

Line Emission Mapper ile Süpernova Kalıntısı 3C 391'in X-ışın Dalga Boylarında İncelenmesi

Cihad Deniz¹  , Aytap Sezer² , Hicran Bakış¹ 

¹ Department of Space Sciences and Technologies, Akdeniz University, Antalya 07058, Turkey

² Department of Computer Engineering, Avrasya University, Trabzon 61250, Turkey

Accepted: February 25, 2025. Revised: February 25, 2025. Received: January 30, 2025.

Özet

Karışık-morfolojili süpernova kalıntıları (MM SNK'lar), radyo dalga boylarında kabuk benzeri bir yapı sergilerken X-ışını dalga boylarında merkezde yoğunlaşan emisyon gösterirler. Bilinen 310 Galaktik SNK'nın yaklaşık 40 tanesi bu kategoriye dahildir. Bazı X-ışını uyduları (örneğin; Chandra, Suzaku ve XMM-Newton) MM SNK'ları gözlemiş ve X-ışını özelliklerini belirlemiştir. MM SNK'ların X-ışını emisyonu ısısaldır ve kalıntıların sıcak gaz içeriği hakkında bilgi sağlar. 2030'larda fırlatılması planlanan Line Emission Mapper (LEM) X-ışın teleskobu, 0.2-2.0 keV enerji bandında 1-2 eV'lik tayfsal çözünürlüğe sahip olacaktır. Bu özellik, MM SNK'lardaki zayıf emisyon çizgilerini parlak Galaktik arka plandan ayırmayı mümkün kılacaktır. Bu çalışmada, LEM'in büyük etkin alanı ve mükemmel tayfsal çözünürlüğü sayesinde MM SNK 3C 391'in element çizgilerini tespit etme yeteneğini araştırdık. Elde ettiğimiz LEM simülasyon tayflarında O, Ne ve Mg elementlerinin K-kabuğu ve Fe-L kabuğu çizgilerinin çözümlendiği görülmüştür.

Abstract

Mixed-morphology supernova remnants (MM SNRs) feature a shell-like structure in radio wavelengths while exhibiting centrally concentrated emission in X-rays. Among the known 310 Galactic SNRs, approximately 40 belong to this category. Several X-ray satellites (e.g., Chandra, Suzaku, and XMM-Newton) have observed MM SNRs and determined their X-ray properties. The X-ray emission of MM SNRs is thermal, providing information on the hot gas content of the remnants. The Line Emission Mapper (LEM), an X-ray probe scheduled for launch in the 2030s, will have a spectral resolution of 1-2 eV in the 0.2-2.0 keV energy band. This capability will enable the disentanglement of faint emission lines in MM SNRs from the bright Galactic foreground. In this study, we assess LEM's capability to detect the elemental lines of MM SNR 3C 391 due to its excellent spectral resolution and large effective area. The obtained LEM simulation spectra reveal well-resolved K-shell lines of O, Ne, and Mg, along with Fe-L shell lines.

Anahtar Kelimeler: ISM: supernova remnants (3C 391, G31.9+0.0) – X-rays: ISM – instrumentation: detectors – X-rays: individual: Line Emission Mapper (LEM)

1 Giriş

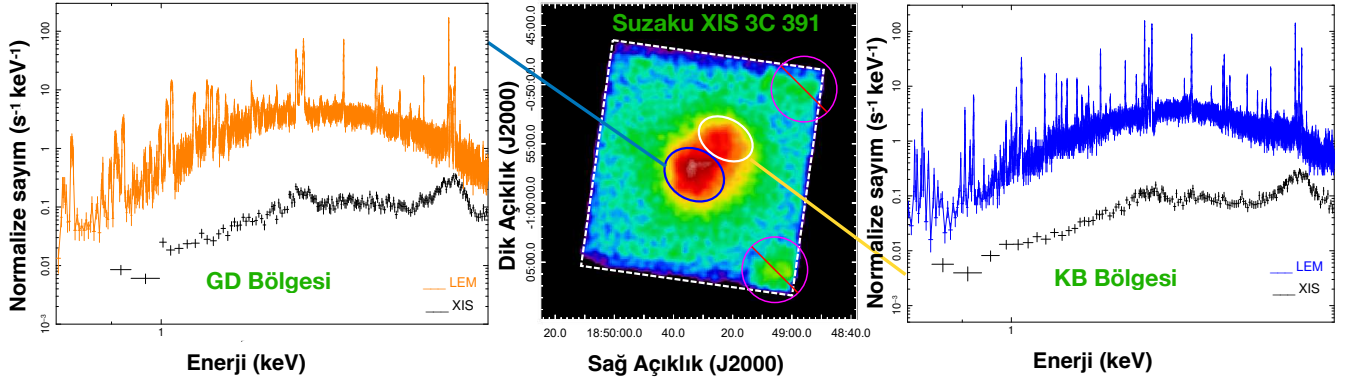
Yumuşak X-ışın dalga boylarında yüksek çözünürlüklü tayfsal çalışmalar, süpernova kalıntıları (SNK), yıldız oluşum bölgeleri, aktif galaktik çekirdekler, galaksi kümeleri gibi kaynakların evrim süreçleri de dahil olmak üzere yıldızlararası ve galaksiler arası ortamın fiziksel özelliklerini araştırmak için yeni bir pencere açacaktır. Elektron-volt seviyesindeki tayfsal çözünürlük, büyük görüş alanı ve büyük etkin alan özellikleri dikkate alınarak gelecek nesil uydular planlanmaktadır. Yumuşak X-ışın dalga boylarında, NASA tarafından Line Emission Mapper (LEM; Kraft ve diğ. 2022; Patnaude ve diğ. 2023) ve Çin Uzay Ajansı tarafından Hot Universe Baryon Surveyor (HUBS; Cui ve diğ. 2020; Bregman ve diğ. 2023) planlanan uydular arasındadır.

Galaksimizde yaklaşık 310 tane yaygın kaynak radyo dalga boylarında yapılan gözlemlerle SNK olarak tanımlanmış ve kataloglanmıştır (Green 2025). SNK'lar, radyo ve X-ışın dalga boylarında sergiledikleri morfolojik özelliklere göre; Kabuk tipi, Plerionlar, Kompozit ve Karışık morfoloji (MM) olarak sınıflandırılmaktadır. Örneğin, MM SNK'lar radyo dalga

boylarında kabuk şeklinde görünürken, X-ışın dalga boylarında içi dolu bir morfoloji sergilerler (Rho & Petre 1996, 1998). SNK'lardan yaklaşık 40 tanesinin bu sınıfa dahil olduğu bilinmektedir (ör. Vink 2020). Chandra, Suzaku ve XMM-Newton gibi bazı X-ışın uyduları ile yapılan gözlemler MM SNK'ların X-ışın özelliklerini ortaya çıkarmıştır. Özellikle X-ışın tayf analizleri bu ışımanın ısısal olduğunu ve birkaç tanesinde yeniden birleşen (YB) plazma şeklinde olduğunu göstermiştir (ör. Yamaguchi 2020).

3C 391 (G31.9+0.0) MM sınıfa dahil bir kalıntıdır ve radyo dalgaboylarında "breakout" olarak isimlendirilen bir yapıya sahiptir (Rho & Petre 1996; Chen & Slane 2001). Bu yapı; genişleyen kalıntının yıldızlararası ortamda (YAO) molekül bulutu gibi yoğun bir bölge ile karşılaştığında, şok dalgasının hızının azalması ve kalıntının daha az yoğunluğa sahip olan ortama doğru hızla genişlemesi sonucu ortaya çıkar. Bu nedenle; Very Large Array (VLA) teleskobu ile ~5 yay dakikalık yarıçapa sahip bir kabuk yapısıyla keşfedilen (Reynolds & Moffett 1993; Moffett & Reynolds 1994) bu SNK'nın radyo emisyonunun Kuzeybatı (KB) bölgesinde parlak, Gündeydoğu (GD) bölgesine doğru ise sönük olduğu tespit edilmiştir. 1720 MHz OH gözlemleri ise SNK'nın GD and kuzeydoğu (KD) kenarlarında iki maser noktası olduğunu göstermiştir (Frail ve diğ. 1996).

* cihad.dnz@gmail.com



Şekil 1. 3C 391'in 0.3-10.0 keV enerji aralığındaki Suzaku XIS3 görüntüsü orta panelde verilmiştir. Arka plan analizine ayrılan bölge beyaz kesikli kutu ile gösterilmiştir. Elipsler analiz için seçilen bölgeleri, köşelerdeki daireler ise kalibrasyon bölgelerini temsil etmektedir. 3C 391'in GD ve KB bölgelerinin 50-ks'lik simüle edilmiş 0.8-2.0 keV enerji aralığındaki LEM tayfları ise sırasıyla sol ve sağ panellerde verilmiştir. LEM tayflarında O, Ne ve Mg elementlerinin K-kabuğu geçişleri ve Fe-L kabuğu çizgileri açıkça görülmektedir.

SNK 3C 391, X-ışın dalga boylarında Einstein, ROSAT, ASCA, Chandra ve Suzaku tarafından gözlenmiştir. Einstein uydusu gözlemleri SNK'nın genişleyen bir kabuğa sahip orta yaşlı bir kalıntı olduğunu göstermiştir (Wang & Seward 1984). ROSAT verisinden elde edilen tayf tek sıcaklıklı ısısal bir plazma modeli ile tanımlanmıştır (Rho & Petre 1996). ASCA verisi ile yapılan tayfsal analizler, plazmanın iyonizasyon dengesine ulaştığını ya da dengeye yakın olduğunu göstermiştir (Chen & Slane 2001; Kawasaki ve diğ. 2005). Chen ve diğ. (2004) Chandra gözlemini kullanarak SNK'nın 17 bölgesinin analizini yapmış, merkezdeki gazın normal metal bolluk değerlerinde ve plazmanın iyonizasyon dengesinde olduğunu belirlemiştir. Suzaku X-ışın verileri SNK'da YB plazmanın varlığını göstermiştir (Ergin ve diğ. 2014; Sato ve diğ. 2014).

GeV enerji bandında, Fermi-LAT uydusu ile 3C 391'den yayılan gama ışınları keşfedilmiştir (Atwood ve diğ. 2009) ve sonraki yıllarda yapılan Fermi-LAT gözlemleriyle SNK'dan gelen bu ışınların kökeni araştırılmıştır (Castro & Slane 2010; Ergin ve diğ. 2014; Suzuki ve diğ. 2022).

SNK 3C 391'in uzaklığı konusunda literatürde bir kaç çalışma bulunmaktadır. Caswell ve diğ. (1971), HI gözlemlerini kullanarak SNK'nın kinematik uzaklığının 8.5-13.4 kpc aralığında olduğunu tahmin etmiştir. HI gözlemlerinden Radhakrishnan ve diğ. (1972) ise, uzaklığı 7.2-11.4 kpc olarak vermiştir. VLA Galactic Plane Survey gözlemlerini kullanarak Su ve diğ. (2014), SNK'nın uzaklığını 7.2-10.4 kpc olarak hesaplamıştır. HI (Ranasinghe & Leahy 2017) ve HII gözlemleri (Lee ve diğ. 2020) ile yapılan iki ayrı çalışma, SNK'nın kinematik uzaklığını ~ 7.1 kpc olarak güncelleştir.

SNK'lar yumuşak X-ışın bandında K-kabuğu (ör., C, N, O, Ne ve Mg) ve Fe-L kabuğu ($E \sim 0.7-1.2$ keV) emisyon çizgileri gösterirler. LEM 2030'larda fırlatılması planlanan ve 0.2-2.0 keV enerji bandında 1-2 eV tayfsal çözünürlüğe sahip bir uydudur. Bu özelliği ile SNK'lardan gelen sönük ışınımı parlak Galaksi arka plan ışınmasından ayırmaya olanak tanır. Bu çalışmada, mükemmel tayfsal çözünürlüğü ve geniş etkin alanı sayesinde LEM'in MM SNK sınıfından 3C 391'in yumuşak X-ışın dalga boylarında element çizgilerini çözümleme yeteneği araştırılmıştır. 3C 391 için LEM'in tayfsal simülasyonları yapılmış ve ilk sonuçlar sunulmuştur. Simülasyonların elde

edilmesinde kullanılan yöntemler §2'de detaylandırılmış olup elde edilen sonuçlar §3'de tartışılmıştır.

2 LEM Simülasyonları

2.1 Ön hazırlık: Suzaku gözlemi, veri indirilmesi ve tayf modellemesi

LEM simülasyonlarına temel olarak; 3C 391'in arşivlenmiş Suzaku X-ışın verisi kullanılmıştır. Bu veri (Gözlem no: 505007010, PI: K.Koyama) X-ray Imaging Spectrometer (XIS; Koyama ve diğ. 2007) ile 22 Ekim 2010'da 99.4 ks poz süresi ile alınmıştır.

Veri indirilmesi HEASoft paketinin 6.26 sürümü ile yapılmıştır. Tayf modellemesinde ise XSPEC (Arnaud 1996) paketinin 12.9.1 sürümü ile AtomDB (Foster ve diğ. 2012) atomik veri tabanının 3.0.9 sürümü kullanılmıştır.

Şekil 1'in orta panelinde, 3C 391'in 0.3-10.0 keV enerji aralığındaki Suzaku X-ışın görüntüsü verilmiştir. XIS tayf analizi için KB ve GD olmak üzere iki bölge seçilmiş ve bu bölgeler Şekil 1'de elipslerle gösterilmiştir.

Arka plan analizi için, SNK ve köşedeki kalibrasyon kaynaklarından gelen ışıma çıkarılarak XIS'in tüm görüş alanı kullanılmıştır (bkz. Şekil 1, beyaz kesikli kare). Bu ışımadan aletsel arka planın etkisi xisnxbgen (Tawa ve diğ. 2008) aracı kullanılarak giderilmiştir. Arka plan modellemesi için, SNK'nın Galaksideki konumu nedeniyle kozmik X-ışın arka planı, Galaktik çıkıntı X-ışın emisyonu ve ön plan emisyonu olmak üzere üç etki gözönüne alınmıştır. XIS tayflarının fit edilmesi için XSPEC paketinde bulunan vpshock, vmekal ve vvrnei modelleri kullanılmıştır. Galaktik soğurma için bu modellere TBabs modeli (Wilms ve diğ. 2000) dahil edilmiştir. Tayf analizleri XIS'in duyarlı olduğu 0.3-10.0 keV enerji aralığında yapılmış olup LEM simülasyonları için LEM'in duyarlı olduğu 0.2-2.0 keV enerji aralığı kullanılmıştır.

2.2 LEM simülasyon tayflarının elde edilmesi

3C 391'in KB ve GD bölgelerinin 50-ks'lik LEM tayflarını elde etmek için XSPEC içinde fakeit komutu ve LEM'in yanıt (response) dosyaları kullanılmıştır. GD bölgesi için vmekal+vvrnei modeli ve KB bölgesi için vpshock+vvrnei modeli temel alınarak elde edilen simülasyon tayfları Şekil 1'de verilmiştir. LEM tayflarında, yumuşak X-ışın dalga boylarındaki

Çizelge 1. LEM ile Suzaku, XRISM ve Athena'nın karşılaştırılması.

Uydu (Aktif olma durumu)	LEM (2030'lar)	Suzaku/XIS (2005-2015)	XRISM/Resolve (Eylül 2023'te fırlatıldı)	Athena/X-IFU (2030'lar)
Enerji aralığı (keV)	0.2-2.0	0.2-12	0.3-12	0.2-12
Etkin alan (cm ²) (0.5 keV'de)	1600	180	50	6000
Görüş alanı	30'	18'	3'	5'
Açısal çözünürlük	15''	1.6'-2.0'	75''	5''
Tayfsal çözünürlük (eV)	1-2	130 (6 keV'de)	7	2.5

element çizgilerinin, özellikle K-kabuğu O, Ne, Mg ve Fe-L kabuğu çizgilerinin iyi bir şekilde çözümlendiği görülmektedir.

3 Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, LEM'in 3C 391 için simülasyon tayfları elde edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla; Çizelge 1'de, LEM ile Suzaku'nun bazı teknik özellikleri sunulmuş olup bu karşılaştırmaya yeni nesil X-ışın uyduları olan JAXA/NASA yapımı XRISM (Tashiro ve diğ. 2020) ve ESA yapımı Athena (Nandra ve diğ. 2013) da dahil edilmiştir. Çizelge 1'den görüldüğü gibi, LEM'in tayfsal çözünürlüğü Suzaku/XIS'in tayfsal çözünürlüğünden fazladır. 0.2-2.0 keV enerji aralığında elde ettiğimiz simülasyon tayfları LEM'in XIS'den yüksek tayfsal çözünürlüğe sahip olduğunu açıkça göstermiştir.

LEM'in duyarlı olduğu enerji bandı C, N, O, Ne, Mg, Si elementlerinin He-benzeri ve H-benzeri emisyon çizgilerinin çoğunu ve Fe'nin L-kabuk emisyon çizgilerini kapsar. LEM, özellikle He-benzeri rezonans çizgileri, yasaklanmış çizgiler ve ara kombinasyon çizgileri ile Fe-L kompleksini çözme kapasitesine sahiptir. LEM tayflarında bu çizgilerin belirlenmesi aşağıda tartışılan iki açıdan önemlidir:

- Element bolluklarının belirlenmesi:** Element bollukları süpernova (SN) patlaması veren yıldızın ve patlama mekanizmasının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. X-ışın gözlemleri ile elde edilen element bollukları, bazı teorik modellerle karşılaştırılarak SN patlaması hakkında bilgi sağlanmaktadır (ör. Iwamoto ve diğ. 1999; Woosley & Weaver 1995). Özellikle oksijence zengin ve özek-cökmesi (CC) SN sonucu olduğu bilinen kalıntıların LEM ile çalışılması element çizgileri ve SN dinamikleri ile ilgili süreçler hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (ör. G292.0+1.8 ve Cas A: Orlando ve diğ. 2024). CC SN sonucu olduğu bilinen 3C 391'in, Suzaku verisi kullanılarak hesaplanan element bollukları SNK'yı oluşturan yıldızın kütesinin yaklaşık 15 M_☉ olduğunu göstermiştir (Sato ve diğ. 2014). Gelecekte LEM ile yapılacak gözlemler ile 3C 391'in yumuşak X-ışın bölgesinde sergilediği elementlerin bolluk değerleri güvenli aralıklarda bulunacaktır.
- YB plazmanın araştırılması:** YB plazmalar, X-ışını dalga boylarında belirgin tayfsal özelliklerle karakterize edilir (Yamaguchi 2020). Mevcut CCD'lerin enerji çözünürlüğü ile sınırlı olan YB plazmalar üzerine yapılan çalışmalar, çoğunlukla >2 keV bandında yer alan element çizgilerine (özellikle Si, S ve Fe gibi ağır elementleri kapsayan) dayanmaktadır (ör. W28: Okon ve diğ. 2018, IC 443: Matsumura ve diğ. 2017b).

LEM, YB plazma araştırmalarını daha düşük enerji

aralığına (0.2-2.0 keV) genişletecek ve N, O, Ne, Mg çizgileri üzerinde büyük ölçüde iyileştirilmiş gözlemler sağlayacaktır. Böylelikle özellikle yumuşak X-ışın bölgesinde ışıması baskın olan SNK'larda (ör. G166.0+4.3: Matsumura ve diğ. 2017a, 3C 400.2: Broersen & Vink 2015, HB9: Sezer ve diğ. 2019, G189.6+3.3: Yamauchi ve diğ. 2020) YB plazmanın anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

Ayrıca, LEM'in 15 yay saniyelik açısal çözünürlüğü, YB plazmaların SNK'lardaki dağılımını haritalamada yardımcı olabilir. Bu da YB plazmanın fiziksel kökenlerini belirlemede kritik öneme sahiptir (ör. W49B: Lopez ve diğ. 2013).

Gelecekte, LEM gibi yüksek enerji çözünürlüğüne sahip CCD'ler ile yapılacak gözlemler SNK'ların ısısal evrimleri konusunda detaylı bilgi verecektir.

Kaynaklar

- Arnaud K. A., 1996, in Jacoby G. H., Barnes J., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 101, Astronomical Data Analysis Software and Systems V*. p. 17
- Atwood W. B., ve diğ., 2009, *ApJ*, 697, 1071
- Bregman J., ve diğ., 2023, *Science China Physics, Mechanics, and Astronomy*, 66, 299513
- Broersen S., Vink J., 2015, *MNRAS*, 446, 3885
- Castro D., Slane P., 2010, *ApJ*, 717, 372
- Caswell J. L., Dulk G. A., Goss W. M., Radhakrishnan V., Green A. J., 1971, *A&A*, 12, 271, *ADS*
- Chen Y., Slane P. O., 2001, *ApJ*, 563, 202
- Chen Y., Su Y., Slane P. O., Wang Q. D., 2004, *ApJ*, 616, 885
- Cui W., ve diğ., 2020, *Journal of Low Temperature Physics*, 199, 502
- Ergin T., Sezer A., Saha L., Majumdar P., Chatterjee A., Bayirli A., Ercan E. N., 2014, *ApJ*, 790, 65
- Foster A. R., Ji L., Smith R. K., Brickhouse N. S., 2012, *ApJ*, 756, 128
- Frail D. A., Goss W. M., Reynoso E. M., Giacani E. B., Green A. J., Otrupcek R., 1996, *AJ*, 111, 1651
- Green D. A., 2025, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 46, 14
- Iwamoto K., Brachwitz F., Nomoto K., Kishimoto N., Umeda H., Hix W. R., Thielemann F.-K., 1999, *ApJS*, 125, 439
- Kawasaki M., Ozaki M., Nagase F., Inoue H., Petre R., 2005, *ApJ*, 631, 935
- Koyama K., ve diğ., 2007, *PASJ*, 59, 23
- Kraft R., ve diğ., 2022, preprint, ([arXiv:2211.09827](https://arxiv.org/abs/2211.09827))
- Lee Y.-H., Koo B.-C., Lee J.-J., 2020, *AJ*, 160, 263
- Lopez L. A., Pearson S., Ramirez-Ruiz E., Castro D., Yamaguchi H., Slane P. O., Smith R. K., 2013, *ApJ*, 777, 145
- Matsumura H., Uchida H., Tanaka T., Tsuru T. G., Nobukawa M., Nobukawa K. K., Itou M., 2017a, *PASJ*, 69, 30
- Matsumura H., Tanaka T., Uchida H., Okon H., Tsuru T. G., 2017b, *ApJ*, 851, 73
- Moffett D. A., Reynolds S. P., 1994, *ApJ*, 425, 668
- Nandra K., ve diğ., 2013, preprint, ([arXiv:1306.2307](https://arxiv.org/abs/1306.2307))

- Okon H., Uchida H., Tanaka T., Matsumura H., Tsuru T. G., 2018, *PASJ*, 70, 35
- Orlando S., ve diğ., 2024, preprint, ([arXiv:2408.12462](https://arxiv.org/abs/2408.12462))
- Patnaude D. J., ve diğ., 2023, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 9, 041008
- Radhakrishnan V., Goss W. M., Murray J. D., Brooks J. W., 1972, *ApJS*, 24, 49
- Ranasinghe S., Leahy D. A., 2017, *ApJ*, 843, 119
- Reynolds S. P., Moffett D. A., 1993, *AJ*, 105, 2226
- Rho J. H., Petre R., 1996, *ApJ*, 467, 698
- Rho J., Petre R., 1998, *ApJ*, 503, L167
- Sato T., Koyama K., Takahashi T., Odaka H., Nakashima S., 2014, *PASJ*, 66, 124
- Sezer A., Ergin T., Yamazaki R., Sano H., Fukui Y., 2019, *MNRAS*, 489, 4300
- Su H., Tian W., Zhu H., Xiang F. Y., 2014, in Ray A., McCray R. A., eds, IAU Symposium Vol. 296, Supernova Environmental Impacts. pp 372–373, [doi:10.1017/S1743921313009885](https://doi.org/10.1017/S1743921313009885)
- Suzuki H., Bamba A., Yamazaki R., Ohira Y., 2022, *ApJ*, 924, 45
- Tashiro M., ve diğ., 2020, in den Herder J.-W. A., Nikzad S., Nakazawa K., eds, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series Vol. 11444, Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray. p. 1144422, [doi:10.1117/12.2565812](https://doi.org/10.1117/12.2565812)
- Tawa N., ve diğ., 2008, *PASJ*, 60, S11
- Vink J., 2020, Physics and Evolution of Supernova Remnants. Springer Nature, [doi:10.1007/978-3-030-55231-2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55231-2)
- Wang Z. R., Seward F. D., 1984, *ApJ*, 279, 705
- Wilms J., Allen A., McCray R., 2000, *ApJ*, 542, 914
- Woosley S. E., Weaver T. A., 1995, *ApJS*, 101, 181
- Yamaguchi H., 2020, *Astronomische Nachrichten*, 341, 150
- Yamauchi S., Oya M., Nobukawa K. K., Pannuti T. G., 2020, *PASJ*, 72, 81

Access:

M25-0369: *Turkish J.A&A* — Vol.6, Issue 3.