

GLEAM Radyo Kaynakları Kataloğundaki Aday Süpernova Kalıntısı G20.1-0.2'nin Gama Işımasının Araştırılması

Pınar Özyılmaz¹  , Tülün Ergin² 

¹ Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü, 06800, Ankara, Türkiye

² Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Kuzey Kıbrıs Kampüsü, 99738 Kalkanlı, Güzelyurt, KKTC

Accepted: February 1, 2023. Revised: December 27, 2022. Received: November 14, 2022.

Özet

GaLactic ve Extragalactic All-sky Murchison Widefield Array (GLEAM) araştırmasında ortaya çıkartılan yeni bir süpernova kalıntısı (SNK) adayı olan G20.1-0.2, Fermi Geniş Alan Teleskobu'nun (*Fermi*-LAT) dördüncü (4FGL) kataloğunda bulunan nokta-yapısına sahip 4FGL J1828.0-1133 gama ışını kaynağı ile örtüşmektedir. Bu çalışmada, G20.1-0.2'nin 14 yıl boyunca *Fermi*-LAT tarafından toplanmış olan gama ışını verilerini analiz ettik. 1-300 GeV enerjileri aralığında yaptığımız analiz sonucunda, 4FGL J1828.0-1133'ü $\sim 15\sigma$ sinyal arka-alan seviyesinde keşfettik ve bu kaynağın genişlik ölçümlerini yaptık. 0.2-300 GeV enerji aralığında bir nokta kaynak için çıkardığımız enerji tayfinin, tayf indeksleri $\alpha=2.6$ ve $\beta=0.2$ olan bir log-parabol fonksiyonuna uyduğunu tespit ettik. Bu sonuçlarımızın, *Fermi*-LAT'ın 4FGL kataloğunda verilmiş olan tayf ölçüm değerleri ile uyum içinde olduğunu bulduk. G20.1-0.2'nin konumunun, 4FGL J1828.0-1133'nin konum hata elipsi içinde kaldığını, çıkardığımız gama-ışını gökyüzü TS haritası üzerine GLEAM radyo verisi konturlarını çizdirerek gösterdik

Abstract

G20.1-0.2, a new supernova remnant (SNK) candidate uncovered in the GaLactic and Extragalactic All-sky Murchison Widefield Array (GLEAM) survey, coincides with a point-like gamma-ray source called 4FGL J1828.0-1133 from the fourth (4FGL) catalog of the Fermi Large Area Telescope (*Fermi*-LAT). In this study, we analyzed the gamma-ray data of G20.1-0.2 collected by *Fermi*-LAT over 14 years. As a result of our analysis in the range of 1-300 GeV energies, we detected 4FGL J1828.0-1133 with a significance of $\sim 15\sigma$ and we measured its extension. The energy spectrum that we extracted in the 0.2-300 GeV energy range, assuming a point-like source, obeys a log-parabola function with energy spectral indices of $\alpha=2.6$ and $\beta=0.2$. We found that these results are in good agreement with the spectral measurement values given in the 4FGL catalog of *Fermi*-LAT. We showed that the location of G20.1-0.2 remains within the error ellipse of the best-fit position of 4FGL J1828.0-1133 by presenting the GLEAM radio contours on the gamma-ray TS map.

Anahtar Kelimeler: gama-rays, radio wavelengths, supernova remnants, interstellar medium

1 Giriş

Süpernova kalıntıları (SNK) kozmik ışınların ivmelenme mekanizmalarını, uzayda bulunan kozmik ışınlar ve yıldızlararası ortamdan (YAO) kaynaklanan enerji yoğunluğunu anlamamız açısından büyük önem taşımaktadır. Gama ışını verileri, genç SNKların kozmik ışınların enerjilerini PeV düzeyine kadar ivmelendirebildikleri gözlemlenmiştir (Araya ve diğ. 2023). Bu SNK'ların incelenmesi ve sınıflandırılması alanındaki en kapsamlı katalog, Green süpernova kalıntıları kataloğudur (Green 2019).

SNK'ların tespit edilmesi için en sık kullanılan yöntem kalıntının şokları tarafından oluşan senkrotron ışımalarının radyo gözlemlerini kullanmaktır. Bu çalışmada ise GaLactic ve Extragalactic All-sky Murchison Widefield Array (GLEAM) tarafından yapılan radyo gözlemleri sonucunda aday SNK olarak duyurulan G20.1-0.2 kaynağını 14 senelik Fermi-Geniş Alan Teleskobu (*Fermi*-LAT) verilerini kullanarak inceledik.

Haziran 2008'de çalışmaya başlayan *Fermi*-LAT, gökyüzünü devamlı tarayarak, 200 MeV ile 300 GeV enerjileri arasındaki gama ışınlarının yön, enerji ve akılarının tespit edilmesini sağlar. Dolayısıyla, yıllar içinde topladığı veriler

analiz edilerek, gama ışını kaynaklarını içeren kapsamlı kataloglar oluşturmuştur (S. Abdollahi ve diğ. 2022). Bu kataloglar, *Fermi*-LAT'ın gama ışınlarında keşfettiği çeşitli SNK'ları da içermektedir (Araya ve diğ. 2023).

2013'ten bu yana gözlemlerini sürdürmekte olan GLEAM, 2019 yılında 27 yeni olası SNK'nın keşfini duyurdu (Hurley-Walker ve diğ. 2019). Bu 27 kaynağın radyo ışımalarının Güneş'ten gelen radyo dalgaları ile karışmasının önüne geçmek için, gözlemler yalnızca geceleri yapılmıştır. Her bir tarama 8-10 saat arasında belirli bir dik açıklıkta yapılmıştır. Her bir gecede gözlem yüz yirmişer saniyelik taramalara bölünerek her bir frekans için onar dakika süre ile yaklaşık yüz sekizer saniyelik kullanılabilir veriler sağlamaktadır.

GLEAM tarafından rapor edilen bu 27 SNK ile Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) tarafından raporlanan ışımalarıyla, orta-kızılötesi ışımaları arasında bir bağlantı ve çıkışma bulunmadığından, ışımaların ısıl olmadıkları sonucu çıkarılmıştır. Bu kaynakların SNK olup olmadıkları hakkında çıkarım yapabilmesi için bakılması gereken kriterlerden en önemlileri; SNK morfolojisinin kabuk veya yarı-kabuk görünümü göstermesi, akı değerlerinin ısıl olmayan tayf aralıklarında bulunması ve gözlemlenen ışımaların WISE 8- μm , 12- μm , 22- μm bantlarında ilgili ışımalara sahip olmamasıdır. SNK G20.1-0.2, radyo gözlemlerinde kısmi kabuk yapısı gösterip

* pinarozyilmaz02@gmail.com

bilinen bir SNK olan G20.0-0.2 tarafından yarı dairesel ark şeklinde kesilmektedir. G20.0-0.2 kaynağı 11.2 kpc mesafede bulunmaktadır bu nedenle G20.1-0.2'nin olağandışı büyüklükte olacağından G20.0-0.2 ile aynı boyutta olmadıklarını söyleyebiliriz (Hurley-Walker ve diğ. 2019; Ranasinghe ve diğ. 2021). Ayrıca, GLEAM tarafından bu SNK için, oldukça kalabalık ve karmaşık arka alan ışımalarından ötürü güvenilir aki sonuçları alınamamıştır (Hurley-Walker ve diğ. 2019).

Bu çalışmada, GLEAM tarafından radyo dalga boylarında keşfedilen G20.1-0.2 ile uzamsal olarak örtüşen ve dördüncü Fermi-LAT kataloğu (4FGL) kaynaklarından olan 4FGL J1828.0-1133'ü analiz ettik (S. Abdollahi ve diğ. 2022). §2'de Fermi-LAT verilerinin indirilmesi (§2.1), arka alan modelinin oluşturulması (§2.2), gökyüzü haritalarının ve enerji tayfinin oluşturulması (§2.3) anlatıldı. §3'te ise analiz sonuçları verildi ve bu sonuçlar yorumlandı.

2 Metot

2.1 Verilerin İndirilmesi

Bu analizde, Fermi-LAT'ın 2008-08-04 ve 2022-11-04 tarihleri arasında toplanmış olan veriler kullanılmıştır. Analiz edilecek bölge, merkezi 4FGL J1828.0-1133 gama ışını kaynağının konumunun sağ açıklığı (S.A.) 277°.195 ve dik açıklığı (D.A.) -11°.449 olan yarıçapı 20°olarak seçilen dairesel bir alandır. Kullanılan veriler, enerjisi 0.2 ve 300 GeV arasında değişen gama ışınlarını kapsamaktadır.

Analiz, Fermi tarafından sağlanmış olan Fermi Science Tools (FST) yazılımı ve fermipy python analiz paketi kullanılarak yapılmıştır. Sonuçların görüntülenmesi için SAOImageDS9 programı kullanılmıştır.

G20.1-0.2'nin veri analizinde fermipy tarafından sağlanan gtselect komutunu, maksimum baş ucu açısını 90°'ye sabitleyebilmek için, gtmktime komutunu ise iyi zaman aralıklarını seçmek için kullandık. İyi zaman aralıkları, Fermi-LAT'ın kullanılabilir veri kaydettiği aralıklardır, çünkü LAT yazılım güncellemeleri, uzay aracı manevraları sırasında ve Güney Atlantik Anomalisi üzerinden geçerken veri toplamamaktadır. Yaptığımız aralıklı olasılık analizinde kullandığımız aralık (piksel) genişliği 0°.05×0°.05 olarak seçilmiştir.

Analiz için evclass (event class) 128 kullanılmıştır. Verilerin içeriğindeki foton dosyaları bilimsel analiz ve event sınıfları için gerekli bilgileri barındırırken, genişletilmiş veri dosyalarında "Level 1" analizinden gelen bazı ekstra bilgiler barındırmaktadır. Analizde kullanılan IRF (instrument response function) dosyası için pass 8 data (P8R3) kullanılmıştır. Bu filtreler ile indirgenen veriler aralıklı ve filtrelenmiş esnek görüntü taşıma sistemi (FITS) dosyaları olarak kaydedilmiştir.

2.2 Arka Alan Modelinin Oluşturulması

Gama ışını analizlerinde genellikle arka alan modellemeleri simülasyonlar yerine gerçek verilerle oluşturulur. Bu analizde, yaygın noktasal olmayan gama ışımalarını temsil eden arka alan modeli olarak en güncel Samanyolu YAO ışına şablonu (gll_iem_v07.fits) ve Samanyolu-dışı izotropik ışına şablonu (iso_P8R3_SOURCE_V2_v1.txt) kullanıldı. Bu noktasal olmayan arka alan bileşenlerinin yanı sıra, 4FGL noktasal kaynaklar kataloğunun bir parçası sayılan "geniş kaynakların" şablonlarının bulunduğu arşiv (LAT_extended_sources_8years.tgz) Fermi-LAT internet sitesinden indirildi. Ayrıca, Fermi-LAT 4FGL noktasal kaynak

kataloğunda bulunan noktasal kaynaklar (gll_psc_v22.fit) da genel arka alan ışına modeline eklendi. Son olarak, Fermi-LAT 4FGL noktasal kaynak kataloğunda yer alan tüm noktasal ve geniş gama ışını kaynaklarının isimlerini, konum ve konum hatası bilgilerini ve başka kataloğlarda bulunan ilişkili kaynakların isim, genişlik ve konumlarını içeren SAOImageDS9 dosyalarını (gll_psc_v21.reg, gll_psc_v21_ell.reg, gll_psc_v22_assoc.reg) Fermi-LAT internet sitesinden indirildi.

4FGL J1828.0-1133'ün analiz bölgesi için oluşturulmuş olan arka alan modeli kullanılarak gtlike komutu çalıştırılıp, önden belirlenmiş her gökyüzü koordinat aralığı ve enerji aralığı için aralıklı maksimum olasılık (binned maximum likelihood) analizi (Mattox ve diğ. 1996) yapıldı. Bu analiz sırasında, analiz bölgesinin merkezinden 3°uzaklıktaki tüm 4FGL noktasal ve geniş kaynakların normalizasyon parametreleri serbest bırakıldı. Ayrıca, TS değeri 400'den büyük olan tüm 4FGL kaynaklarının normalizasyon parametreleri serbest bırakıldı ve Test İstatistik¹ (TS) değeri 400'den küçük olan 4FGL kaynaklarının parametreleri sabit bırakıldı.

2.3 Gökyüzü Haritaları ve Enerji Tayfı Çıkarılması

1-300 GeV enerji aralığında yapılan aralıklı maksimum olasılık (binned maximum likelihood) analizini takiben, 4FGL J1828.0-1133'ün en iyi konumunu tespit edebilmek için localize komutu kullanıldı. Çıkarılan en iyi konum koordinatları kullanılarak aralıklı maksimum olasılık analizi tekrar edilip, oluşturuldu. Oluşturulan bu haritaların boyutları, 10°×10°olup, gökyüzü koordinat aralığı her koordinat eksenini için 0°.05 olarak seçilmiştir.

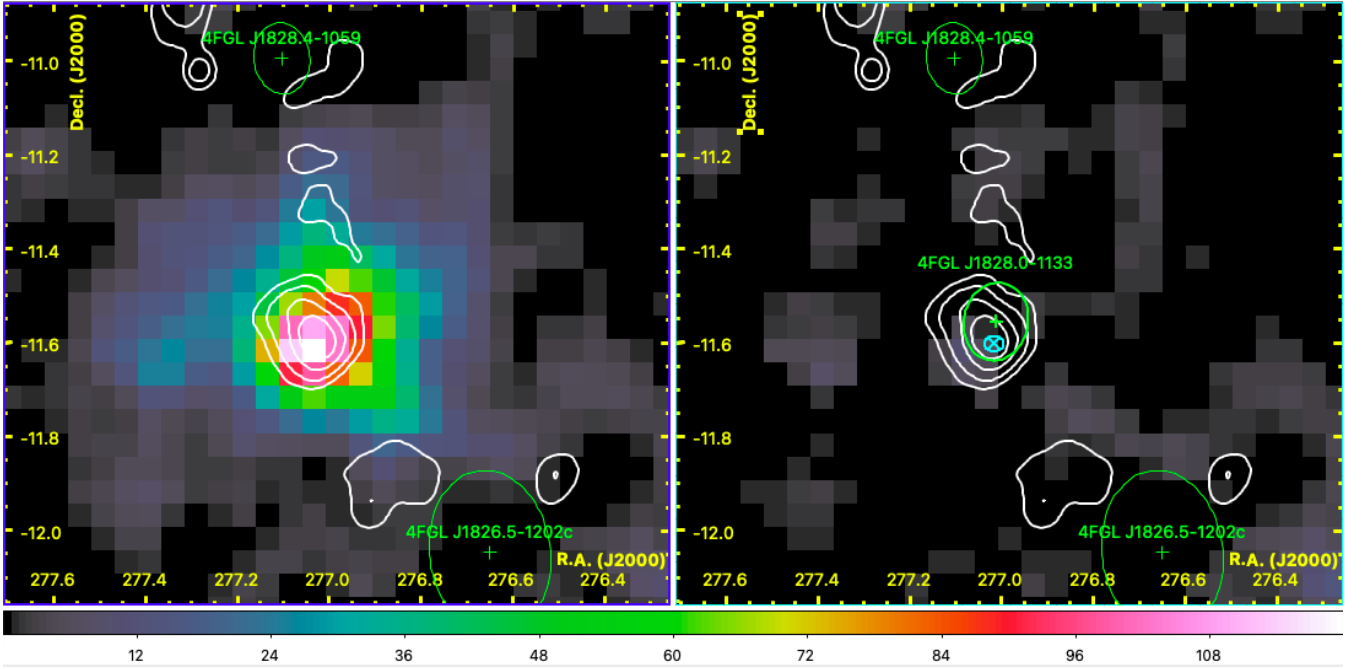
4FGL J1828.0-1133'ün uzamsal olarak geniş bir yapıya sahip bir gama kaynağı olup olmadığını test edebilmek, ve geniş bir kaynak olması durumunda uzamsal genişliğinin ne kadar olduğunu ölçebilmek için extension komutu çalıştırıldı. İki adet uzamsal 2-boyutlu model veri setimiz üzerinde denenmiştir: RadialGaussian ve RadialDisk. extension komutu çalıştırıldığında, test edilen uzamsal modelin veriye uyup uymadığı, istatistiksel metotlar yardımı ile hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalardan elde edilen TS_{ext} parametresinin 25 ve 25'ten büyük bir değer çıkması durumunda, test edilen gama kaynağının noktasal bir kaynak olmadığını, tam tersine genişliği olan bir gama kaynağı olduğunu göstermektedir. Bu parametrenin değerinin yüksek çıkması, test edilen uzamsal modelin gama kaynağının dağılımına uygunluğunu güçlendirir.

4FGL J1828.0-1133'ün en iyi konumu bulunurken ve genişlik testleri esnasında, enerji tayf modeli olarak 4FGL kataloğunda bu kaynak için verilmiş olan LogParabola tayf modeli kullanılmıştır. Modelin fonksiyonel formu aşağıdaki gibidir:

$$\frac{dN}{dE} = N_0 \frac{E}{E_b} - \left[\alpha + \beta \log \left(\frac{E}{E_b} \right) \right] \quad (1)$$

LogParabola fonksiyonu gama ışını akısını cm⁻² s⁻¹ MeV⁻¹ birimi cinsinden bulmamızı sağlar. E_b ölçek parametresi, N₀ normalizasyon parametresi, α ve β ise tayfsal modelin indeksleridir. 4FGL J1828.0-1133'ün genişliğinin modellenmesi

¹ TS: İncelenen noktada bir kaynak olma olasılığının, olmama olasılığına oranıdır. TS değerinin kare kökü, sinyal arka alan oranını (σ) vermektedir.



Şekil 1. (Sol Panel) 4FGL J1828.0-1133'ün, gama ışını arka alan modelinden çıkartıldıktan sonra oluşturulan gökyüzü TS haritasıdır. (Sağ Panel) 4FGL J1828.0-1133'ün, bir noktasal kaynak olarak gama ışını arka alan modeline geri eklenmesi sonrası oluşturulan gökyüzü TS haritasıdır. Her iki panelde görünen beyaz düz çizgiler, G20.1-0.2'nin GLEAM radyo kontürlerinin, 1.7, 2.0, 2.5 ve 3 Jy beam⁻¹ seviyelerine karşılık gelmektedir. Ayrıca yeşil renkli artı işaretler ve elipsler, 4FGL noktasal kaynaklar kataloğundaki kaynakların konumlarını ve konum hatalarını temsil etmektedir. Turkuaz renkli çarpı işareti ve elips ise 4FGL J1828.0-1133'ün hesapladığımız en iyi konum koordinatlarını ve bu konumun hatasını göstermektedir.

esasında, N_0 , α ve β parametreleri ve genişlik ile ilgili parametre serbest bırakıldı.

4FGL J1828.0-1133'ün tayf sonuçlarının oluşturulabilmesi için, aralıklı maksimum olasılık (binned maximum likelihood) analizi 200 MeV ve 300 GeV enerji aralığında tekrar edilmiş ancak bu enerji aralığında, zaten 1-300 GeV enerji aralığında tespit ettiğimiz en iyi konum değerleri kullanılmış ve genişlik testleri yapılmamıştır. Bunun sebebi, en iyi konu ve genişlik gibi bilgilerin, *Fermi*-LAT'ın açılal çözünürlüğünün en iyi olduğu enerji aralığı olan 1-300 GeV'de hesaplanmasının istatistiksel olarak daha küçük hatalarla tespit edilebilmesidir. Enerji tayfının 200 MeV'den başlatılma sebebi ise, düşük enerjilerdeki gama ışını akı noktalarının istatistiksel hata bantlarının, yüksek enerjilerdeki akı noktalarının hata bantlarına göre daha küçük olmasıdır. Bu da bir tayf modelinin veriye uygunluk testlerinden çıkan sonuçların güvenilirliğini arttırmaktadır.

3 Sonuçlar ve Yorum

Konumu G20.1-0.2 ile örtüşen 4FGL J1828.0-1133 noktasal kaynağının verilerini, enerji tayf modelini *LogParabola* olarak kabul ederek 1-300 GeV enerji aralığında analiz ettiğimizde, bu kaynağın en iyi konum değeri (S.A., D.A.) = (277°.0144 ± 0°.0201, -11°.6055 ± 0°.0163) olarak bulundu ve bu konumda hesaplanan sinyal arka alan oranı $\sim 15\sigma$ düzeylerinde tespit edildi.

Şekil 1'de, 4FGL J1828.0-1133'ün konumunun merkez alındığı analiz bölgesinin gökyüzü TS haritaları gösterilmektedir. Şekil 1'in sol panelinde gösterilen TS haritası, 4FGL J1828.0-1133'ün gama ışına arka alan modelinden çıkartıldıktan sonra oluşturuldu. Bu gökyüzü haritası bize

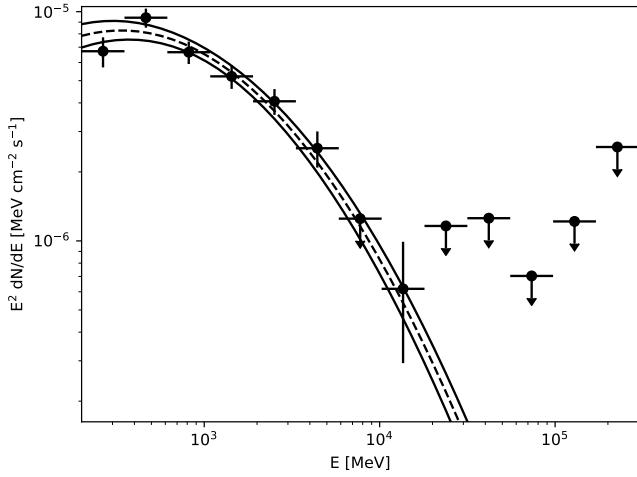
bu gama ışını kaynağının uzamsal yapısını açıkça görmemize olanak sağlamaktadır. Analizde bu noktadan sonra 4FGL J1828.0-1133'ün en iyi konumu belirlenerek genişlik testleri yapıldı.

Yaptığımız genişlik testlerinde iki geniş kaynak modeli (*RadialDisk* ve *RadialGaussian*) test edildi. Bu testler sonucunda bulduğumuz TS_{ext} değeri, *RadialDisk* modeli için ~ 11 ve *RadialGaussian* modeli için ~ 15 'tir. Her iki TS_{ext} değeri de 4FGL J1828.0-1133'ün genişliği olan bir gama ışını kaynağı olmadığını göstermektedir.

Şekil 1'in sağ panelinde gösterilen TS haritası, 4FGL J1828.0-1133'ün en iyi konumu belirlendikten sonra, bu yeni konum değerleri kullanılarak 4FGL J1828.0-1133'ün bir noktasal kaynak olarak gama ışını arka alan modeline geri eklenmesi sonucu oluşturuldu.

Bulduğumuz en iyi konum değeri, 4FGL J1828.0-1133'ün 4FGL noktasal kaynaklar kataloğunda yayınlanmış olan konumundan sadece 0°.045 uzaklıktadır. Şekil 1'in sağ panelinde de görüldüğü gibi, yeşil artı işareti ile temsil edilen 4FGL kataloğu konumu ve turkuaz renkli çarpı işareti ile temsil edilen yeni konumunun yeşil ve turkuaz renkli hata elipsleri birbiri ile kesilmektedir.

Şekil 1'in her iki paneldeki gökyüzü haritası üzerinde gösterilen beyaz kontürler ise GLEAM tarafından gözlemlenen G20.1-0.2'nin radyo verilerini temsil eder. Buna göre, 4FGL J1828.0-1133'ün bu çalışmada bulunan en iyi yeni konumu, en yüksek radyo kontür seviyesinin içinde kalmaktadır. Ancak *Fermi*-LAT'ın açılal çözünürlüğünün yetersizliği sebebiyle, G20.1-0.2'nin radyo dalgaboylarında gözlemlenen yarı-kabuk yapısı, gama ışınları gözlemlerinde görüntülenememiş ve 4FGL



Şekil 2. 4FGL J1828.0-1133'ün 0.2-300 GeV enerji aralığında *LogParabola* fonksiyonuna uygunluğunu tespit ettiğimiz enerji tayfı, siyah kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Kesikli çizginin iki tarafındaki siyah düz çizgiler ise bu tayf modelin hata aralığını göstermektedir. 4FGL J1828.0-1133'ün hesaplanmış olan akı noktaları ve bu akıların istatistiksel hataları da gösterilmiştir. Oklarla belirtilen akı noktaları, bu akı değerlerine karşılık gelen enerji aralığında hesaplanmış olan akı üst sınırlarını belirtmektedir.

J1828.0-1133'ün gama ışınlarında noktasal bir kaynak olarak tespit edilmesi sonucunu doğurmuştur.

Şekil 2, 4FGL J1828.0-1133'ün enerji tayfını göstermektedir. 4FGL J1828.0-1133'ün bu çalışmada bulduğumuz en iyi konum koordinatları kullanılarak ve bu noktasal kaynağın enerji tayf modelinin *LogParabola* modeline uyduğu varsayıldığında, 0.2-300 GeV enerji aralığında bulunan enerji akısı değeri $\text{MeV cm}^{-2} \text{s}^{-2}$ cinsinden $(2.08 \pm 0.12) \times 10^{-5}$ olarak ve toplam foton akı değeri ise $\text{foton cm}^{-2} \text{s}^{-2}$ cinsinden, $(3.73 \pm 0.26) \times 10^{-8}$ olarak bulunmuştur. Bulduğumuz bu sonuçların, 4FGL J1828.0-1133'ün 4FGL nokta kaynaklar kataloğunda raporlanan analiz sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.

G20.1-0.2'nin radyo dalgaboylarında kabuksu bir SNK olarak görüntülenmesine rağmen, *Fermi-LAT*'ın açılabilir çözünürlüğünün düşük olması dolayısıyla gama ışınlarında noktasal bir kaynak olarak tespit edilmesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla, bu SNK'nın genişlik ölçümlerinin tekrarlanıp, bu kalıntının gama ışınlarında gerçekten de noktasal bir yapıda olup olmadığının anlaşılabilmesi için daha fazla veriye ihtiyaç vardır.

Bu çalışmamızda 4FGL J1828.0-1133 için elde ettiğimiz en iyi konum koordinatlarının, G20.1-0.2'nin GLEAM tarafından ölçülen en yüksek seviyedeki radyo ışınması konumu ile çakışması, gama ışınmasının "leptonik" kaynaklı olabileceğine işaret etmektedir. Leptonik kaynaklı gama ışınması, SNK şok dalgalarında elektronların ivmelendirilmesi ve bu elektronların YAO'daki düşük enerjili fotonlarla çarpışarak ters-Compton etkileşimi sonucu oluşmaktadır. Aynı ivmelendirilmiş elektronlar, ayrıca senkrotron ışınması oluştururlar, ki bu ışınma da radyo ve X-ışını dalga boylarında gözlemlenebilmektedir. 4FGL J1828.0-1133'ten ya da G20.1-0.2'den "leptonik" gama ışınması geldiğini kesin olarak gösterebilmemiz için enerji tayfını radyatif modellerin de hesaba katılması gerekmektedir. Dolayısıyla, çalışmamızın devamında, G20.1-0.2'nin enerji tayfı

verilerine en uygun olabilecek radyatif modelleri test etmek istiyoruz.

Teşekkür

Fermi-LAT verilerinin herkes için erişilebilir olmasını sağladıkları için *Fermi* proje çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız. GLEAM radyo veri dosyalarını bizimle paylaştığı için Dr. N.H. Walker'a da teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Abdollahi, S. et al., 2022, Incremental Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog, *ApJS* 260 53
- Araya, M. et al., 2023, Fermi-LAT detection of G118.4 + 37.0: a supernova remnant in the Galactic halo seen around the Calvera pulsar, *MNRAS*, 518, 4132
- Green, D. A., 2019, A catalogue of 294 Galactic supernova remnants, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 40, 36
- Hurley-Walker, N. et al., 2019, Candidate radio supernova remnants observed by the GLEAM survey over $345^\circ < l < 60^\circ$, $180^\circ < b < 240^\circ$, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.08124>
- Mattox J. R. et al., 1996, The Likelihood Analysis of EGRET Data, *ApJ*, 461, 396
- Ranasinghe, S., Leahy, D. A., Tian, W., New Distances to Four Supernova Remnants, *Open Physics Journal*, 4, 1-13
- Vink, J., *Physics and Evolution of Supernova Remnants*, Springer Cham, ISSN: 0941-7834, 2020.

Access:

M23-0389: [Turkish J.A&A — Vol.4, Issue 3.](#)