

Süpernova Kalıntısı 3C 396'nın X-Işın Dalga Boylarında *XRISM/Resolve* ve *Athena/X-IFU* İle İncelenmesi

Cihad DENİZ

Akdeniz Üniversitesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü

Aytap SEZER (*Avrasya Üniversitesi*)

Hicran BAKIŞ (*Akdeniz Üniversitesi*)

22. Ulusal Astronomi Kongresi

Ege Üniversitesi, İzmir

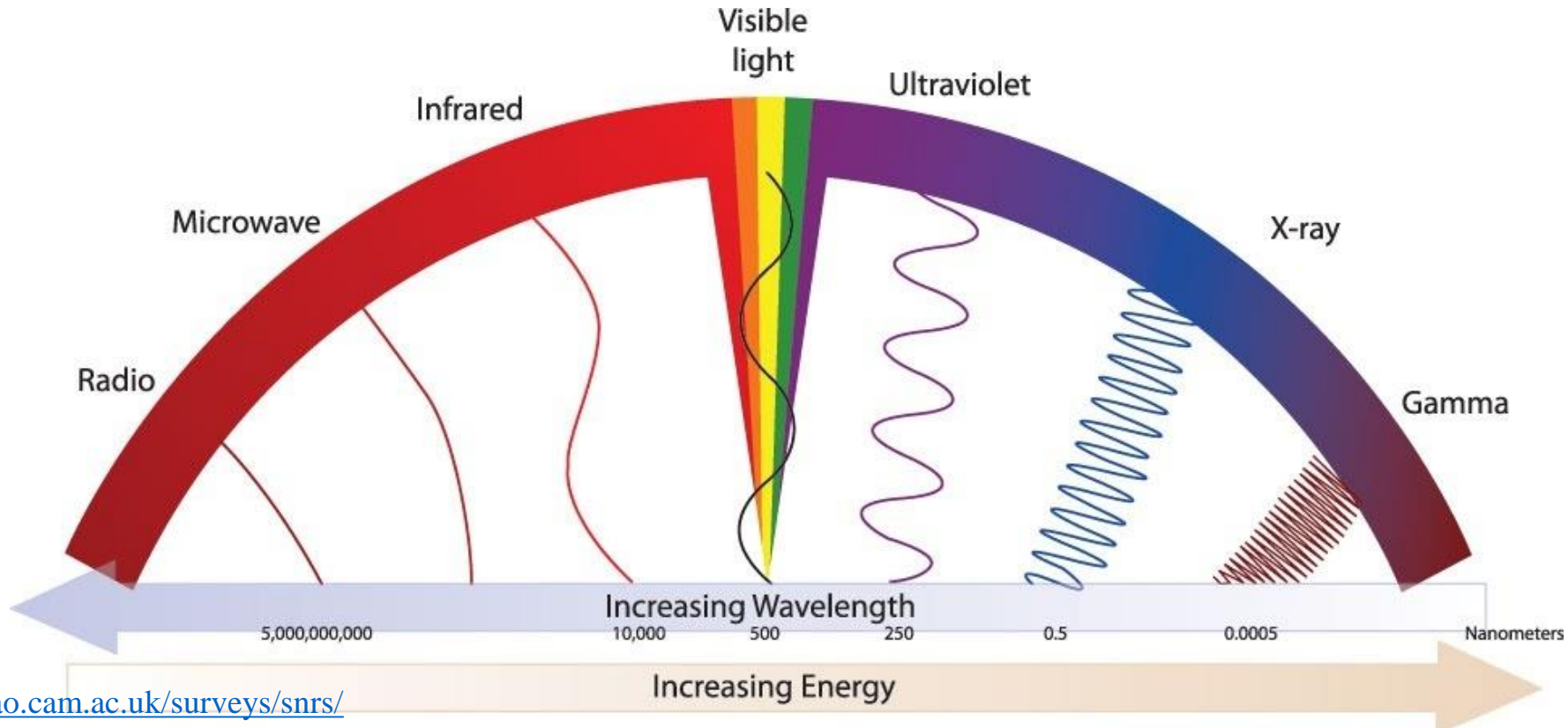
6-8 Eylül 2022

SUNU PLANI

- **Süpernovalar ve Süpernova Kalıntıları**
 1. **SNK’larda X-ışın Mekanizmaları**
 2. **Kompozit Morfolojili SNK’lar**
- **X-ışın Uyduları**
- ***Suzaku* X-ışın Uydusu (2005-2015)**
- **Gelecek nesil X-ışın Uyduları: *XRISM* ve *Athena***
- ***Suzaku*, *XRISM* ve *Athena* Uydularının Dedektör Karşılaştırması**
- **Motivasyon**
- **3C 396 Kalıntısının Literatür Özeti**
- ***Suzaku* X-ışın Gözlem Verileri**
- **X-ışın Verilerini İndirgeme**
- ***Suzaku*/XIS Görüntüsü**
- ***Suzaku*/XIS Tayfı**
- ***XRISM* ve *Athena* Simülasyonları**
- **SNK Kabuğundan Gelen Tayfın *XRISM*/Resolve Simülasyonu**
- **SNK Kabuğundan Gelen Tayfın Simülasyonu**
- **PWN’den Gelen Tayfın *XRISM*/Resolve Simülasyonu**
- **PWN’den Gelen Tayfın *Athena*/X-IFU Simülasyonu**
- ***Athena*/X-IFU ve *Suzaku*/XIS Tayflarının Karşılaştırılması**
- **Sonuçlar**

Süpernovalar ve Süpernova Kalıntıları

- Süpernovalar (SN) evrendeki en büyük enerjili (tipik olarak $\sim 10^{51}$ erg) patlamalardan birisidir.
- Bir süpernova kalıntısı (SNK), süpernova patlaması sonucunda oluşur.
- SNK'lar genişleyen bir şok dalgası, atılan yıldız maddesi ve süpürülen yıldızlararası maddeden olmak üzere üç ana kısımdan oluşur.
- Galaksimizde yaklaşık 300 SNK bulunmaktadır (Green SNK Kataloğu¹)
- SNK'lar düşük frekanslı radyo dalgalarından TeV gama ışınlarına kadar geniş bir aralıkta ışımaya yaparlar.

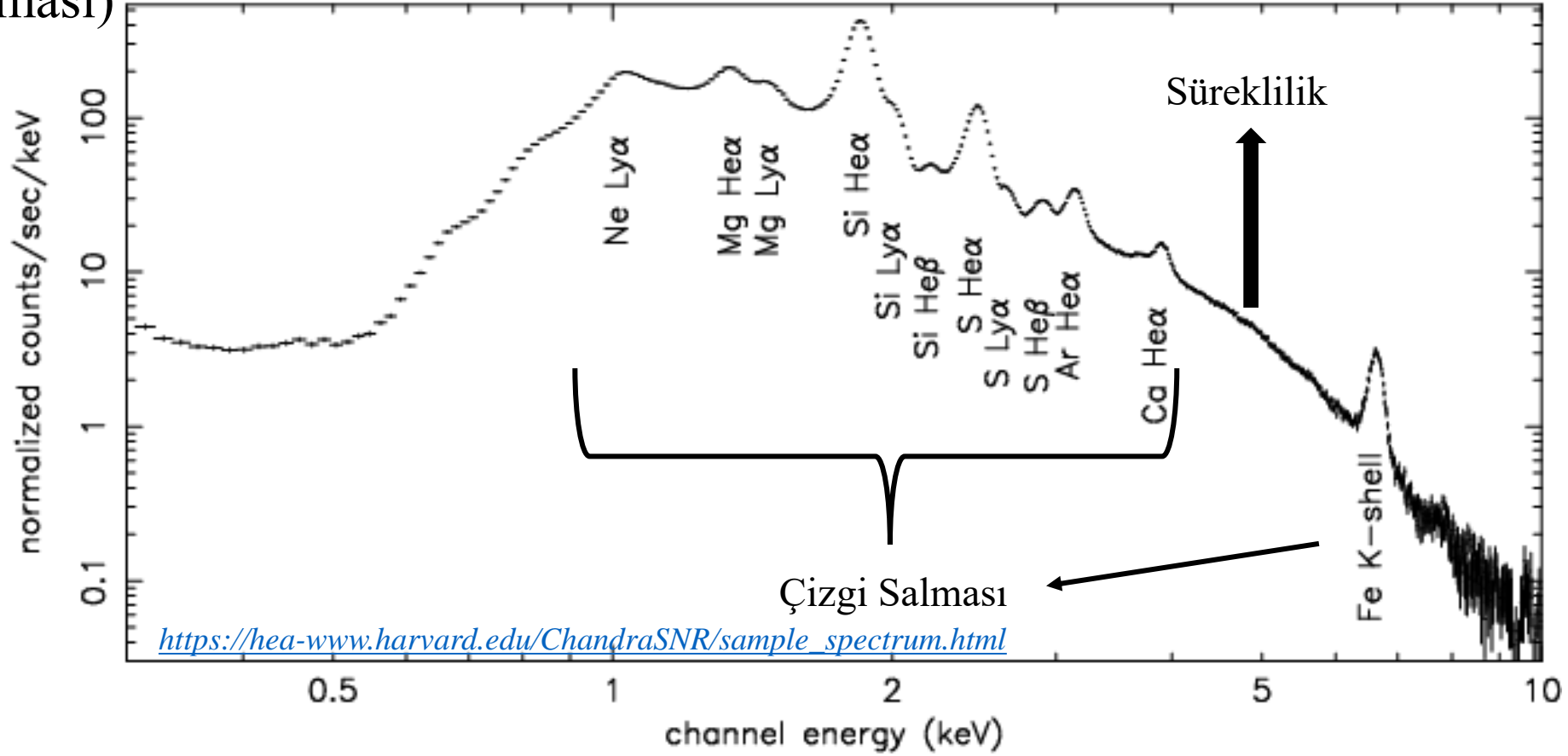


SNK'larda X-ışın Mekanizmaları

- SNK'lardan gelen ışığa kökenine göre iki sınıfta incelenir:

I. Isısal ışığa (bremsstrahlung ve çizgi salması)

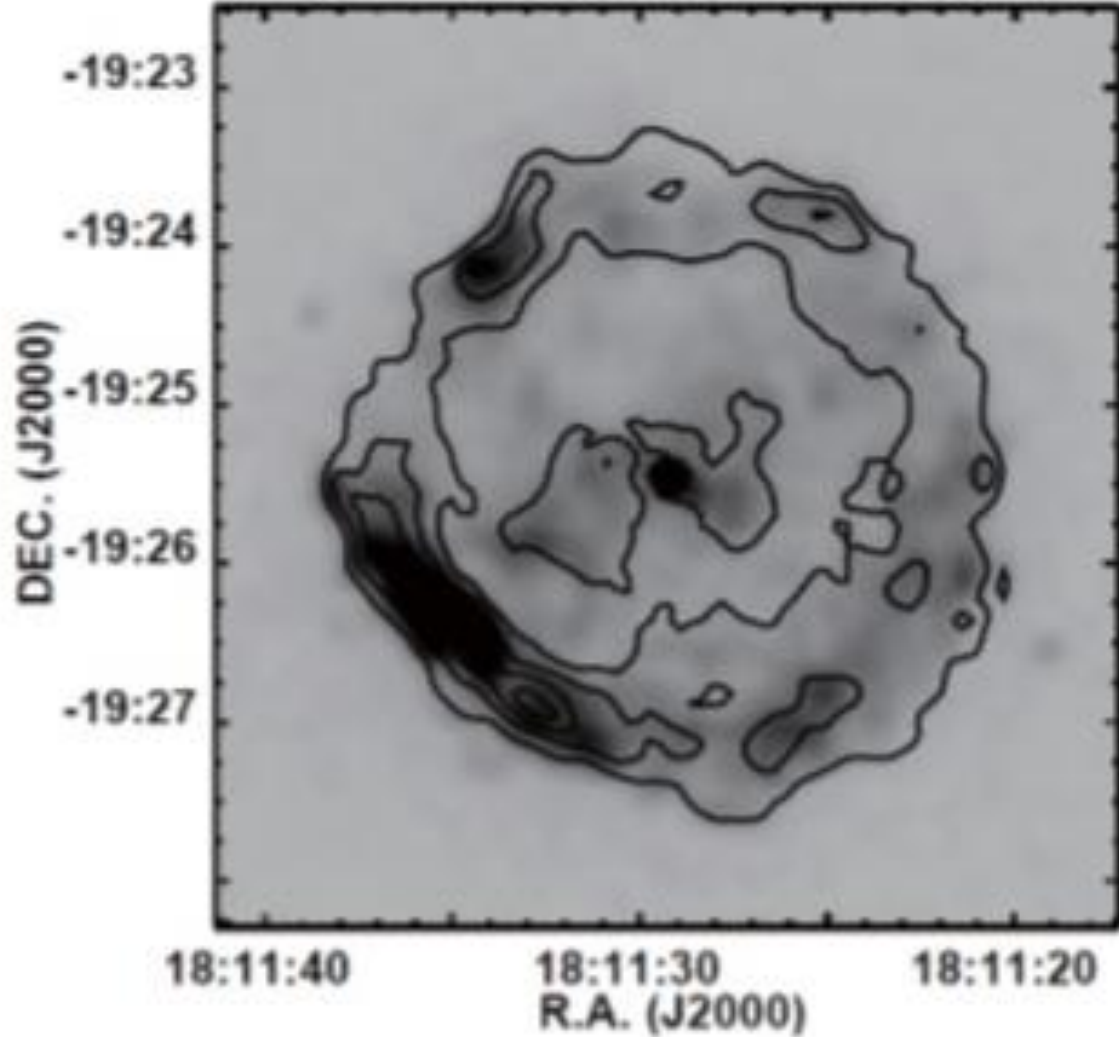
II. Isısal olmayan ışığa (sinkrotron ışığı)



Şekil 1. SNK Cas A'nın *Chandra* ACIS-S3 dedektörü ile alınmış tayfı. Tayfta süreklilik ve çizgi salmaları açıkça görülebilmektedir.

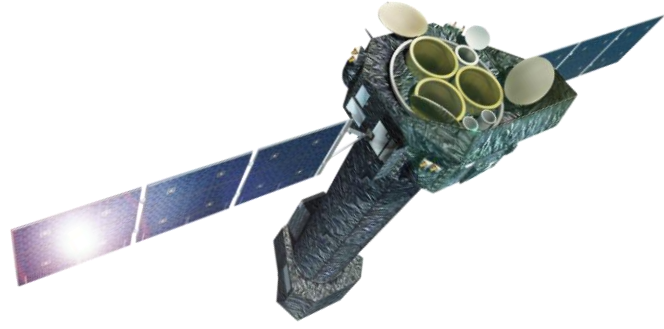
Kompozit Morfolojili SNK'lar

G11.2-0.3



Şekil 2. G11.2-0.3 kompozit morfolojili SNK'sının görüntüsü. Gri ölçek X-ışınlarını, kontürler ise radyo ışınmasını temsil eder.

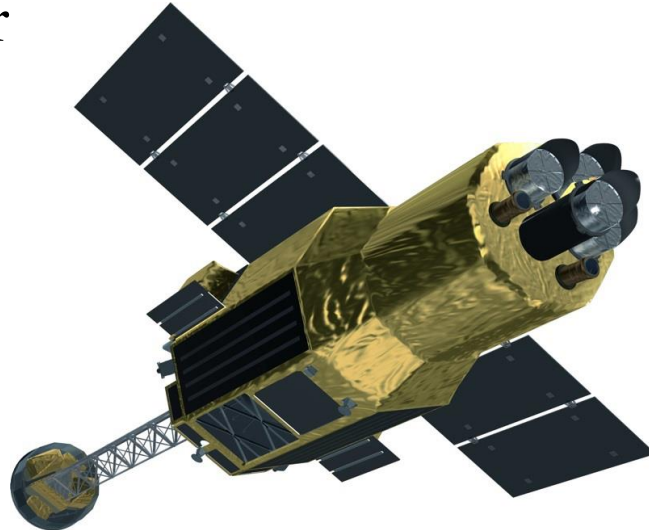
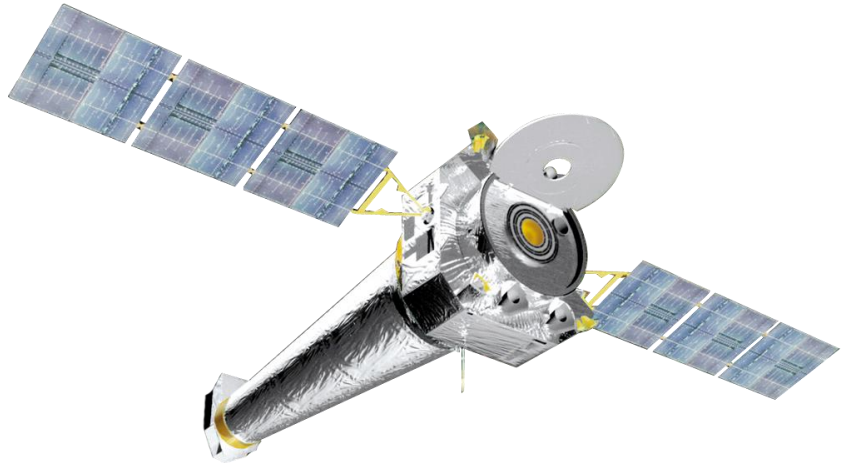
- Gri ölçek: *Chandra* ile 0.3-10 keV enerji aralığında.
Kontür: Very Large Array ile 21 cm dalga boyunda.
(Kaynak: Chandra Supernova Remnant Catalog. <http://hea-www.cfa.harvard.edu/ChandraSNR/>).



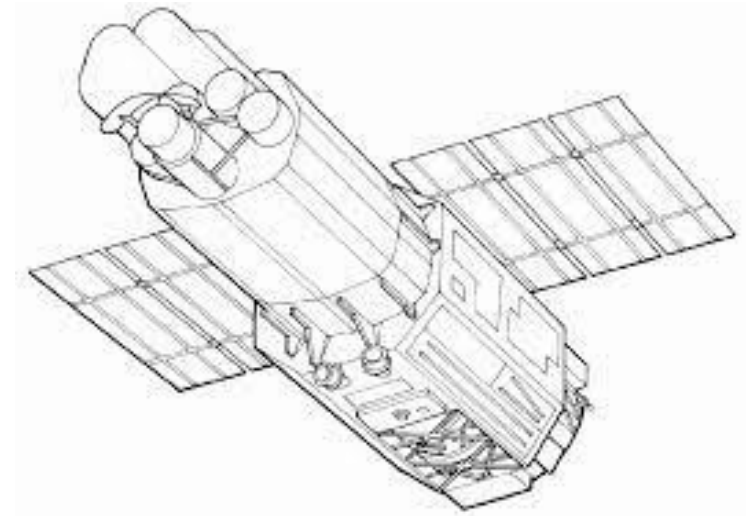
X-ışın Uyduları



- X-ışın gözlemleri, Dünya atmosferinin X-ışın dalga boylarında geçirgen olmaması nedeniyle uzay teleskopları ile yapılmaktadır.
- X-ışın verileri ile SNK'ların fiziksel özelliklerini belirlemede kullanılabilir. Bu özellikler; plazmanın sıcaklığı, plazmadaki elementler, SNK'nın yaşı, patlama türü ve patlayan yıldızın kütlesi olabilir



Cihad DENİZ



6 Eylül 2022

Suzaku X-ışın Uydusu (2005-2015)

- *Suzaku* uydusu, 2005 yılında JAXA ve NASA işbirliği ile fırlatılmıştır ve beşinci Japon X-ışın astronomi uydusudur.
- *Suzaku* uydusunun üç bilimsel aleti bulunmaktadır: bir X-ışın tayfçekeri (XRS), dört X-ışın görüntüleme tayfçekeri (XIS; Koyama vd. 2007) ve bir sert X-ışın dedektörü (HXD).



Şekil 3. *Suzaku* 'nun dört XIS dedektörü.

<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/suzaku/gallery/instruments/xis.html>

Gelecek nesil X-ışın Uyduları: *XRISM* ve *Athena*



X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (*XRISM*; Tashiro vd. 2018), 2023 yılında Japon-ABD işbirliğiyle fırlatılması planlanan X-ışın uydusudur.

Advanced Telescope for High-ENergy Astrophysics (*Athena*; Nandra vd. 2013), Avrupa Uzay Ajansı (ESA)'nın 2030'lu yıllarda fırlatmayı planladığı bir X-ışın uydusudur.



***XRISM* ve *Athena* simülasyonlarının yapılma amacı şu soruları araştırmaktır:**

- Gelecek nesil X-ışın uyduları SNK'lardan ne tür tayfsal bilgilerin alınmasını sağlayacak?
- *XRISM/Resolve* and *Athena/X-IFU*'nun kapasiteleri nedir?

Suzaku, *XRISM* ve *Athena* Uydularının Dedektör Karşılaştırması

- **Resolve** ve **X-IFU** sırasıyla *XRISM* ve *Athena* uydularının dedektörleridir.

Tablo 1. XIS, Resolve ve X-IFU dedektörlerinin başlıca özellikleri

Dedektör özelliği	<i>Suzaku</i> /XIS	<i>XRISM</i> /Resolve	<i>Athena</i> /X-IFU
Enerji aralığı (keV)	0.2-12	0.3-12	0.3-12
Görüş açısı (FoV)	17'.8 x 17'.8	3' x 3'	5' (çap)
Enerji çözünürlüğü (6 keV'ta)	~120 eV	≤7 eV	2.5 eV
Etkin alan (keV)	8 keV'ta 100 cm ²	6 keV'ta 210 cm ²	7 keV'ta 1600 cm ²

Motivasyon

- SNK'lardan gelen ısısal ışıma süreklilik ve çizgi ışımalarının bir kombinasyonu iken ısısal olmayan ışıma sadece süreklilik göstermektedir. Kompozit türü SNK'ların kabuk bölgesindeki ısısal ışıma ejektadan izler gösteriyorsa, bu SNK'nın ata yıldızını tahmin etmek mümkün olur.
- Gelecek nesil X-ışın uyduları olan *XRISM* ve *Athena* uydularının yüksek tayfsal çözünürlüklü dedektörleri sayesinde, kompozit SNK'ların X-ışın kökenleri daha iyi anlaşılabilir, elementlerin çizgileri daha hassas ölçülebilir ve böylece ata yıldızlar daha düşük hata sınırları içerisinde hesaplanabilir. Ayrıca, SNK'nın ısısal ve ısısal olmayan ışımalarının geldiği bölgeler daha hassas ölçülebilir.
- Bu çalışmada, kompozit SNK olan 3C 396'nın *XRISM* ve *Athena* simülasyonları yapılmıştır. Bu simülasyonlar ile, kalıntının kabuğundan gelen ek element çizgilerinin çözülmesi hedeflenmiştir.

3C 396 Kalıntısının Literatür Özeti

- 3C 396'nın *ASCA* verilerinin analizi, kalıntının tipik bir kompozit türü SNK gibi hem ısısal hem de ısısal olmayan ışıma yaptığını göstermiştir (Harrus & Slane 1999). Bu sonuçlara göre, ısısal ışıma patlamada dalgası ile etkileşen YAO maddesinden kaynaklanırken, ısısal olmayan ışıma merkez bölgedeki pulsar rüzgarı nebulasını (pulsar wind nebula; PWN) işaret etmektedir.
- Bu kalıntının *Chandra* ve *Suzaku* X-ışın tayf analizleri yapılmıştır (Olbert vd. 2003; Su vd. 2011; Sezer vd. 2020).

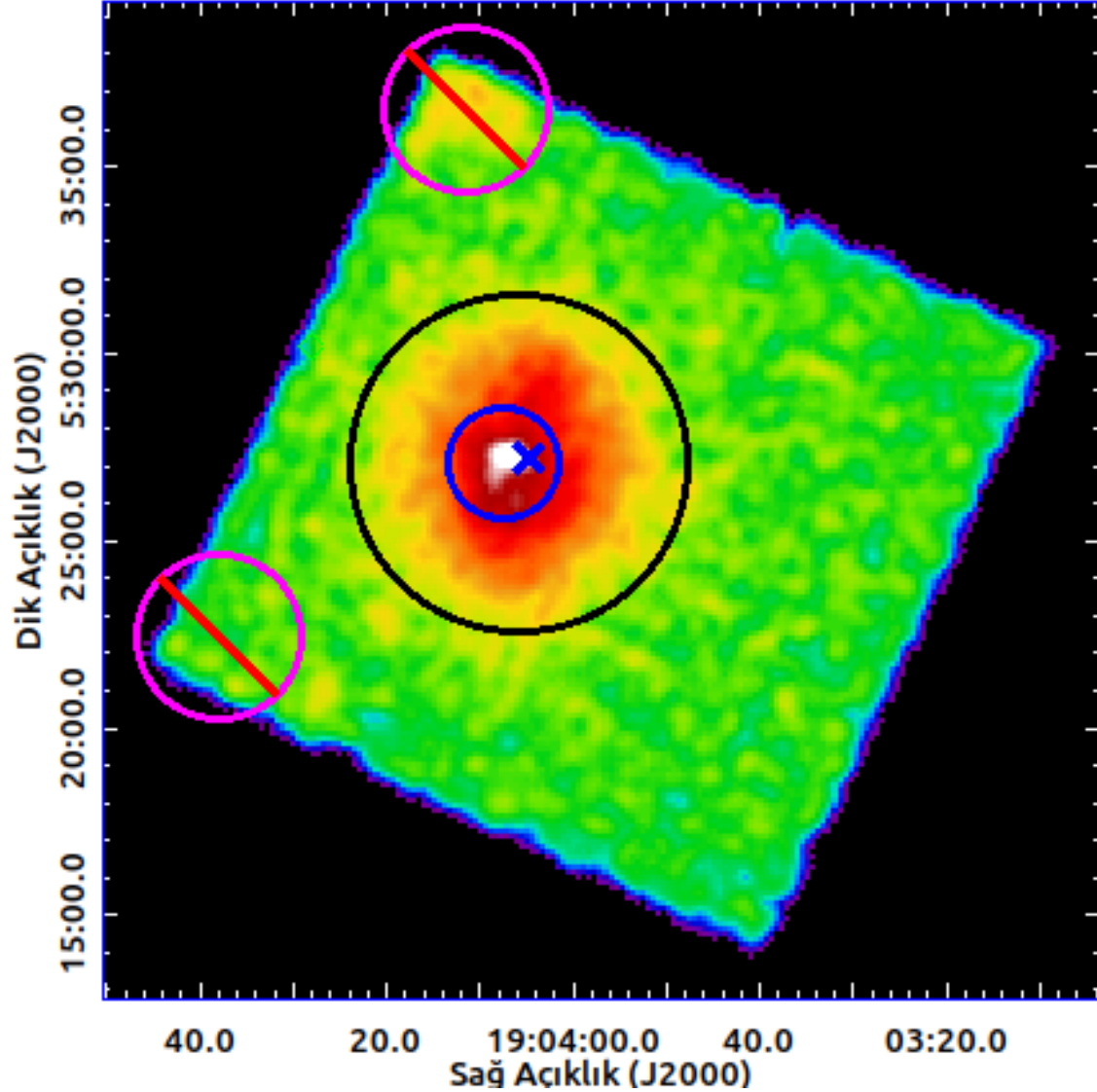
Suzaku X-ışın Gözlem Verileri

- 3C 396, 26 Nisan 2016'da *Suzaku*/XIS ile gözlenmiştir (Gözlem no: 509038010; Gözlem proje sorumlusu: T. Pannuti).
- Gözlemin toplam pozlama süresi ~72 ks'dir.

X-ışın Verilerini İndirgeme

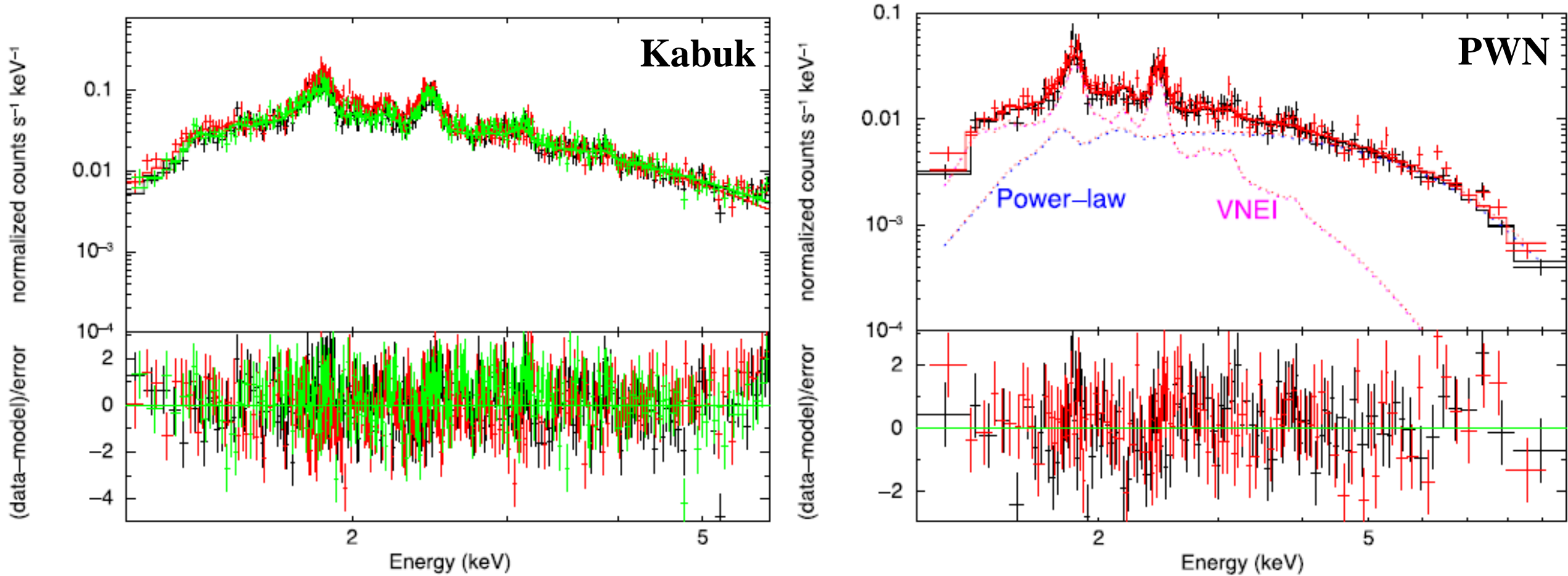
- Veri indirgeme için NASA'nın **High Energy Astrophysics Software (HEASoft) package** v6.26 yazılımını; tayfsal fit işlemleri için ise **X-ray Spectral Fitting Package (XSPEC)** v12.9.1 (Arnaud 1996) yazılımını kullanılmıştır. **Atomic Database (ATOMDB)** v3.0.9 (Foster vd. 2012) ise, tayfsal fit işlemlerinde atomik hesaplama veri tabanı olarak kullanılmıştır.
- Görüntülerin görüntülenmesi ve işlenmesi için **SAOImageDS9**¹ kullanılmıştır.

Suzaku/XIS Görüntüsü



Şekil 4. Soldaki şekilde 3C 396'nın XIS3 görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüde merkeze yakın siyah büyük daire ($r = 4'.5$ açı dakikası) SNK'nın kabuk ve PWN kısımlarını içermektedir. Merkezdeki küçük daire, PWN'ye aittir ve buradan gelen ışımaya tayfa dahil edilmemiştir. Mavi çarpı işareti PWN'nin olduğu bölgeyi temsil eder. Köşelerdeki macenta daireler ise XIS3 dedektörünün ^{55}Fe ile aydınlatılmış kalibrasyon bölgelerini göstermektedir.

Suzaku/XIS Tayfı



Şekil 5. Soldaki SNK'nın kabuğuna ait tayfta XIS0, 1 ve 3 tayflarına uygulanan model görülürken; sağdaki PWN tayfında XIS0 ve 3 için uygulanan model görülmektedir (Sezer vd. 2020).

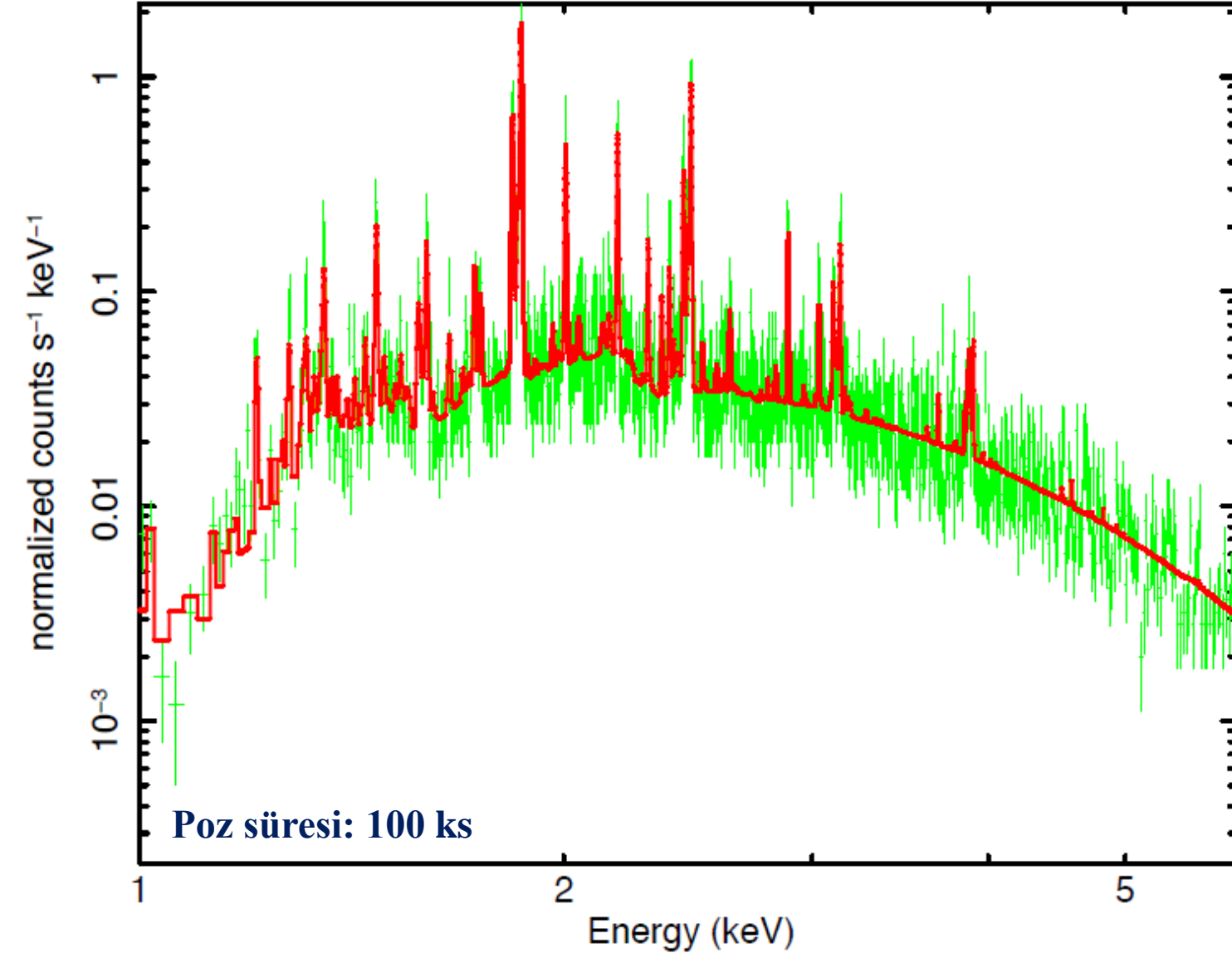
XRISM ve *Athena* Simülasyonları

- Bu çalışmada, 3C 396'nın *XRISM/Resolve* ve *Athena/X-IFU* simülasyonları ile, bu aletlerin çizgi belirlemedeki potansiyelleri test edilmiştir.
- Hem kabuk hem de PWN bölgesinin tayfının simülasyonları oluşturulmuştur.
- Simüle edilmiş tayfı oluşturmak için, *Resolve*¹ ve *X-IFU*² 'nun yanıt dosyaları kullanılmıştır.
- *XSPEC*'te bulunan *FAKEIT* komutu ile simülasyon tayfları üretilmektedir.

¹ <https://xrism.isas.jaxa.jp/research/proposer/obsplan/response/index.html>

² http://x-ifu-resources.irap.omp.eu/PUBLIC/RESPONSES/AEFF_ANALYSIS/

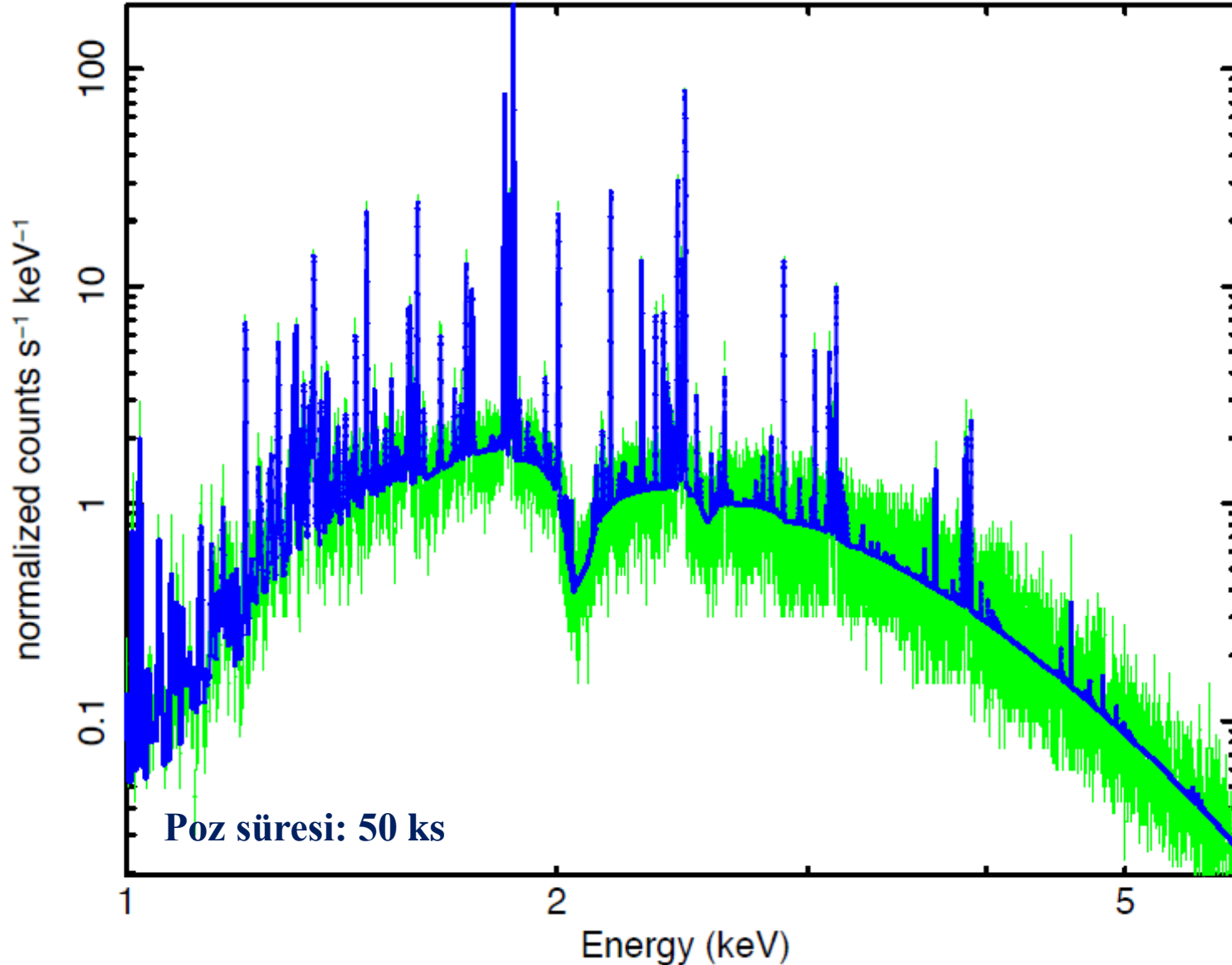
SNK Kabuğundan Gelen Tayfin *XRISM/Resolve* Simülasyonu



Şekil 6. 3C 396'nın kabuk bölgesinden gelen tayfinin 1-6 keV enerji bandındaki *XRISM/Resolve* simülasyonu.

- Ne (~1-1.2 keV), Mg (~1.3-1.8 keV), Si (~1.9-2.5 keV), S (~2.4-3.2 keV), Ca (~3.8-5.1 keV) ve Ar (~3.1-4.2 keV) elementlerinin çizgileri bu tayfta çözümlenmiştir.

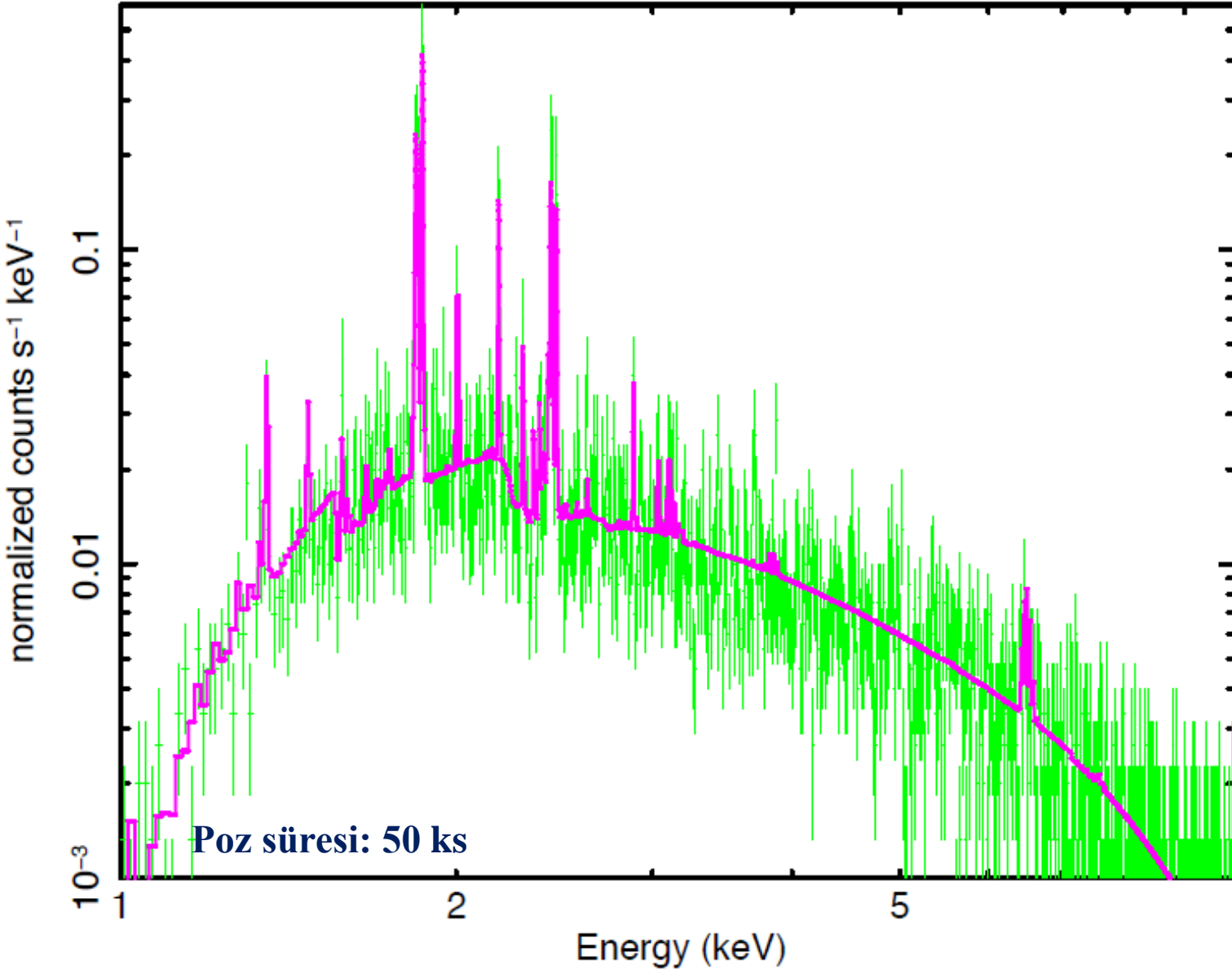
SNK Kabuğundan Gelen Tayfın *Athena/X-IFU* Simülasyonu



Şekil 7. 3C 396'nın kabuk bölgesinden gelen tayfının 1-6 keV enerji bandındaki *Athena/X-IFU* simülasyonu.

- Ne (~1-1.2 keV), Mg (~1.3-1.8 keV), Si (~1.9-2.5 keV), S (~2.4-3.2 keV), Ca (~3.8-5.1 keV) ve Ar (~3.1-4.2 keV) elementlerinin çizgileri bu tayfta çözümlenmiştir.

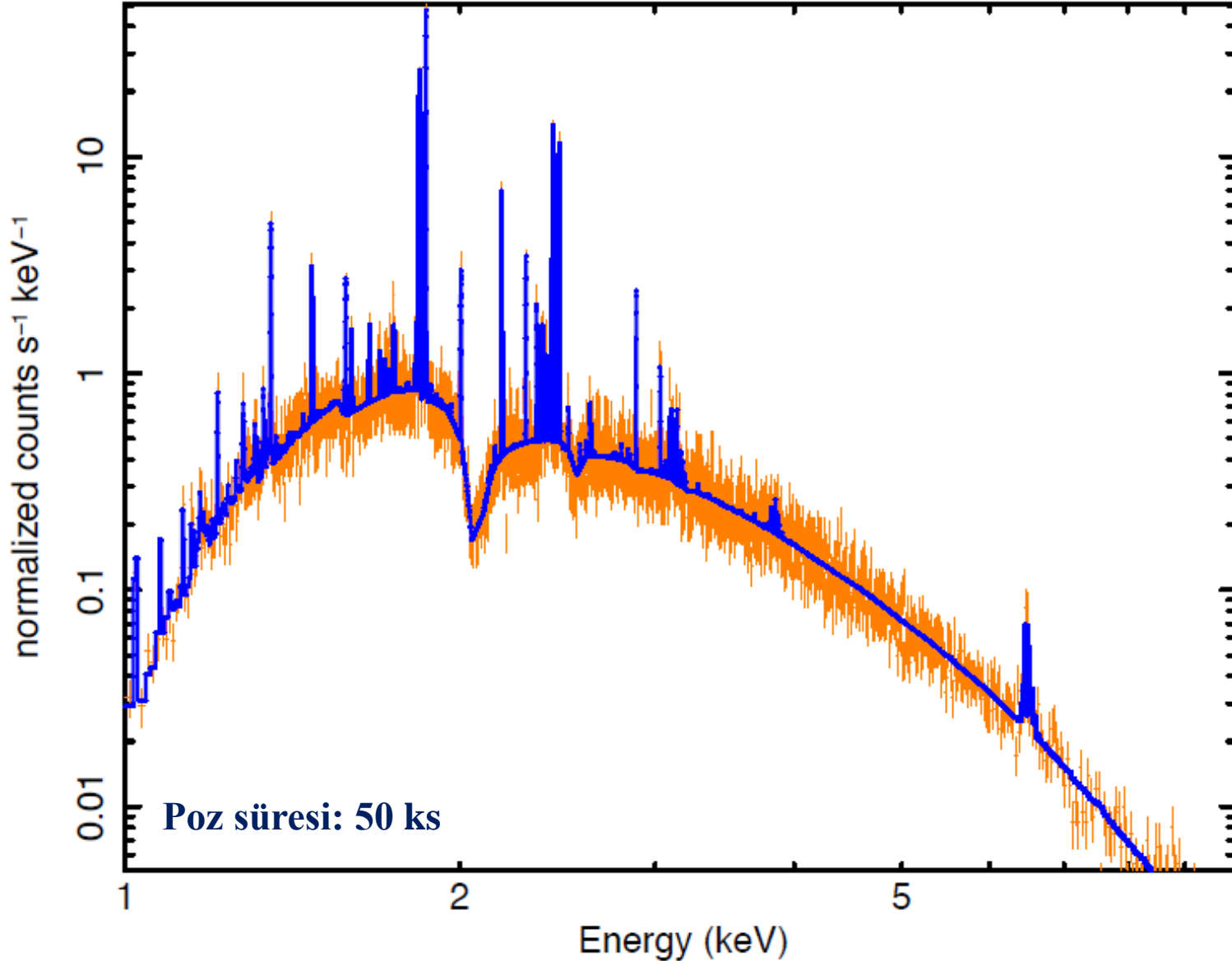
PWN'den Gelen Tayfın *XRISM*/Resolve Simülasyonu



Şekil 7. 3C 396'nın PWN bölgesinden gelen tayfının 1-10 keV enerji bandındaki *XRISM*/Resolve simülasyonu.

- Ne (~1-1.2 keV), Mg (~1.3-1.8 keV), Si (~1.9-2.5 keV), S (~2.4-3.2 keV), Ca (~3.8-5.1 keV), Ar (~3.1-4.2 keV) ve Fe (~6.5 keV) elementlerinin çizgileri bu tayfta çözümlenmiştir.

PWN'den Gelen Tayfin *Athena/X-IFU* Simülasyonu



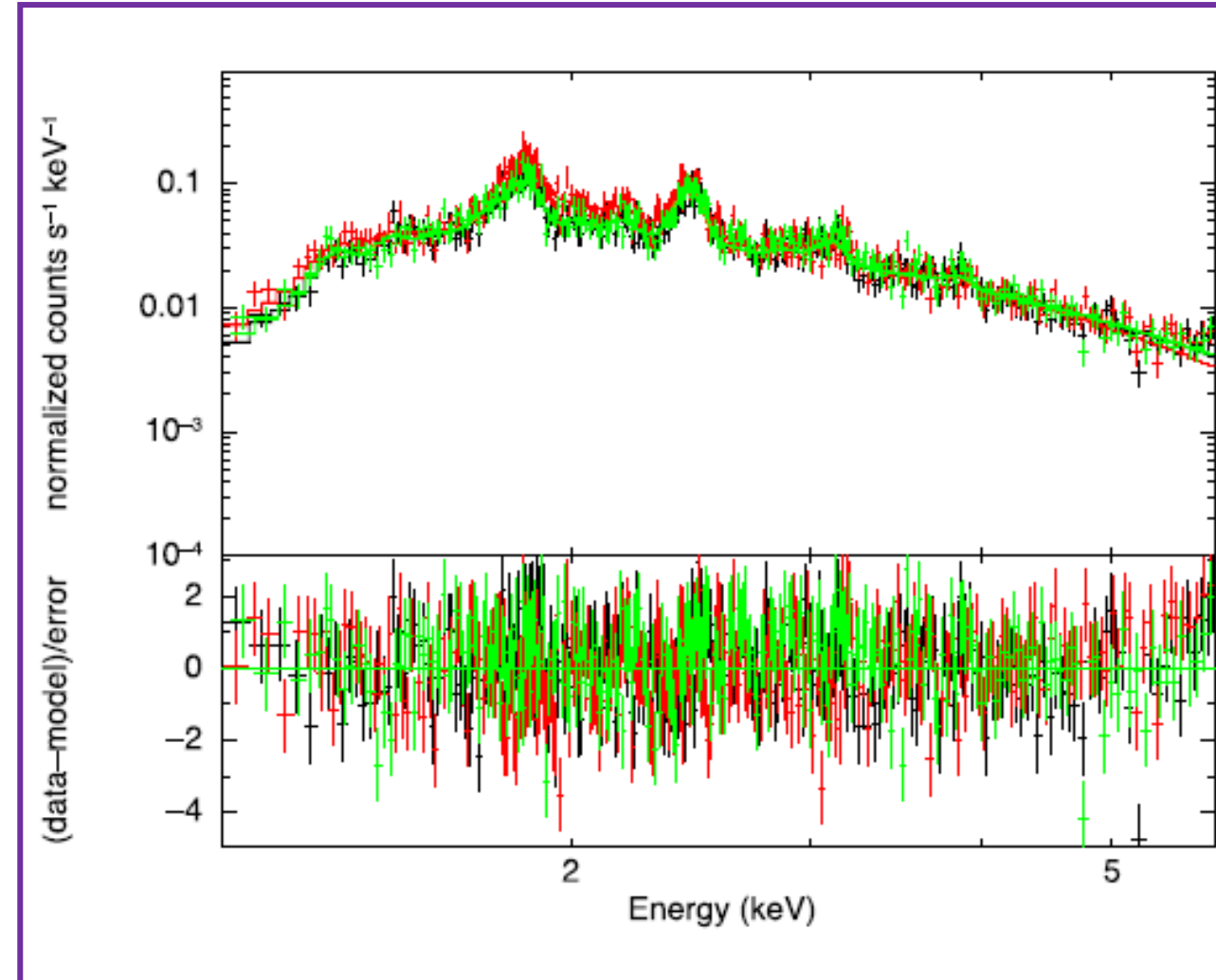
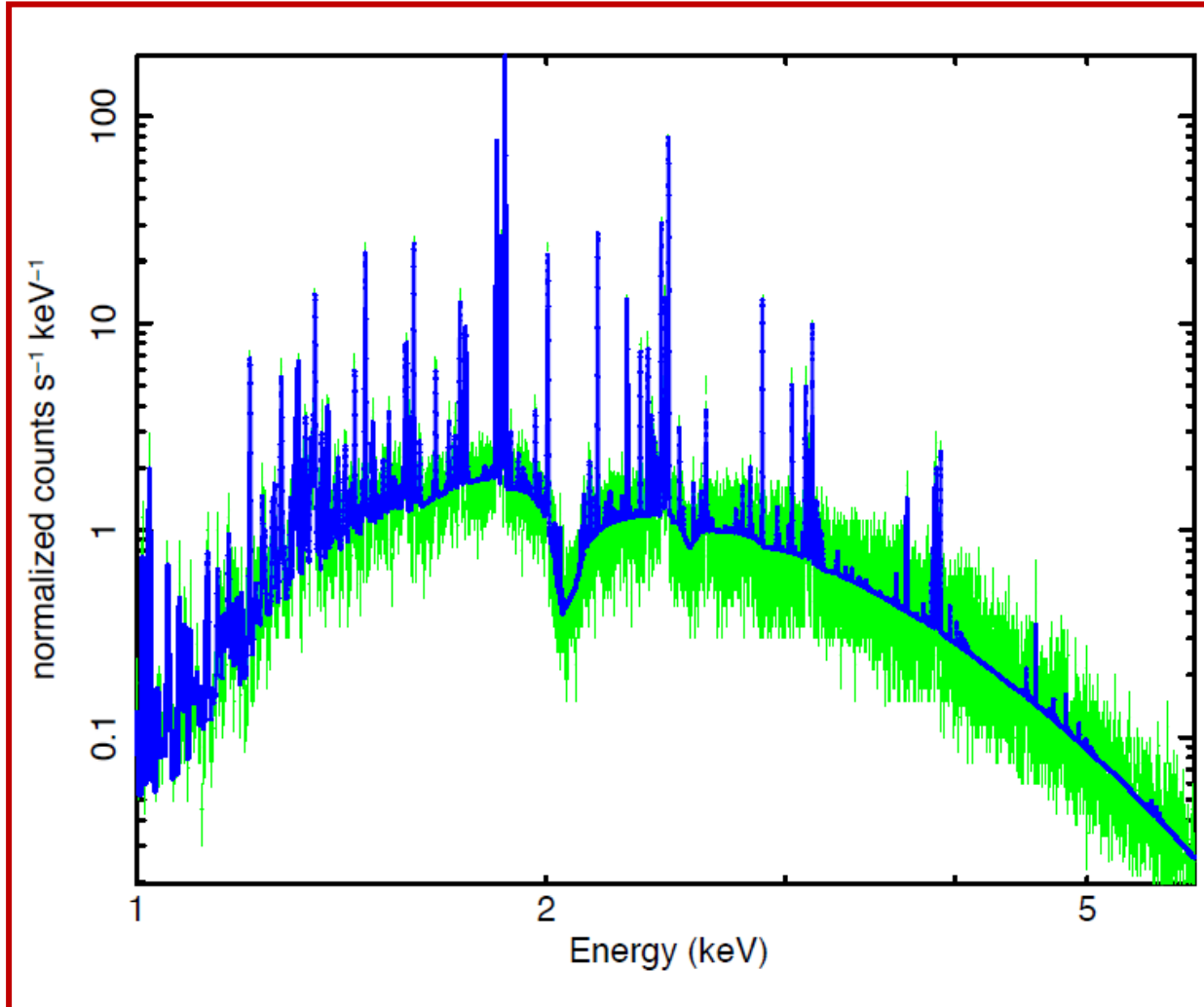
Şekil 7. 3C 396'nın PWN bölgesinden gelen tayfinin 1-10 keV enerji bandındaki *Athena/X-IFU* simülasyonu.

- Ne ($\sim 1-1.2$ keV), Mg ($\sim 1.3-1.8$ keV), Si ($\sim 1.9-2.5$ keV), S ($\sim 2.4-3.2$ keV), Ca ($\sim 3.8-5.1$ keV), Ar ($\sim 3.1-4.2$ keV) ve Fe (~ 6.5 keV) elementlerinin çizgileri bu tayfta çözümlenmiştir.

Athena/X-IFU ve Suzaku/XIS Tayflarının Karşılaştırılması

Athena/X-IFU

Suzaku/XIS



Sonuçlar

- Bu çalışmada, *Suzaku/XIS* verilerini kullanarak, gelecek nesil X-ışın uyduları olan *XRISM/Resolve* ve *Athena/X-IFU*'nun simülasyonları yapılmıştır.
- Simülasyonlarda, *Resolve* ve *X-IFU* dedektörlerinin element çizgilerini çözümlemedeki başarısı gösterilmiştir.
- Bu çözümlenen çizgilerin hassas bolluk ölçümü, süpernova patlaması geçiren ata yıldızın belirlenmesine önemli ölçüde katkıda bulunacaktır.
- Bir PWN genelde ısısal olmayan ışıma (power-law) yapar. Ancak bu çalışmadaki simülasyonlar, PWN bölgesinden pek çok ısısal element çizgisini de açığa çıkartmıştır. Isısal ışımının varlığı; SNK'nın iç kısımlarındaki maddeyi ve SNK ters şoku ile PWN arasındaki etkileşimi gösterir. Bu sebeple, PWN tayfindan gelen bu ısısal ışıma, PWN ile kabuk bölgesinin morfolojik etkileşimi ile açıklanabilir.

Dinlediđiniz için teŖekkürler!

Kaynaklar

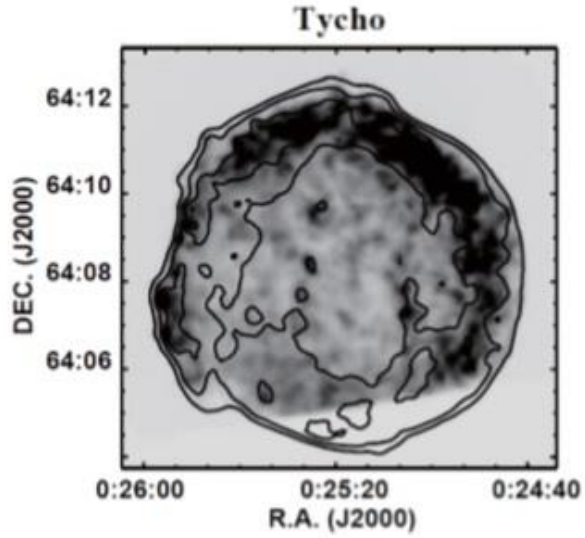
- Arnaud KA. XSPEC: The First Ten Years. In: *Astronomical Data Analysis Software and Systems V - Astronomical Society of the Pacific Conference Series*; San Francisco, United States; 1996. p. 17.
- Foster AR, Ji L, Smith RK, Brickhouse NS. Updated Atomic Data and Calculations for X-Ray Spectroscopy. *The Astrophysical Journal* 2012; 756 (2): 128-138. doi: 10.1088/0004-637X/756/2/128
- Harrus, I., M., Slane, P., O. An ASCA Study of the Supernova Remnant G39.2-0.3. *The Astrophysical Journal* 1999; 516, 811. doi:10.1086/307138
- Ishisaki Y, Maeda Y, Fujimoto R, Ozaki M, Ebisawa K et al. Monte Carlo Simulator and Ancillary Response Generator of Suzaku XRT/XIS System for Spatially Extended Source Analysis. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 2007; 59: 113-132. doi: 10.1093/pasj/59.sp1.S113
- Kawasaki, M. 2003, Ph.D. thesis (Tokyo University)
- Koyama K, Tsunemi H, Dotani T, Bautz MW, Hayashida K et al. X-Ray Imaging Spectrometer (XIS) on Board Suzaku. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 2007; 59: 23-33. doi: 10.1093/pasj/59.sp1.S23
- Mitsuda K, Bautz M, Inoue H, Kelley RL, Koyama K et al. The X-Ray Observatory Suzaku. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 2007; 59: 1-7. doi: 10.1093/pasj/59.sp1.S1
- Nandra, K., Barret, D., Barcons, X., Fabian, A., den Herder, J.-W., Piro, L., Watson, M., Adami, C., Aird, J., Afonso, J. M., et al. 2013. The Hot and Energetic Universe: A White Paper presenting the science theme motivating the Athena+ mission. eprint arXiv:1306.2307.
- Olbert, C. M., Keohane J., W., Arnaud, K., A., Dyer, K., K., Reynolds, S., P., Safi-Harb, S., Chandra Detection of a Pulsar Wind Nebula Associated with Supernova Remnant 3C 396. *The Astrophysical Journal* 2003; 592, L45. doi:10.1086/377348115

Kaynaklar

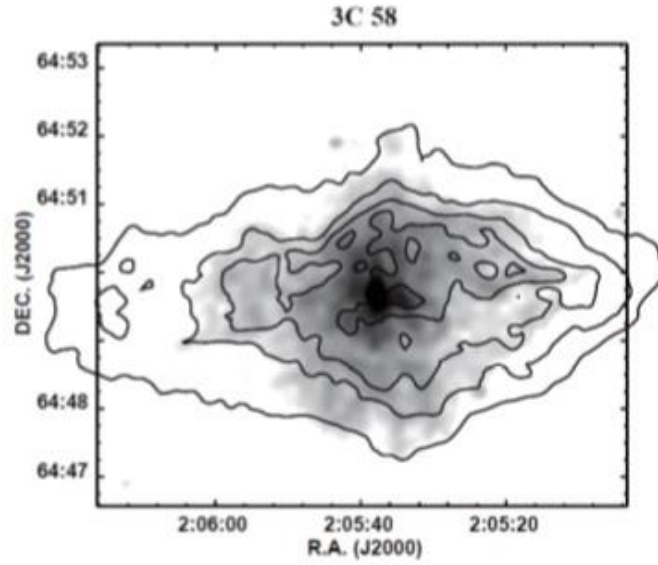
- Sezer A, Ergin T, Yamazaki R, Ohira Y, Cesur N. A Suzaku X-ray study of the mixed-morphology supernova remnant Kes 69 and searching for its gamma-ray counterpart. MNRAS, 2018; 481, 1416. doi:10.1093/mnras/sty2387
- Sezer, A., Ergin, T., Cesur, N., Tanaka, S. J., Kisaka, S., Ohira, Y., Yamazaki, R. Suzaku and Fermi view of the supernova remnant 3C 396. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2020; 492(1), 1484-1491.
- Smith RK, Brickhouse NS, Liedahl DA, Raymond JC. Collisional Plasma Models with APEC/APED: EmissionLine Diagnostics of Hydrogen-like and Helium-like Ions. The Astrophysical Journal 2001; 556 (2): 91-95. doi: 10.1086/322992
- Su, Y., Chen, Y., Yang, J., Koo, B.-C., Zhou, X., Lu, D.-R., Jeong, I.-G., and DeLaney, T. Molecular Environment and Thermal X-ray Spectroscopy of the Semicircular Young Composite Supernova Remnant 3C 396. The Astrophysical Journal 2011; 727(1), 43, 11 pp.
- Tashiro, M., Maejima, H., Toda, K., Kelley, R., Reichenthal, L., Lobell, J., Petre, R., Guainazzi, M., Costantini, E., Edison, M., et al. Concept of the X-ray Astronomy Recovery Mission. Proceedings of the SPIE 2018; 10699, 12.
- Vink, J. Supernova remnants: the X-ray perspective. The Astronomy and Astrophysics Review 2012; 20; 49. doi:10.1007/s00159-011-0049-1
- Vink, J. Physics and Evolution of Supernova Remnants. Cham, Switzerland: Springer International Publishing 2020.

EK SLAYTLAR

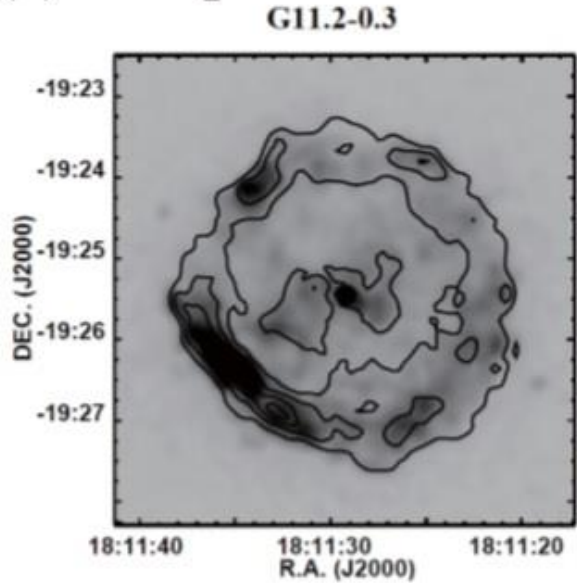
(a) Shell-type



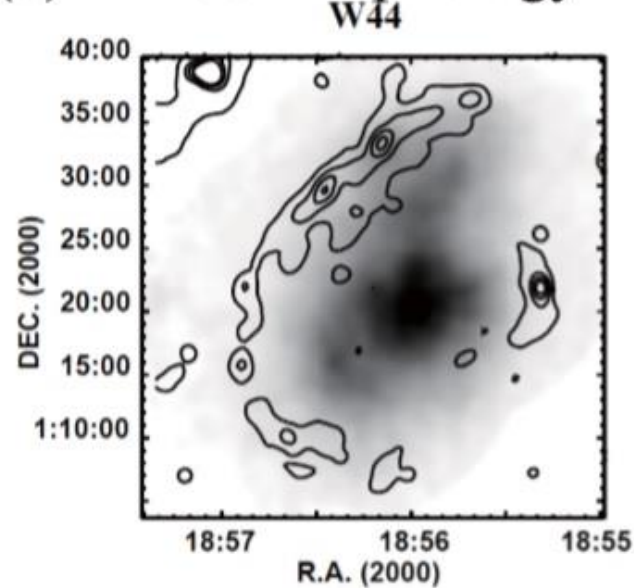
(b) Plerion-type



(c) Composite



(d) Mixed-morphology



SNK'ların Morfolojileri

Şekil 2. Sınıflandırılmış SNK örnekleri. Gri ölçek X-ışın ve kontürler radyo haritalarını gösterir (Kaynak: Chandra Supernova Remnant Catalog. <http://hea-www.cfa.harvard.edu/ChandraSNR/>).

(a) Kabuk tipi SNK; Tycho. Gri ölçek: *Chandra* ile 0.3-10 keV. Kontür: VLA ile 1.375 GHz frekansında.

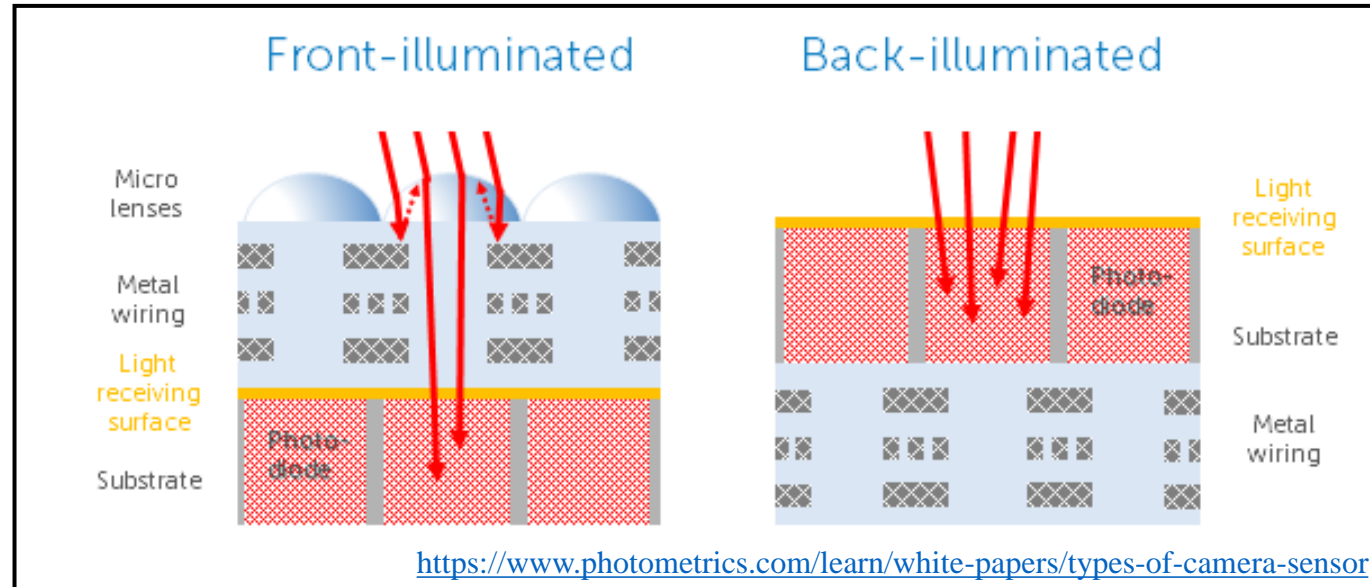
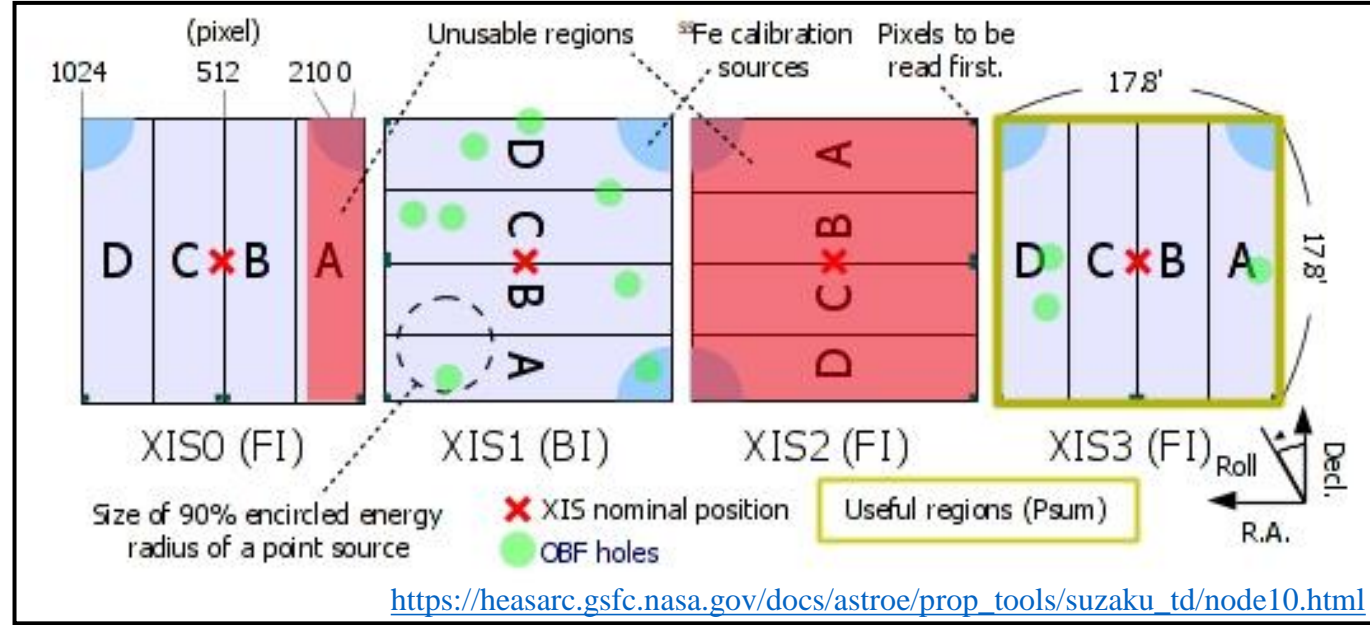
(b) Plerion tipi SNK; 3C 58. Gri ölçek: *Chandra* ile 0.3-10 keV. Kontür: VLA ile 21 cm dalga boyunda.

(c) Kompozit SNK; G11.2-0.3. Gri ölçek: *Chandra* ile 0.3-10 keV enerji aralığında. Kontür: VLA ile 21 cm dalga boyunda.

(d) Karışık morfolojili SNK; W44. Gri ölçek; *ASCA* ile 0.7-10 keV dalga boyu aralığında. Kontür: VLA ile 1.4 GHz frekansında. Görseller Kawasaki (2003) PhD tezinden alınmıştır.

Suzaku/XIS Dedektörleri

- *Suzaku*'da X-ışınlarını tespit edebilmek için dört CCD bulunmaktadır; bunlar, XIS0, XIS1, XIS2 ve XIS3'tür.
- XIS1 arkadan aydınlatmalı (back-illuminated; BI) bir dizayna sahip iken; kalan üç dedektör önden aydınlatmalı (front-illuminated; FI) dizaynlıdır.
- BI ve FI dedektörler sırasıyla düşük ve yüksek enerji bantlarında birbirlerine karşı üstündürler.



Model parametreleri

Component	Parameters	Shell	PWN
TBABS	N_{H} (10^{22} cm $^{-2}$)	$5.83^{+0.27}_{-0.24}$	$5.22^{+0.24}_{-0.17}$
VVNEI	kT_e (keV)	$1.12^{+0.02}_{-0.03}$	$0.93^{+0.08}_{-0.09}$
	Mg (solar)	$1.2^{+0.2}_{-0.2}$	(1)
	Al (solar)	$1.9^{+0.4}_{-0.3}$	(1)
	Si (solar)	$1.3^{+0.1}_{-0.2}$	$1.5^{+0.2}_{-0.2}$
	S (solar)	$1.1^{+0.2}_{-0.2}$	$1.4^{+0.1}_{-0.3}$
	Ca (solar)	$1.7^{+0.4}_{-0.2}$	(1)
	τ (10^{11} cm $^{-3}$ s)	$2.3^{+0.4}_{-0.5}$	$3.6^{+0.4}_{-0.4}$
	Norm ^a (10^{-3} cm $^{-5}$)	$38.12^{+4.08}_{-2.49}$	$4.79^{+0.65}_{-0.32}$
Power law	Γ	–	$1.97^{+0.23}_{-0.38}$
	Norm ^b (10^{-5})	–	$1.64^{+0.28}_{-0.45}$
	Reduced χ^2 (dof)	1.12 (828)	1.03 (379)

Notes. Errors are within a 90 percent confidence level. Abundances are given relative to the solar values of Wilms et al. (2000). (1) indicates that the elemental abundance was fixed at solar.

^aThe normalization of the VVNEI, $\text{norm} = 10^{-14} \int n_e n_H dV / (4\pi d^2)$, where d is the distance to the source (in cm), n_e , n_H are the electron and hydrogen densities (in units of cm $^{-3}$), respectively, and V is the emitting volume (in units of cm 3).

Suzaku Uydusu

	XIS0, XIS2 ve XIS3	XIS1
Aydınlatma türü	Önden aydınlatmalı	Arkadan aydınlatmalı
Bant aralığı	0.2-12 keV	0.2-12 keV
Görüş açısı	17'.8 x 17'.8	17'.8 x 17'.8
Piksel sayısı	1024 x 1024	1024 x 1024
Piksel boyutu	24 μm (1".0)	24 μm (1".0)
5.9 keV'ta tayfsal çözünürlük	~130 keV	~130 keV
Zaman çözünürlüğü	8 s	8 s
Etkili alan 1.5 keV'ta 0.8 keV'ta	330 cm^2 160 cm^2	370 cm^2 110 cm^2

SNK'ların Morfolojileri

➤ SNK'lar, morfolojilerine göre dört ayrı sınıfta incelenir:

I. Kabuk tipi SNK'lar (S; Shell type),

II. Plerionlar (P; Plerions),

III. Kompozit SNK'lar (C; Composite or non-thermal composite)

IV. Karışık Morfolojili SNK'lar (MM; Mixed Morphology or thermal composite SNR).

Tablo 1. Morfolojilerine göre SNK'lar

	Kabuk Benzeri?	Merkezi Doldurulmuş?
Kabuk Tipi SNK	evet	hayır
Plerion Tipi SNK	hayır	evet
Kompozit SNK	evet	evet
Karışık Morfoloji SNK	(Radyo)	evet
	(X-ışını)	hayır

Element tanımlama

Element	Çizgi enerjisi (eV)							
	H-benzeri iyon			He-benzeri iyon [†]				
	$Ly\alpha$	$Ly\beta$	$Ly\gamma$	$K\alpha (r)$	$K\alpha (f)$	$K\alpha (i)$	$K\beta$	$K\gamma$
C	367	436	459	308	299	304	355	371
N	500	593	625	431	420	426	498	522
O	654	774	817	574	561	569	666	698
Ne	1022	1211	1277	921	905	914	1073	1127
Mg	1472	1745	1840	1352	1330	1343	1579	1660
Si	2006	2377	2506	1865	1840	1854	2183	2294
S	2623	3107	3277	2461	2431	2447	2884	3033
Ar	3323	3936	4151	3140	3104	3124	3685	3875
Ca	4106	4864	5130	3908	3845	3892	4582	4819
Fe	6966	8266	8732	6702	6641	6670	7798	8217

[†] r rezonans, f yasaklı ve i de ara kombinasyon çizgilerini temsil eder.

3C 396 Kalıntısının Literatür Özeti

- 3C 396'nın ASCA verilerinin analizi, kalıntının tipik bir kompozit türü SNK gibi hem ısısal hem de ısısal olmayan ışıma yaptığını göstermiştir (Harrus & Slane 1999). Bu sonuçlara göre, ısısal ışıma patlamada dalgası ile etkileşen YAO maddesinden kaynaklanırken, ısısal olmayan ışıma merkez bölgedeki pulsar rüzgarı nebulasını (pulsar wind nebula; PWN)i işaret etmektedir.
- Bu kalıntının X-ışın verilerinin analizi ile hem ısısal hem de ısısal olmayan ışımanın varlığı tespit edilmiştir (Su vd. 2011; Sezer vd. 2020).
- Olbert vd. (2003) *Chandra* ACIS verilerini kullanarak merkezdeki X-ışınlarında parlak kaynağın tayfını analiz etmişlerdir. Kalıntıdan ısısal ışıma tespit edememiş; yalnızca ısısal olmayan ışımanın varlığını saptamışlardır.
- Su vd. (2011) ise, yine aynı *Chandra* ACIS verilerini kullanıp, bir ısısal model ile kalıntıda Si, S ve bazı bölgelerde Ar ve Ca bulmuşlardır. Bu element bolluklarının izlenmesinden, kalıntının 13-15 Mg kütleyle sahip bir ata yıldızla sahip olduğunu bildirmişlerdir.
- Sezer vd. (2020), 3C 396'nın *Suzaku* verilerini kullanarak, kalıntının PWN ve kabuk bölgelerinden gelen X-ışın ışımasını analiz etmişlerdir. Sonuçları, kabuk bölgesinden tamamen ısısal ışımanın; merkez bölgeden ise hem ısısal hem de ısısal olmayan ışımanın geldiğini göstermiştir.
- Güncel hesaplamalar kalıntının 6.2 kpc uzaklıkta olduğuna işaret etmektedir (Su vd. 2011).

Süpernovalar

- Süpernovalar (SN) evrendeki en büyük enerjili (tipik olarak $\sim 10^{51}$ erg) patlamalardan birisidir.
- SN'ler iki şekilde meydana gelebilir:
 - Çekirdek Çöküşü SN'ler: Güneş'ten en az 8 kat daha kütleli yıldızlarının evrimlerinin son aşamasında meydana gelir.
 - Termonükleer SN'ler: İkili bir sistemdeki bir beyaz cücenin patlaması.

