


Büyük Macellan Bulutsusundaki Süpernova Kalıntısı DEM L71'in X-ışın Özellikleri

Neslihan Alan¹  

¹ İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İstanbul 34119, Türkiye

Accepted: December 16, 2022. Revised: December 16, 2022. Received: November 14, 2022.

Özet

Araştırmada Büyük Macellan Bulutsusundaki süpernova kalıntısı DEM L71'in 103 ks'lik *Chandra* arşiv verileriyle kapsamlı bir X-ışın tayf analizi gerçekleştirilmiştir. Kalıntı yedi farklı doğrultuda toplam 50 bölgeye ayrılarak incelenmiş ve plazma parametreleri ile element bollukları konumsal olarak elde edilmiştir. Öncü şokun süpürdüğü çevresel maddenin fiziksel yapısı da belirlenmiştir. Element bolluk ölçümleri, kalıntının asimetrik bir uzaysal dağılıma sahip olduğunu ortaya koymuştur. Değme süresizliğinin konumu, batı yönü hariç, genellikle DEM L71'in geometrik merkezinden ~ 5 pc uzaklıktadır. Patlama ile atılan maddede Fe bolluğu fazlayken, O ve Ne bollukları genellikle ihmal edilebilir düzeydedir. Bu bulgu, DEM L71'in Tip Ia kökenli olduğunu desteklemektedir. Kalıntı için Sedov yaşı $\sim 6,660 \pm 770$ yıl ve patlama enerjisi $E_0 \simeq 1.74 \pm 0.35 \times 10^{51}$ erg olarak hesaplanmıştır.

Abstract

A comprehensive X-ray spectral analysis of ~ 103 ks *Chandra* archive data of the supernova remnant DEM L71 in the Large Magellanic Cloud was performed in this work. The spectra of the remnant extracted from a total of 50 thin-sliced regions along seven different azimuthal directions were analyzed to obtain spatially elemental abundances and plasma parameters. The features of the interstellar medium swept-up by the forward shock were also determined. Elemental abundance measurements reveal an asymmetrical spatial distribution of metal-rich ejecta gas. While the location of the contact discontinuity is generally at ~ 5 pc from the geometric center of the X-ray emission of DEM L71, it is uncertain in the western part of the remnant. Fe is enhanced in the ejecta while O and Ne abundances are generally negligible. This finding confirms the Type Ia origin of DEM L71. We estimate an upper limit on the Sedov age of $\sim 6,660 \pm 770$ yr and explosion energy of $E_0 \simeq 1.74 \pm 0.35 \times 10^{51}$ erg for the remnant.

Anahtar Kelimeler: Supernova Remnants — X-rays — DEM L71

1 Giriş

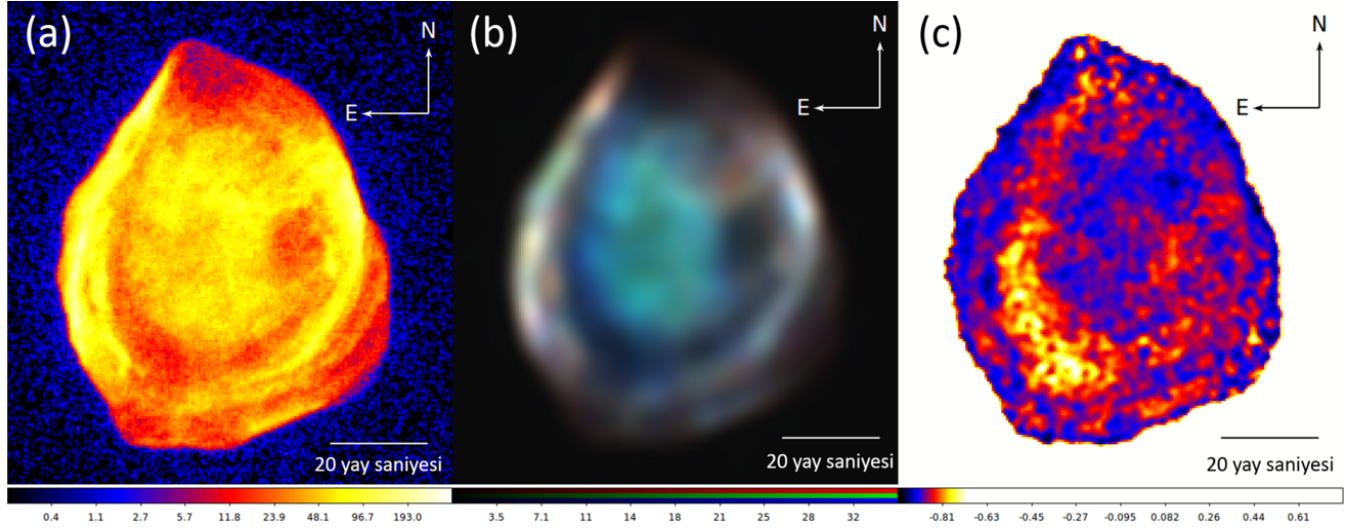
Evrende bilinen en enerjik patlamalardan olan süpernovalar, galaksilerin enerji yoğunluğu, kimyasal zenginleşmesi ve evrimi için hayati bir role sahiptir. Süpernovalarla saçılan yıldız maddesi ortama karışarak ağır element bakımından zenginleşmeye sebep olur. Bu patlamalar yıldız oluşum bölgelerini tetikleyerek yeni yıldız oluşumuna da katkı sağlar.

Süpernovalar patlama mekanizmaları bakımından çekirdek çökmesi (Tip II, Tip Ib ve Tip Ic gibi) ve termonükleer (Tip Ia) patlamalar olmak üzere iki temel gruba ayrılır. Tip II, Tip Ib ve Tip Ic süpernovaları büyük kütleli genç yıldızların çekirdeklerinin çökmesiyle oluşurken, Tip Ia'lar, yakın ikili sistemler içindeki karbon oksijen (CO) beyaz cücelerin termonükleer patlamaları olarak tanımlanabilir. Bir CO beyaz cüce, dejenere olmayan bir yoldaş yıldızdan (SD: tek-dejenere; [Whelan ve Iben 1973](#); [Nomoto 1982](#)) kütle aktarımı yoluyla madde alarak Chandrasekhar sınırına ulaştığında kararsız hale gelir ve bir termonükleer kaçak oluşur. İki beyaz cücenin birleşmesi de bir termonükleer patlama üretebilir (DD: çift-dejenere; [Iben ve Tutukov 1984](#)). Literatürde termonükleer patlamaların ata sistemlerinin doğasının tartışıldığı ve bu tür patlama mekanizmalarını tanımlayan bazı modelleri içeren çalışmalar mevcuttur (bkz. [Wang ve Han 2012](#); [Maoz ve diğ.](#)

[2014](#); [Ruiz-Lapuente 2014](#); [Ruiz-Lapuente ve diğ. 2018](#); [Wang 2018](#)).

Büyük Macellan Bulutsusundaki (LMC) süpernova kalıntısı (SNR) DEM L71, optik bölgede [Davies ve diğ. \(1976\)](#) tarafından keşfedilmiştir. Kalıntının ilk X-ışını gözlemleri *Einstein* uydusuyla elde edilmiş olup ([Long ve diğ. 1981](#)), sonrasında *ASCA* ([Hughes ve diğ. 1998](#)), *Chandra* ([Hughes ve diğ. 2003](#); [Rakowski ve diğ. 2003](#)) ve *XMM-Newton* ([van der Heyden ve diğ. 2003](#); [Maggi ve diğ. 2016](#)) X-ışın teleskoplarıyla da gözlenmiştir. *ASCA* gözlemleriyle DEM L71'de, genellikle CO beyaz cücesinin termonükleer patlamasından kaynaklanan karakteristik bir özellik olarak kabul edilen, yüksek Fe bollukları tespit edilmiştir ([Hughes ve diğ. 1998](#)). *Chandra* ([Hughes ve diğ. 2003](#); [Rakowski ve diğ. 2003](#)) ve *XMM-Newton* ([van der Heyden ve diğ. 2003](#)) ile yapılan müteakip yüksek çözünürlüklü gözlemlerden patlama ile atılan maddedeki Fe kütesinin yaklaşık $1.4 M_{\odot}$ olduğu saptanmış ve DEM L71'in bir Tip Ia süpernovasının kalıntısı olduğu teyit edilmiştir. [Hughes ve diğ. \(1998\)](#) *ASCA* verilerinden kalıntı yaşının $\sim 5,000$ yıl olduğunu ileri sürerken, [Ghavamian ve diğ. \(2003\)](#) Balmer çizgilerinin optik gözlemlerinden hesapladıkları şok hızlarıyla $4,360 \pm 290$ yıllık bir yaş tahmini yapmıştır. [Pagnotta ve Schaefer \(2015\)](#) g' , r' , i' ve H_{α} filtrelerindeki optik görüntüleri kullanarak olası yoldaş bileşenleri araştırdı, ancak bir tespit bulunamadılar. [Siegel ve diğ. \(2020\)](#), DEM L71'in *XMM-Newton* verilerini analiz

* neslihan.alan@gmail.com



Şekil 1. DEM L71 için oluşturulan; (a) geniş band, (b) üç renk ve (c) sertlik oranı görüntüleri.

Çizelge 1. DEM L71'in *Chandra* ACIS arşiv veri kayıtları.

Gözlem Adı	Tarih	Poz Süresi (ks)	Dedektör
3876	4 Temmuz 2003	48.98	ACIS-S
4440	6 Temmuz 2003	54.27	ACIS-S

etti ve süpürülen yıldızlararası ortamın (ISM) toplam kütesini $228 \pm 23 M_{\odot}$ olarak belirlediler.

2 Materyal ve Yöntem

2.1 X-ışın Verileri ve Ön İndirgeme

DEM L71'in ACIS-S3 dedektörüyle (Bautz ve diğ. 1998) 2003 yılında elde edilmiş iki gözlem verisi (~ 103 ks) *Chandra* X-ışın uydusu arşivinden alındı ve araştırmalarda kullanıldı. Çizelge 1'de listelen bu verilerin her birine ön indirgeme işlemleri, *Chandra* X-ışın grubu tarafından geliştirilen CIAO programının 4.9 sürümündeki `chandra_repro` komut dosyası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca verilerdeki arka plan parlamaları ve kozmik ışınlar temizlenmiştir. Bu işlemlerden sonra toplam etkin poz süresi ~ 100 ks'dir.

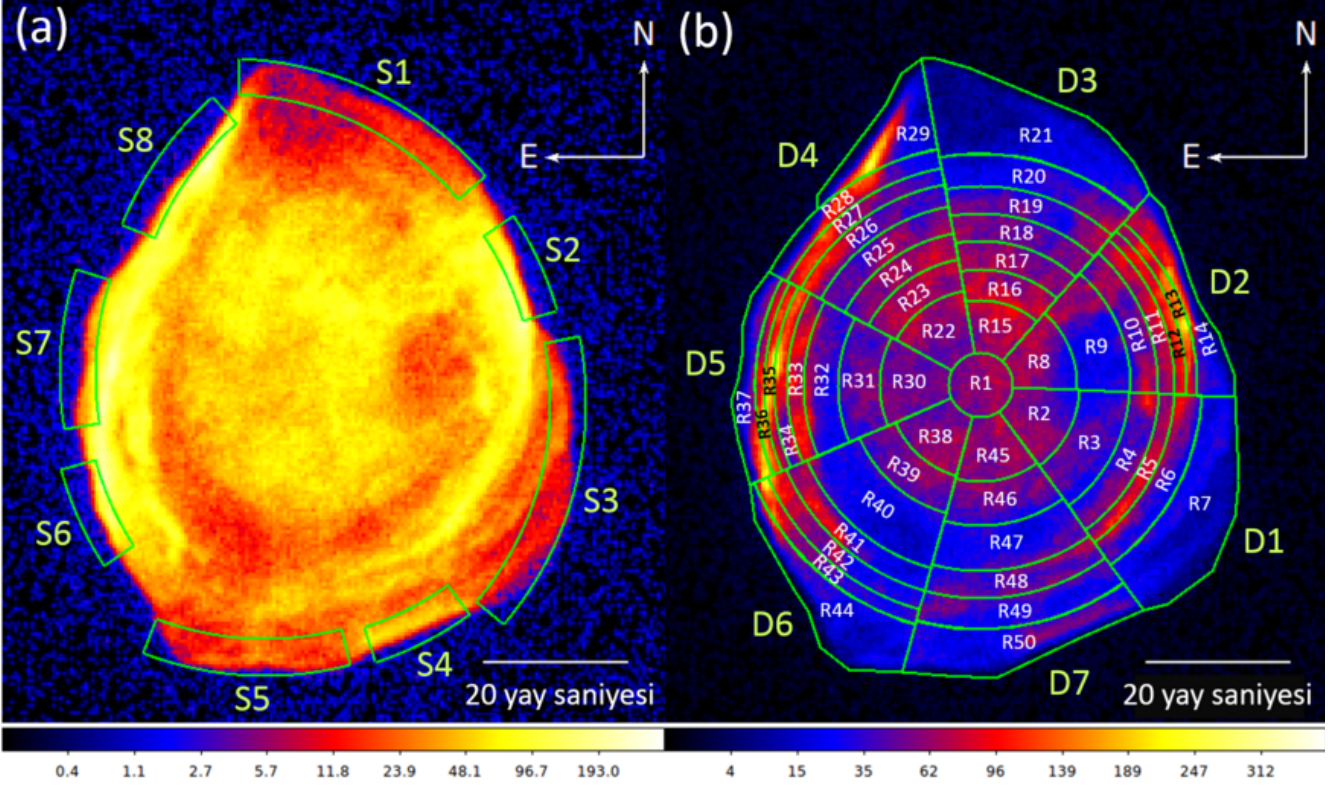
2.2 Görüntü Analizleri

SNR DEM L71'in detaylı morfolojik özelliklerini tayin edebilmek için ön indirgemesi yapılan veriler birleştirilerek geniş band ve üç renk görüntüleri elde edildi. Ayrıca kalıntıda sert ve yumuşak X-ışını bölgelerini belirlemek için sertlik oranı görüntüsü oluşturuldu. Bu görüntülerin oluşturulmasında CIAO programının 4.9 versiyonu ile SAO DS9 programları kullanılmıştır. Geniş band görüntüsü kalıntının geniş bir enerji aralığındaki (0.3–4.0 keV) morfolojik özelliklerini ortaya koymaktadır. Üç renk görüntüsünde üç ayrı enerji aralığı üç farklı renkle ifade edilmektedir (kırmızı: 0.3–0.7 keV, yeşil: 0.7–1.1, mavi: 1.1–4.0 keV). Bu sayede kalıntının hangi bölgesinden hangi tür (yumuşak, sert, orta sertlikte) X-ışınının yayıldığı belirlenebilir. Sertlik oranı (HR) görüntüsü oluşturulurken sert X-ışınımı (H) yumuşak X-ışınımına (S) bölünür, bölme işlemi sert X-ışınımı ile yumuşak X-ışınımı farkının bu ışınımın

toplamına bölünmesi şeklinde de yapılabilir ($HR=H/S$ ya da $HR=(H-S)/(H+S)$; Park ve diğ. 2006). Sertlik oranı görüntüsü sayesinde kalıntı üzerinde yumuşak ve sert X-ışınımı dağılımı genel hatlarıyla tespit edilebilir. Şekil 1'de, DEM L71 için oluşturulan geniş band, üç renk ve sertlik oranı görüntüleri verilmiştir.

2.3 Tayfsal Analizler

Tayfsal analizlerde öncelikle öncü şok dalgasıyla süpürülen ISM'yi temsil eden kalıntının dış kısımları analiz edildi. Bu kapsamda sekiz bölge seçilerek S1-S8 şeklinde etiketlendi (Şekil 2a). Bölgeler 0.3–4.0 keV enerji bandında ortalama olarak $\sim 5,000$ sayım içermektedir. Metal açısından zengin atılan madde gazının element bolluklarını ve plazma parametrelerini konumsal olarak elde etmek amacıyla da DEM L71 boyunca yedi radyal doğrultuda toplamda 50 bölge belirlendi (Şekil 2b). Kalıntı üzerinde seçilen her bir bölge de 0.3–4.0 keV enerji aralığında $\sim 9,000$ – $10,000$ X-ışın sayımı içerir. Şekil 2'de tayfsal analizi gerçekleştirilen ISM bölgeleri ve radyal bölgeler etiketleriyle birlikte kalıntının geniş band görüntüsü üzerine gösterilmiştir. Seçilen tüm bölgeler için her bir gözlem verisinden CIAO `specextract` komut dosyası kullanılarak tayflar alındı ve CIAO `combine_spectra` vasıtasıyla birleştirildi. Her bir bölgeden alınan tayflar enerji kanalı başına en az 20 X-ışın sayımı içerecek şekilde oluşturuldu. Tayf çıkarma işleminde arka alan olarak SNR'nin dış kısmında herhangi bir ışınım kaynağı içermeyen bölgeler kullanıldı. Belirlenen bölgelerden elde edilen tayflar, biri Galaktik diğeri LMC için olmak üzere iki soğurma kolunu bileşeni içeren, iyonlaşma dengesinde olmayan (NEI) düzlem şok modeli (XSPEC `vphshock`; Borkowski ve diğ. 2001) kullanılarak fit edildi. Modelleme işlemi için, iç kısımdaki kabuk çizgilerini ve güncellenmiş Fe-L çizgilerini de içeren (bkz. Badenes ve diğ. 2006) ATOMDB (Foster ve diğ. 2012) kodunu temel alan XSPEC programının NEI 2.0 versiyonu kullanıldı. Modelde Galaktik kolun yoğunluğu ($N_{H,Gal}$), DEM L71 yönünde Güneş bolluklarıyla (Anders ve Grevesse 1989), $1.58 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ (HI4PI işbirliği 2016) olarak sabit tutuldu. LMC element bollukları da Russell ve Dopita (1992) ile Schenck ve diğ. (2016) değerlerinde sabitlendi. Ayrıca LMC'nin radyal



Şekil 2. DEM L71'in; (a) çevresel maddesini incelemek için seçilen sekiz bölge, (b) konumsal özelliklerini ortaya koymak için radyal ve azimutal olarak belirlenen 50 bölge.

hızı (262.2 km s^{-1}) için kırmızıya kayma parametresi $z=8.75 \times 10^{-4}$ değerinde sabit tutuldu (Mc Connachie 2012).

2.3.1 Çevresel Madde

Çevresel madde (CSM) olarak da isimlendirilen şok dalgalarının süpürdüğü ISM bölgelerine (S1-S8) tek bileşenli düzlem şok ($\text{phabs} \times \text{vphabs} \times \text{vphock}$) modeli uygulandı. Modellerde öncelikle normalizasyon ($A=10^{-14} 1/(4\pi d^2) \int n_e n_H dV$) parametresi serbest bırakıldı. Burada d kaynağın Güneş'e uzaklığı, V X-ışın yayılım hacmi, n_e ve n_H sırasıyla elektron ve hidrojen yoğunluklarıdır. İntegral içindeki kısım hacim salma ölçüğü (EM) olarak tanımlanan nicelik olup, ışınım salan plazma miktarını ifade etmektedir. Ayrıca LMC kolon yoğunluğu $N_{\text{H, LMC}}$, elektron sıcaklığı (kT : k Boltzmann sabiti), iyonlaşma zaman ölçüğü ($n_e t$: n_e şok sonrası elektron yoğunluğu, t gazın şoka maruz kalmasından sonra geçen zaman) ile O, Ne, Mg, Si ve Fe bollukları da serbest bırakılan parametrelerdendi. Bu şekilde yapılan analizlerle kalıntının dış bölgelerine ait sekiz tayf için istatistiksel olarak uygun modeller elde edildi (indirgenmiş ki-kare; $\chi^2_\nu = 0.84-1.29$). Şekil 3'te S1 ve S5 bölgelerinin tayfları, model ve artıklarıyla birlikte örnek olarak gösterilmiştir. En iyi modellerden elde edilen tayf parametreleri de Çizelge 2'de listelenmiştir.

2.3.2 Metalce Zengin Atılan Madde

DEM L71'in ayrıntılı konumsal özelliklerini ortaya çıkarmak amacıyla radyal ve azimutal doğrultularda seçilen 50 bölgeye ait tayfların analizlerinde, kalıntının dış bölgelerinin tek bileşenli düzlem şok modelleriyle iyi bir şekilde temsil edilebildiği, ancak iç kısımların yeterince uygun modellenemediği görüldü

($\chi^2_\nu > 2.0$). Bu sebeple bu bölgelerin X-ışın tayflarına biri süpürülen ISM diğeri de patlamayla atılan madde bileşenleri olmak üzere iki bileşenli düzlem şok ($\text{phabs} \times \text{vphabs} \times \text{vphock} + \text{vphock}$) modeli uygulandı. ISM bileşeni için normalizasyon haricindeki tüm parametreler kalıntının dış kısmı için hesaplanan medyan değerlerde sabit tutulurken (bkz. Çizelge 2), atılan madde bileşeninde kT , $n_e t$ ve normalizasyon parametreleri ile O, Ne, Mg, Si ve Fe bollukları serbest bırakıldı. Diğer elementlere ait bolluklar yine Russell ve Dopita (1992) ve Schenck ve diğ. (2016) değerlerinde sabitlendi. Modellerde kolon yoğunluğu $N_{\text{H, LMC}}$ da ISM için hesaplanan medyan değerde sabit tutuldu. Böylece istatistiksel olarak kabul edilebilir sonuçlar elde edildi ($\chi^2_\nu < 1.6$). Gerçekleştirilen düzlem şok modelleriyle kalıntının element bollukları ve plazma parametreleri konumsal olarak elde edildi. Kalıntı üzerindeki bölgelerin bazılarının tayflarına yapılan en iyi modeller artıklarıyla birlikte örnek teşkil etmesi bakımından Şekil 4'te verilmiştir. En iyi modellerden elde edilen tayf parametreleri Çizelge 3'te listelenmiştir. Bu parametrelerin kalıntı üzerindeki dağılımları da Şekil 5'te gösterilmiştir. Kalıntının iç kısımlarında Fe bolluğu, ISM değerlerine nazaran önemli ölçüde yüksektir. O, Ne ve Mg bollukları istatistiksel belirsizlikler içinde genel olarak ISM değerleri ile uyumludur.

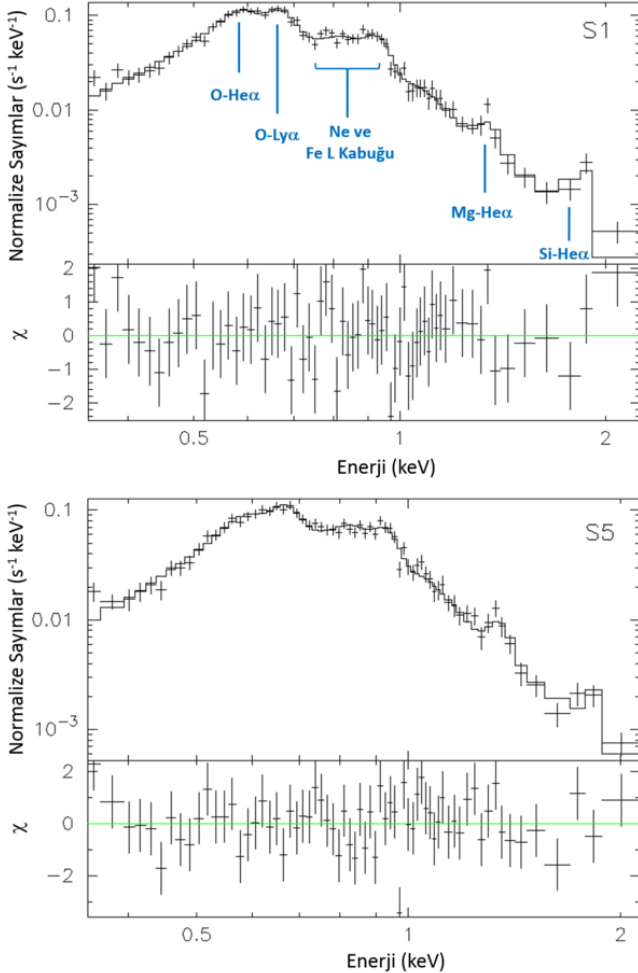
3 Tartışma ve Sonuç

3.1 Çevresel Ortamın Doğası

Süpernova patlaması ile oluşan şok dalgalarının süpürdüğü ISM'nin özelliklerini anlayabilmek için kalıntının dış kısmında farklı doğrultulardaki sekiz bölgenin (bkz. Şekil 2a; S1-S8) X-ışın tayfları incelendi. Tayfsal analizlerden belirlenen element

Çizelge 2. DEM L71'in dış kısmından seçilen sekiz bölgenin tayf analizlerinden hesaplanan plazma parametreleri ve element bollukları. Parametrelerin median değerleri son satırda listelenmiştir. Element bollukları Güneş bollukları cinsinden verilmiştir (Anders ve Grevesse 1989). Galaktik kolon yoğunluğu: $N_{\text{H,Gal}}=1.58 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ (HI4PI işbirliği 2016). Karşılaştırma amacıyla Russell ve Dopita (1992) ile Schenck ve diğ. (2016) tarafından hesaplanan LMC element bollukları sırasıyla; O=0.263, Ne=0.331, Mg=0.316, Si=0.309, Fe=0.363 ve O=0.13, Ne=0.20, Mg=0.20, Si=0.28, Fe=0.15 şeklindedir.

Bölge	n_{H} (10^{21} cm^{-2})	kT (keV)	$n_e t$ ($10^{11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$)	EM (10^{57} cm^{-3})	O	Ne	Mg	Si	Fe	χ^2_{ν}
S1	$0.20^{+0.10}_{-0.10}$	$0.31^{+0.05}_{-0.05}$	$2.79^{+2.48}_{-1.41}$	$27.16^{+11.97}_{-9.16}$	$0.11^{+0.02}_{-0.02}$	$0.18^{+0.02}_{-0.05}$	$0.12^{+0.08}_{-0.07}$	$0.52^{+0.46}_{-0.23}$	$0.08^{+0.03}_{-0.02}$	0.96
S2	$0.30^{+0.20}_{-0.10}$	$0.26^{+0.04}_{-0.04}$	$4.86^{+4.62}_{-2.54}$	$48.72^{+24.27}_{-18.51}$	$0.09^{+0.20}_{-0.01}$	$0.16^{+0.04}_{-0.03}$	$0.14^{+0.09}_{-0.07}$	$0.67^{+0.31}_{-0.33}$	$0.13^{+0.04}_{-0.03}$	1.28
S3	$0.20^{+0.20}_{-0.10}$	$0.34^{+0.04}_{-0.08}$	$3.29^{+21.93}_{-1.31}$	$23.24^{+23.91}_{-5.82}$	$0.12^{+0.20}_{-0.02}$	$0.17^{+0.03}_{-0.04}$	$0.09^{+0.08}_{-0.06}$	$0.33^{+0.34}_{-0.10}$	$0.07^{+0.03}_{-0.02}$	1.29
S4	$0.10^{+0.30}_{-0.10}$	$0.43^{+0.08}_{-0.07}$	$2.10^{+2.91}_{-1.02}$	$12.33^{+8.35}_{-4.03}$	$0.13^{+0.30}_{-0.03}$	$0.25^{+0.03}_{-0.03}$	$0.19^{+0.08}_{-0.07}$	$0.41^{+0.30}_{-0.13}$	$0.12^{+0.05}_{-0.03}$	1.08
S5	$0.10^{+0.10}_{-0.10}$	$0.36^{+0.07}_{-0.06}$	$2.50^{+6.69}_{-1.23}$	$18.52^{+13.98}_{-6.25}$	$0.11^{+0.20}_{-0.02}$	$0.18^{+0.04}_{-0.03}$	$0.14^{+0.07}_{-0.06}$	$0.26^{+0.18}_{-0.13}$	$0.10^{+0.03}_{-0.02}$	1.12
S6	$0.30^{+0.20}_{-0.20}$	$0.36^{+0.05}_{-0.06}$	$2.12^{+2.63}_{-0.89}$	$24.74^{+19.71}_{-7.96}$	$0.10^{+0.20}_{-0.02}$	$0.14^{+0.03}_{-0.04}$	$0.12^{+0.06}_{-0.05}$	$0.27^{+0.19}_{-0.15}$	$0.11^{+0.02}_{-0.03}$	0.97
S7	$0.20^{+0.30}_{-0.16}$	$0.36^{+0.05}_{-0.07}$	$2.44^{+4.12}_{-1.05}$	$18.14^{+20.29}_{-5.26}$	$0.11^{+0.02}_{-0.03}$	$0.20^{+0.04}_{-0.05}$	$0.12^{+0.06}_{-0.06}$	$0.33^{+0.25}_{-0.18}$	$0.16^{+0.05}_{-0.04}$	1.16
S8	$0.20^{+0.20}_{-0.15}$	$0.30^{+0.04}_{-0.04}$	$2.20^{+1.58}_{-1.02}$	$28.18^{+17.39}_{-8.37}$	$0.10^{+0.10}_{-0.02}$	$0.15^{+0.03}_{-0.03}$	$0.16^{+0.08}_{-0.07}$	$0.36^{+0.34}_{-0.15}$	$0.18^{+0.05}_{-0.04}$	0.84
Medyan	$0.20^{+0.10}_{-0.20}$	$0.35^{+0.04}_{-0.03}$	$2.47^{+2.01}_{-1.48}$	$23.99^{+18.55}_{-7.11}$	$0.11^{+0.01}_{-0.01}$	$0.18^{+0.02}_{-0.02}$	$0.14^{+0.05}_{-0.04}$	$0.34^{+0.13}_{-0.11}$	$0.12^{+0.01}_{-0.01}$	—



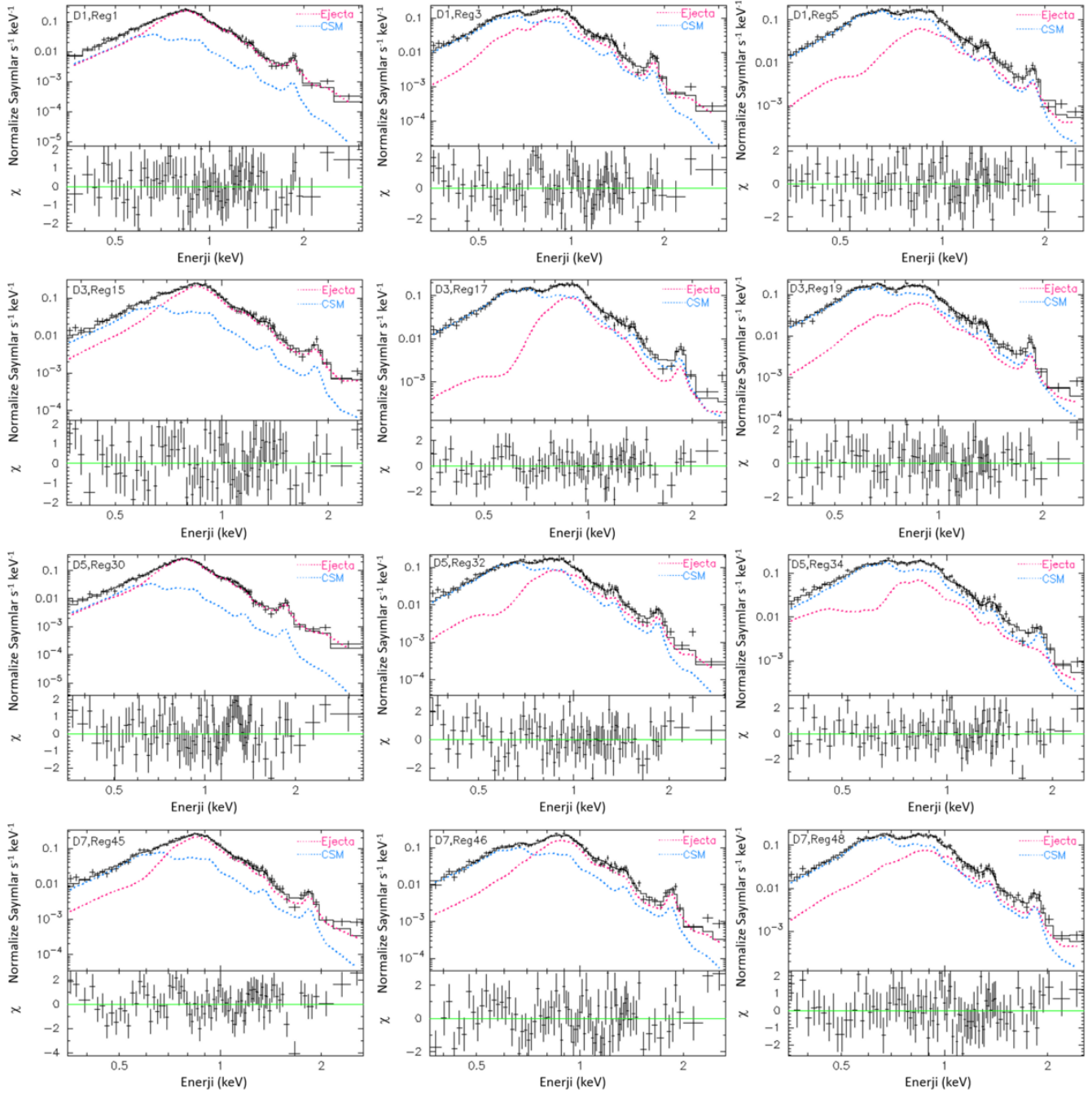
Şekil 3. DEM L71'in dış kısmından belirlenen S1 ve S5 bölgelerine ait tayflar için artıklarla birlikte en iyi tayfsal modeller. Tayf çizgilerine ilişkin elementler üst panelde etiketlenmiştir.

bollukları kalıntının dış kısmında atılan maddenin değil çevresel maddenin baskın olduğunu göstermektedir. Çizelge 4'te elde edilen bulguların literatürde Schenck ve diğ. (2016), Hughes ve diğ. (2003) ve Russell ve Dopita (1992) tarafından verilen değerlerle bir karşılaştırması verilmiştir. Bu çalışmada elde edilen elektron sıcaklığı (kT) ve iyonlaşma zaman ölçeği ($n_e t$) parametreleri Schenck ve diğ. (2016) ve Hughes ve diğ. (2003) bulguları ile istatistiksel belirsizlikler içinde tutarlıdır. Si ve Fe bollukları da her iki araştırmacının sonuçları ile genel olarak uyumludur. O, Ne ve Mg bollukları Schenck ve diğ. (2016) bulguları ile uyumluken, Hughes ve diğ. (2003) değerlerinden ~ 2 kat daha düşüktür. Si bolluğu Russell ve Dopita (1992) tarafından verilen değerlerle (istatistiksel belirsizlikler dahilinde) tutarlı olsa da, O, Ne, Mg, Fe için elde edilen bolluklar $\sim 2-3$ kat düşüktür. Çalışmada CSM için elde edilen bulgular literatürde verilen güncel değerlerle genel olarak uyumluken, eski tarihli çalışmalarla ciddi uyumsuzluklar söz konusudur. Bu durum kullanılan modellerin daha yeni ve kapsamlı olmasından, ayrıca gözlem verilerinin daha uzun poz süresine sahip olmasından (yüksek foton istatistikleri) kaynaklanıyor olabilir.

3.2 Süpernova ile Atılan Maddenin Konumsal Yapısı

DEM L71 üzerinde konumsal olarak belirlenen 50 alt bölge için gerçekleştirilen X-ışın tayf analizi, kalıntının iç kısımlarından itibaren $\sim 22''$ açısal uzaklığa kadar Fe bolluklarının oldukça yüksek olduğunu açığa çıkarmıştır (bkz. Şekil 5). Bu durum metalce zengin atılan maddenin kalıntının geometrik merkezinden uzaklık r olmak üzere, kabaca $r=22''$ civarına kadar uzandığını gösteriyor. Fe'nin aksine, O ve Ne için hesaplanan bolluklar ISM değerleri mertebesindedir. Atılan maddedeki ortalama Fe/O bolluk oranı, Güneş'inkine nazaran ~ 15 kat daha yüksektir. Si bollukları çoğu doğrultuda oldukça düşüktür ve D2 (batı) yönü hariç, genellikle maksimum değerine $r=18''-20''$ civarında ulaşır. Hemen hemen tüm doğrultularda $r \leq 26''$ için ortalama ISM değerinden yüksek olan Mg bolluğu, sadece batı yönünde (D2) $r \approx 12''$ uzaklığında ISM değerine düşmektedir. Mg ayrıca kalıntının güneydoğu kesimlerinde (D6, D7 yönleri) nispeten daha yüksektir.

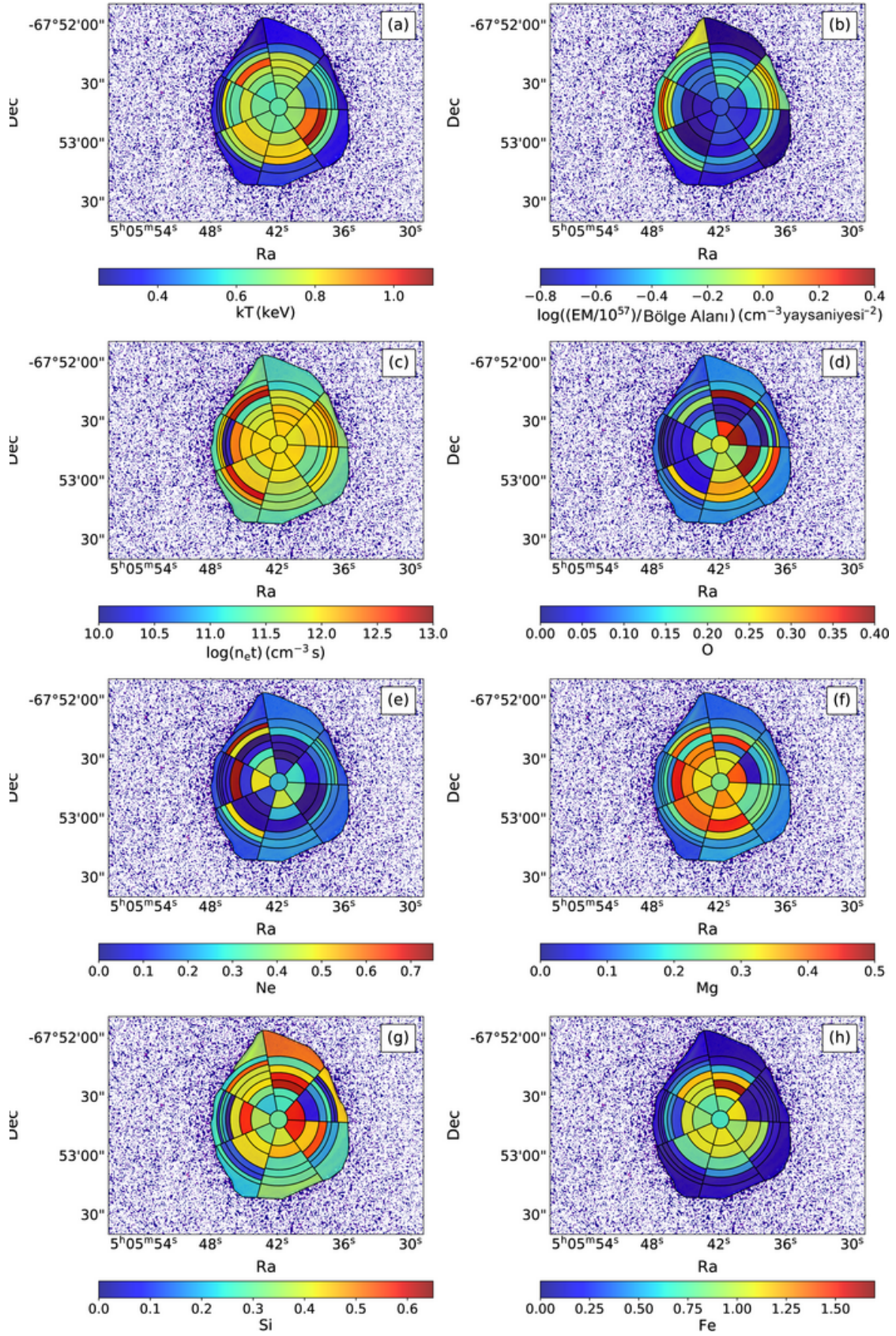
Fe neredeyse tüm doğrultular için $r=22''$ kadar ortalama ISM bolluklarından $\sim 7-8$ kat yüksek iken, batı (D2) yönünde $r \approx 12''$ uzaklığında aniden ortalama ISM değerine düşmektedir



Şekil 4. Radyal ve azimutal doğrultularda belirlenen bölgelerin bazılarında ait tayflar için artıklarla birlikte en iyi tayfsal modeller. Her bir panelde bulunan “Ejecta” ve “CSM” etiketleri sırasıyla düzlem şok modelindeki atılan madde ve şoka uğramış çevresel madde bileşenlerini temsil etmektedir.

(Şekil 5h). Patlama ile atılan Fe, doğu-batı doğrultusunda kuzey-güneyden daha fazla yayılmıştır. Bu Tip la kalıntısındaki merkezi Fe'nin asimetrik dağılımı, asimetrik bir patlamadan kaynaklanmış olabilir (Zhou ve Vink 2018; Post ve diğ. 2014; Park ve diğ. 2007). Asimetrik Tip la patlamalarının varlığını öne süren pek çok SD ve DD senaryoları mevcuttur (bkz. Gamezo, ve diğ. 2005; Maeda ve diğ. 2010; Malone ve diğ. 2014; Kushnir ve diğ. 2013). Metalce zengin atılan madde gazı farklı yönler için farklı kimyasal kompozisyonlar göstermektedir. Örneğin DEM L71'in batı (D1, D2) ve doğu (D5) kısımlarında Fe/Si ~ 2 iken, kuzeydeki bölgeler

için bu oran ~ 3.5 civarındadır. Kalıntının güney (D6, D7) kısımlarında ise Fe/Si ~ 2.5 mertebesindedir. Bu durum, süpernova patlaması sırasında farklı katmanlarda Si-yanmasının bir sonucu olabilir (Thielemann ve diğ. 1986). Alternatif olarak, gözlenen asimetrik dağılım, tekdüze olmayan bir çevresel ortamda küresel olarak simetrik bir Tip la süpernova patlamasının sonucu da olabilir. Kepler'in SNR'sine benzer şekilde, çevresel ortamın yoldaş yıldız veya ata yıldızdan gelen yıldız rüzgarları tarafından etkilendiği durumlarda CSM ile atılan madde etkileşiminin oluşu SD modelleri dikkate alınabilir (bkz. Chiotellis ve diğ. 2012; Patnaude ve diğ. 2012; Burkey



Şekil 5. Plazma parametreleri ve element bolluklarının DEM L71 üzerindeki dağılımı. (a) elektron sıcaklığı kT , (b) salma ölçüğü EM , (c) iyonlaşma zaman ölçüğü $n_e t$ ve (d) O, (e) Ne, (f) Mg, (g) Si, (h) Fe bollukları. Bolluklar Güneş bollukları cinsinden verilmiştir (Anders ve Grevesse 1989).

Çizelge 4. DEM L71'in çevresel maddesi için bu çalışmada elde edilen bulgular ile literatür değerleri karşılaştırması. Referanslar: [1]: Bu çalışma; [2]: Schenck ve diğ. (2016) (DEM L71 için süpürülen ISM parametreleri); [3]: Hughes ve diğ. (2003) (DEM L71'in dış kenar bölgesinin model parametreleri); [4]: Russell ve Dopita (1992) (LMC için ortalama ISM bollukları).

$N_{\text{H, LMC}} (\times 10^{21})$ (cm^{-2})	kT (keV)	$n_e t (\times 10^{11})$ (cm^{-3}s)	O	Ne	Mg	Si	Fe	Ref.
$0.20^{+0.10}_{-0.20}$	$0.35^{+0.04}_{-0.03}$	$2.47^{+2.01}_{-1.48}$	$0.11^{+0.01}_{-0.01}$	$0.18^{+0.02}_{-0.02}$	$0.14^{+0.05}_{-0.04}$	$0.34^{+0.13}_{-0.11}$	$0.12^{+0.01}_{-0.01}$	[1]
—	$0.45^{+0.01}_{-0.01}$	$2.70^{+3.40}_{-2.10}$	$0.11^{+0.01}_{-0.01}$	$0.20^{+0.01}_{-0.01}$	$0.18^{+0.01}_{-0.02}$	$0.29^{+0.05}_{-0.03}$	$0.15^{+0.01}_{-0.01}$	[2]
$0.58^{+0.04}_{-0.06}$	$0.47^{+0.03}_{-0.03}$	$4.37^{+1.25}_{-0.98}$	$0.21^{+0.03}_{-0.02}$	$0.42^{+0.05}_{-0.04}$	$0.37^{+0.08}_{-0.07}$	$0.33^{+0.11}_{-0.11}$	$0.09^{+0.01}_{-0.01}$	[3]
—	—	—	0.263	0.331	0.316	0.309	0.363	[4]

ve diğ. 2013). Gözlemler, Tip Ia süpernovalarının bu tip bir etkileşime girebileceğini göstermektedir (Sternbergve diğ. 2011; Foley ve diğ. 2012; Maguire ve diğ. 2013). DEM L71, CSM ile etkileşime giren bu Tip Ia süpernova popülasyonuna ait olabilir. Kalıntının batı sınırı için ölçülen yoğunluk ($n_0 \simeq 4 \text{ cm}^{-3}$), ortalama ISM değerinden önemli ölçüde yüksektir. Bu durum, atılan maddenin bu yönde diğerlerine göre daha az yayılmasına ve asimetrik bir dağılım meydana gelmesine sebep olmuş olabilir. Kalıntındaki asimetrik yapı patlamanın doğası ve atılan madde ile çevresel madde etkileşiminin bileşke sonucu da olabilir.

Konumsal olarak gerçekleştirilen tayfsal analizlerle, kalıntı için daha önce yapılan Tip Ia tanımlamalarıyla (Hughes ve diğ. 1998, 2003; Rakowski ve diğ. 2003; van der Heyden ve diğ. 2003) uyumlu olarak yüksek Fe bollukları ile ihmal edilebilir düzeyde O bollukları tespit edilmiştir. Ayrıca Fe bakımından zengin merkezi bölgenin ($r \leq 26''$, $kT \simeq 0.70 \text{ keV}$), dış kısımlardan ($r > 26''$, $kT \simeq 0.40 \text{ keV}$) daha sıcak olduğu görülmüştür (Şekil 5a). Salma ölçeği (EM) yüzey parlaklık dağılımı ile uyumludur ve genellikle $r \simeq 30''$ uzaklığında tepe değerine ulaşır (Şekil 5b). Patlama ile atılan metalce zengin maddenin iyonlaşma zaman ölçeği ($n_e t$) genellikle kalıntının merkezi kısımlarında yüksek değerlere sahiptir ve çoğu doğrudan için $r \simeq 28''-30''$ uzaklığında zirve yaparak bunun ötesinde azalır (Şekil 5c). Fe bollukları batı yönü haricinde genellikle $r \simeq 22''$ uzaklığında ortalama ISM değerine düşmektedir (Şekil 5h). Bu durum şoka uğramış çevresel madde ile patlama sonucu atılan madde arasındaki sınır olarak tanımlanan değme süresizliğinin (CD) konumunun $r \simeq 22'' \simeq 5 \text{ pc}$ 'te (50 kpc LMC uzaklığı için; Freedman ve diğ. 2001) olduğuna işaret etmektedir. Kalıntının batı yönünde CD'nin konumu karmaşık ve belirsizdir. DEM L71 için oluşturulan X-ışın geniş band ve üç renk görüntülerinde bu yönde dikkat çeken sönük dairesel yapı da atılan maddenin asimetrik bir dağılıma sahip olduğunu desteklemektedir.

3.3 DEM L71'in Dinamik Özellikleri

Kalıntının patlama enerjisi, yaşı, şok hızı gibi dinamik özellikleri Sedov-Taylor çözümü kullanılarak (Sedov 1959) hesaplandı. Bu çözümün uygulanabilmesi için öncelikle öncü şok tarafından ısıtılan ISM'nin sıcaklık (kT) ve salma ölçeğinin (EM) bilinmesi gerekmektedir. Araştırmalarımız kapsamında DEM L71 kalıntısının çevresel maddesi, belirlenen sekiz bölge ile detaylı bir şekilde incelendi. DEM L71 için gerçekleştirilen Sedov-Taylor çözümünde kalıntının dış kısmından seçilen bu sekiz bölgenin (bkz. Şekil 2a; S1-S8) Çizelge 2'de listelenen sıcaklık ve salma ölçeği parametreleri kullanılmıştır. Hacim salma ölçeği ortamdaki elektron (n_e) ve hidrojen (n_{H}) yoğunlukları ile X-ışın yayılım hacminin (V) çarpımıyla ifade edildiğinden ($EM = n_e n_{\text{H}} V$; Park ve diğ. 2009), ışıının

Çizelge 5. DEM L71'in Sedov çözümünde kullanılan V , n_0 değerleri ile türetilen dinamik parametreler (V_s , τ_{sed} ve E_0).

Kabuk Bölgesi	$V (\times 10^{56})$ (cm^3)	n_0 (cm^{-3})	V_s (km s^{-1})	τ_{sed} (yıl)	$E_0 (\times 10^{51})$ (erg)
S1	3.75	1.94	512	8,142	1.90
S2	1.41	4.24	472	6,833	1.62
S3	4.14	1.71	534	7,097	1.37
S4	1.42	2.12	603	5,974	1.85
S5	2.83	1.85	558	7,309	2.00
S6	1.42	3.02	553	6,173	1.88
S7	2.16	2.09	553	5,568	0.96
S8	2.11	2.63	508	6,478	1.24

yayan uzay hacminin ve salma ölçeğinin bilinmesi durumunda ortamdaki elektron ve hidrojen yoğunlukları belirlenebilir. Kalıntının dış kısmından belirlenen sekiz kabuk bölgesi (S1-S8) için X-ışın yayılım hacimlerinin hesaplanmasında her bir bölge alanının bölgenin açısız kalınlığı ile çarpımı dikkate alınmıştır. Kabuk bölgelerinin açısız kalınlık değerleri hemen hemen aynıdır ve görüş hattı boyunca $\sim 1.2 \text{ pc}$ yol uzunluğuna denk gelmektedir (50 kpc LMC uzaklığı için, Freedman ve diğ. 2001). Kabuk bölgeleri için bu yöntem ile hesaplanan hacimler Çizelge 5'te listelenmiştir. DEM L71 gibi orta yaşlı kalıntılar için adyabatik genişleme dikkate alınabilir, bu durumda normal bir kimyasal kompozisyonda ortalama yük durumu $n_e \simeq 1.2 n_{\text{H}}$ ve güçlü bir adyabatik şok için $n_{\text{H}} = 4 n_0$ (n_0 ; şok öncesi hidrojen sayı yoğunluğu) şeklinde ifade edilir. Bu kabuller altında hidrojen sayı yoğunluğu $n_0 = 0.25 \times \sqrt{EM/1.2V}$ olur. Kabuk bölgelerinden hesaplanan EM ve V parametreleri hidrojen sayı yoğunluğu bağıntısına yerleştirilerek bu bölgeler için n_0 değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 5'te verilmiştir. Hesaplanan sayı yoğunluğu değerleri proton kütlesiyle çarpılarak ($\rho = n_0 m_p$) ortalama yoğunluklar elde edilmiştir. İyonize plazma sıcaklığı, ortamın ortalama molekül ağırlığına ve şok hızına doğrudan bağlıdır. İyonize plazmalar için; iyonlar ve elektronlar arasında termal enerji eş bölümü (Ghavamian ve diğ. 2007), güçlü şok ($\rho = 4\rho_0$) ve monoatomik gaz ($\gamma = 5/3$) varsayımı altında sıcaklık; $T = 3\hat{m}V_s^2/16k_B$ bağıntısıyla ifade edilebilir. Burada k_B ; Boltzmann sabiti, \hat{m} ; proton kütlesi cinsinden $\hat{m} \simeq 0.6 m_p$ ifadesiyle verilen ortalama molekül ağırlığıdır. S1-S8 kabuk bölgelerine yapılan tayfsal modeller vasıtasıyla elde edilen elektron sıcaklığı değerleri ($kT = 0.26-0.43 \text{ keV}$) ilgili bağıntıda yerine konularak kalıntı için şok hızları (V_s) hesaplanmış ve Çizelge 5'te listelenmiştir. DEM L71'in Sedov yaşını belirlemek için $V_s = 2r/5t$ formülü kullanılmıştır. Burada r ve t ; sırasıyla kalıntı için yarıçap ve yaştır. DEM L71'in $r \simeq 40''$ olan açısız yarıçapı, LMC'nin yaklaşık 50 kpc uzaklıkta

bulunduğu dikkate alındığında $r=9.70$ pc'lik bir fiziksel yarıçapa karşılık gelmektedir. Kalıntının çok hızlı değerleri ve ortalama yarıçapı kullanılarak DEM L71 için Sedov yaş hesaplamaları yapılmış sonuçlar Çizelge 5'te verilmiştir. Kalıntının patlama enerjisi, $E_0=r^5 t^{-2} \rho$ bağıntısı ile hesaplanmış ve Çizelge 5'te listelenmiştir. DEM L71 kalıntısı için hesaplanan çok hızlı, Sedov yaşı ve patlama enerjisinin medyan değerleri, sırasıyla, $\sim 545 \pm 37 \text{ km s}^{-1}$, $\sim 6,660 \pm 770$ yıl, ve $E_0=1.74 \pm 0.35 \times 10^{51}$ erg şeklindedir. Hesaplanan çok hızlıları ISM tarafından yavaşlatılmış alt sınırları ifade ettiğinden buna bağlı olarak elde edilen Sedov yaş değerleri de üst sınırları temsil etmektedir ve kalıntı için literatürde verilen yaş değerlerinden ($4,360 \pm 290$ yıl, $\sim 5,000$ yıl; Ghavamian ve diğ. 2003; Hughes ve diğ. 1998) nispeten daha büyüktür. Kalıntının patlama enerjisi Tip Ia mekanizmalarıyla uyumludur.

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Üniversitesi *Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi* tarafından FOA-2018-30716 numaralı *Öncelikli Alan Araştırma Projesi* ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Anders E., Grevesse N., 1989, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 197
- Badenes C., Borkowski K. J., Hughes J. P., Hwang U., Bravo E., 2006, *ApJ*, 645, 1373
- Bautz M. W., Pivovarov M., Baganoff F., ve diğ., 1998, *SPIE*, 3444, 210
- Borkowski K. J., Lyerly W. J., Reynolds S. P., 2001, *ApJ*, 548, 820
- Burkey M., Reynolds S., Borkowski K., Blondin, J. M., 2013, *ApJ*, 764, 63
- Chiotellis A., Schure K., Vink J., 2012, *A&A*, 537, 139
- Davies R. D., Elliott K. H., Meaburn J., 1976, *MmRAS*, 81, 89
- Foley R. J., Simon J. D., Burns C. R., ve diğ., 2012, *ApJ*, 752, 101
- Foster A. R., Ji L., Smith R. K., Brickhouse N. S., 2012, *ApJ*, 756, 128
- Freedman W. L., Madore B. F., Gibson B. K., ve diğ., 2001, *ApJ*, 553, 47
- Gamezo V. N., Khokhlov A. M., Oran E. S., 2005, *ApJ*, 623, 337
- Ghavamian P., Rakowski C. E., Hughes J. P., Williams T. B., 2003, *ApJ*, 590, 833
- Ghavamian P., Laming J. M., Rakowski, C. E., 2007, *ApJL*, 654, L69
- HI4PI işbirliği, Ben Bekhti N., Flöer L., Keller, R., ve diğ., 2016, *A&A*, 594, A116
- Hughes J. P., Hayashi I., Koyama K., 1998, *ApJ*, 505, 732
- Hughes J. P., Ghavamian P., Rakowski C. E., Slane, P. O., 2003, *ApJ*, 582L, 95
- Kushnir D., Katz B., Dong S., Livne E., Fernández R., 2013, *ApJL*, 778, L37
- Long K. S., Helfand D. J., Grabelsky D. A., 1981, *ApJ*, 248, 925
- Iben I. Jr., Tutukov A. V., 1984, *ApJ*, 282, 615
- Maeda K., Benetti S., Stritzinger M., ve diğ., 2010, *Natur*, 466, 82
- Maggi P., Haberl F., Kavanagh P. J., ve diğ., 2016, *A&A*, 585A, 162
- Maguire K., Sullivan M., Patat F., ve diğ., 2013, *MNRAS*, 436, 222
- Malone C. M., Nonaka A., Woosley S. E., Almgren A. S., Bell J. B., Dong S., Zingale M., 2014, *ApJ*, 782, 11
- Maoz D., Mannucci F., Nelemans G., 2014, *ARA&A*, 52, 107
- McConnachie A. W., 2012, *AJ*, 144, 4
- Nomoto K., 1982, *ApJ*, 253, 798
- Pagnotta A., Schaefer B. E., 2015, *ApJ*, 799, 101
- Park T., Kashyap V. L., Siemiginowska A., van Dyk D. A., Zezas A., Heinke C., Wargelin B. J., 2006, *ApJ*, 652, 610
- Park S., Slane P. O., Hughes J. P., Mori K., Burrows D. N., Garmire G. P., 2007, *ApJ*, 665, 1173

- Park, S., Kargaltsev, O., Pavlov, G. G., ve diğ., 2009, *ApJ*, 695, 431-441
- Patnaude D., Badenes C., Park S., Laming J., 2012, *ApJ*, 756, 6
- Post S., Park S., Badenes C., ve diğ., 2014, *ApJL*, 792, L20
- Rakowski C. E., Ghavamian P., Hughes J. P., 2003, *ApJ*, 590, 846
- Ruiz-Lapuente P., 2014, *NewAR*, 62, 15
- Ruiz-Lapuente P., Damiani F., Bedin L. ve diğ., 2018, *ApJ*, 862, 124
- Russell S. C., Dopita M. A., 1992, *ApJ*, 384, 508
- Sedov, L. I., 1959, *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*, New York: Academic Press
- Schenck A., Park S., Post S., 2016, *AJ*, 151, 161
- Siegel J., Dwarkadas V. V., Frank K., Burrows D. N., Panfichi A., 2020, *AN*, 341, 163
- Sternberg A., Gal-Yam A., Simon D., ve diğ., 2011, *Science*, 333, 856
- Thielemann F., Nomoto K., Yokoi K., 1986, *A&A*, 158, 17
- van der Heyden K. J., Bleeker J. A. M., Kaastra J. S., Vink J., 2003, *A&A*, 406, 141
- Wang B., Han Z., 2012, *NewAR*, 56, 122
- Wang B., 2018, *RAA*, 18, 49
- Whelan J., Iben I., 1973, *ApJ*, 186, 1007
- Zhou P., Vink J., 2018, *A&A*, 615, A150, 14

Access:

M23-0386: [Turkish J.A&A — Vol.4, Issue 3.](#)