Harcanan Bütçe:	23886.67
Öz:	Süreksiz düşük kütleli X-ışın çiftlerinin kütle aktarımının çok düşük seviyelerde olduğu sıralardaki ışınımı asıl olarak kütle aktarımının yoğun olduğu sırada yüzeyi ısınan nötron yıldızının soğumasından ileri gelmektedir. Bu ışınım özellikle son yıllarda X-ışın teleskopları ile gözlenmiş? ve bu sayede, nötron yıldızlarının kabuk katmanlarının soğuma özellikleri dolayısıyla da fiziksel yapıları hakkında önemli bulgulara ulaşılmıştır. Ancak günümüzde bu ışınımı modellemede kullanılan tüm atmosfer modelleri nötron yıldızlarının rölativistik anlamda dönmediği varsayımı altında geliştirilmiştir. Bu durum ise, bu nötron yıldızlarının bazılarının yüksek dönme frekansları ile bir çelişki içindedir. Projemiz kapsamında yapılan çalışmalar ile, yüzey ışınımının modellenmesinde dönme kaynaklı ek rölativistik etkilerin de hesaba katıldığı yeni bir model ilk kez olarak ve sistematik bir biçimde süreksiz X-ışın çiftlerine uygulanmıştır. Böylece dönmenin nötron yıldızlarının soğuması ile ilgili bildiklerimize olan etkisi, ilgili rölativisttik etkilerin hesaba katılması ile ilk defa olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda toplamda 9 farklı düşük kütleli X-ışın çiftindeki nötron yıldızlarının soğuma verilerine uygulanan model, klasik model ile aynı başarımla verileri açıklamakta ise de %3 kadar farklı bir sıcaklık değeri vermektedir. Bu değişim sistematik gibi görünmekte ise de kaynakların soğuma eğrilerini önemli ölçüde etkilemekten uzaktır. Yapılan çalışmaların ve elde edilen bulguların yayına dönüştürülme çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışmaların yayınlanması ile birlikte modelimizi XSPEC programının model kütüphanesine eklenmesi içinde gerekli çalışmaları yapmayı planlamaktayız.
Anahtar Kelimeler:	nötron yıldızları, yüzey ışınımı, X-ışınları
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK