





Gama-ışın Patlamalarının Ardıl Işınımlarının Fiziksel Parametrelerinin Belirlenmesi

Muhammed Diyaddin İlhan¹  , Tolga Güver² , Massimiliano de Pasquale³ 

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

² İstanbul Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İstanbul 34119, Türkiye

³ Messina Üniversitesi, MIFT Fakültesi, Fizik Bölümü, Messina 98166, İtalya

Accepted: January 9, 2023. Revised: January 6, 2023. Received: November 6, 2022.

Özet

Gama-ışın patlamaları (GIP) evrendeki en enerjik olaylardır. Bu patlamalar, ana ışınım ve ardıl ışınım olarak iki bileşen halinde gözlenirler. Ardıl ışınım fiziksel parametreleri kullanılarak *afterglowpy* yazılımı aracılığıyla sentetik ışık eğrileri üretilebilir. Bu çalışmada, farklı jet modelleri kullanarak (silindir şapka jet modeli (top hat jet model), Gauss jet modeli (Gaussian jet model) ve güç kanunu jet modeli (power law jet model)) *afterglowpy* ile Swift - XRT ile gözlenmiş X-ışın ardıl ışınımları modellendi. *afterglowpy* jet modellerini veriyeye doğrudan uygulanabilen ve ekibimizce geliştirilen Ciao-Sherpa versiyonu kullanılarak ardıl ışınım fiziksel parametreleri belirlendi. Bu çalışmada, örnek olarak bir uzun GIP ve bir kısa GIP ardıl ışınım fiziksel parametreleri elde edildi. Ardıl ışınım fiziksel parametreleri, kinetik enerji (E_K), jet yarı açıklık açısı (θ_j) ve çevresel yoğunluk (n) değerleri literatürle uyumlu şekilde bulundu.

Abstract

Gamma-ray bursts (GRBs) are the most energetic events in the Universe. These bursts are observed as two components, prompt emission and afterglow emission. By using afterglow physical parameters synthetic light curves can be produced via *afterglowpy* software. In this study, Swift - XRT X-ray afterglows were modeled with *afterglowpy* by using different jet models (top hat jet model, Gauss jet model and power law jet model). Afterglow emission physical parameters were determined by using the Ciao-Sherpa version of the *afterglowpy* jet models developed by our team, which can be applied directly to the data. In this study, one long GRB and one short GRB afterglow emission physical parameters were obtained as an example. Afterglow physical parameters kinetic energy (E_K), jet half-opening angle (θ_j) and circumburst (n) density values were found consistently with the literature.

Anahtar Kelimeler: Gamma ray bursts: general – ISM: jets and outflows – X-rays: general

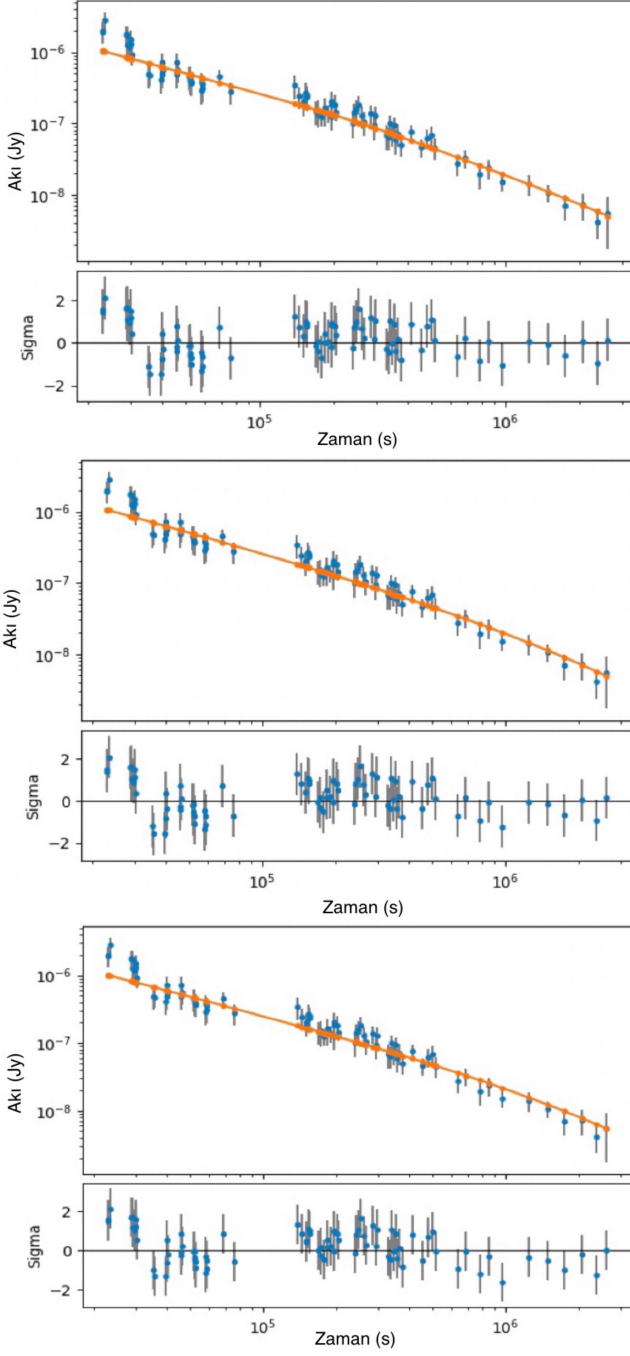
1 Giriş

Gama-ışın patlamaları termal olmayan spektruma ve gökkyüzünde izotropik dağılıma sahip Evrende gözlenen en enerjik olaylardır (van Eerten ve diğ. 2012). Patlamanın izotropik enerjisi 10^{48} – 10^{55} erg arasında değişkenlik gösterir (Kumar & Zhang 2015). Bu patlamalar, patlamanın süresine göre uzun GIP'lar ($T_{90} > 2s$) ve kısa GIP'lar ($T_{90} < 2s$) olarak iki ana sınıfa ayrılır (Dainotti & Vecchio 2017). Uzun GIP'lar büyük kütleli yıldızların çekirdek çökme süper novaları (SN) ile ilişkilendirilirken, kısa GIP'lar ise kompakt yıldız birleşmeleri (ör. Nötron yıldız çifti) ile ilişkilendirilir (Iyyani & Sharma 2021). Hem çekirdek çökmesi modelini hem de kaynaşma modelini şiddetli bir patlama ile karadelik ya da hızlı dönen ve güçlü manyetik alana sahip bir Nötron yıldızı takip eder. Etrafındaki yığılma diski de jet oluşmasına sebebiyet verir. Oluşan jet ultra rölativistik hızlara sahip olup oldukça sıcak ve yoğun ortamdan merkezden dışarı çıkarken var olan gama-ışınlarını güçlendirdiği düşünülür (Bhattacharya ve diğ. 2022). Üretilen jetin aynı yapıya sahip olmadığı farklı çalışmalarda gösterilmiştir. Jetin yapısı, üniform ve keskin kenarlara sahip yani katı açılı altında gelen enerjinin eşit olduğunu açıklayan silindirik şapka jet modeli (Geng ve diğ. 2018) ve katı açılı

altından enerjinin açılıya bağlı değişimini açıklayan Gauss, güç kanunu modelleri ile açıklanır (Ryan ve diğ. 2020). Bir diğer model ise iki bileşenli jet modelidir. Merkezi jet (narrow jet) yüksek enerjiye sahip ve onu saran geniş jet (wide jet) merkezi jetten daha az enerjiye sahip olduğu jet modelidir (Racusin ve diğ. 2008). Her modelde ultra rölativistik jet dış çevre ile etkileşir ve ardıl ışınım (afterglow) oluşmasına sebebiyet verir. Ardıl ışınımlar, patlamadan yaklaşık olarak birkaç yüz saniye sonra X-ışınlarında gözlenmeye başlar.

İlk GIP keşfi Vela uydusu tarafından 1960 yılların sonlarında gerçekleşti. Ancak, ilk ardıl ışınım tespiti Beppo-SAX uydusu tarafından yapıldı (Piran 1999). Ardıl ışınımlar keşfedilmeden önce varlıklarına dair teoriler ortaya atıldı, ancak, ilk X-ışın ardıl ışınım tespiti Beppo-SAX uydusunun GRB 970228 kaynağın takip gözlemleri ile 1997'de bulundu (Godet & Mochkovitch 2011). Daha sonra Swift uydusu ile ardıl ışınım gözlemleri yükselişe geçti. Ardıl ışınımlar ana (prompt) ışınımına göre X-ışınlarından radyo bölgelerine kadar ve dakikalardan aylar mertebesinde ışınım yayabilirler (Miceli & Nava 2022). Uzun ve kısa GIP ardıl ışınımlar arasında enerji ve çevresel yoğunluk gibi farklılık gözlenir. Önemli farklılıkların biri de kısa GIP'ların yani Nötron yıldız çifti kaynaşmasının sonucunda uzaya sıcak plazma olarak fırlatılan kilonovadır. Nötron yıldız çifti birleşme sonrasındaki kilonovalar özellikle optik-kırmızıöte bant aralığında günler mertebesinde ardıl ışınımlara ek olarak

* diyaddin.ilhan@gmail.com



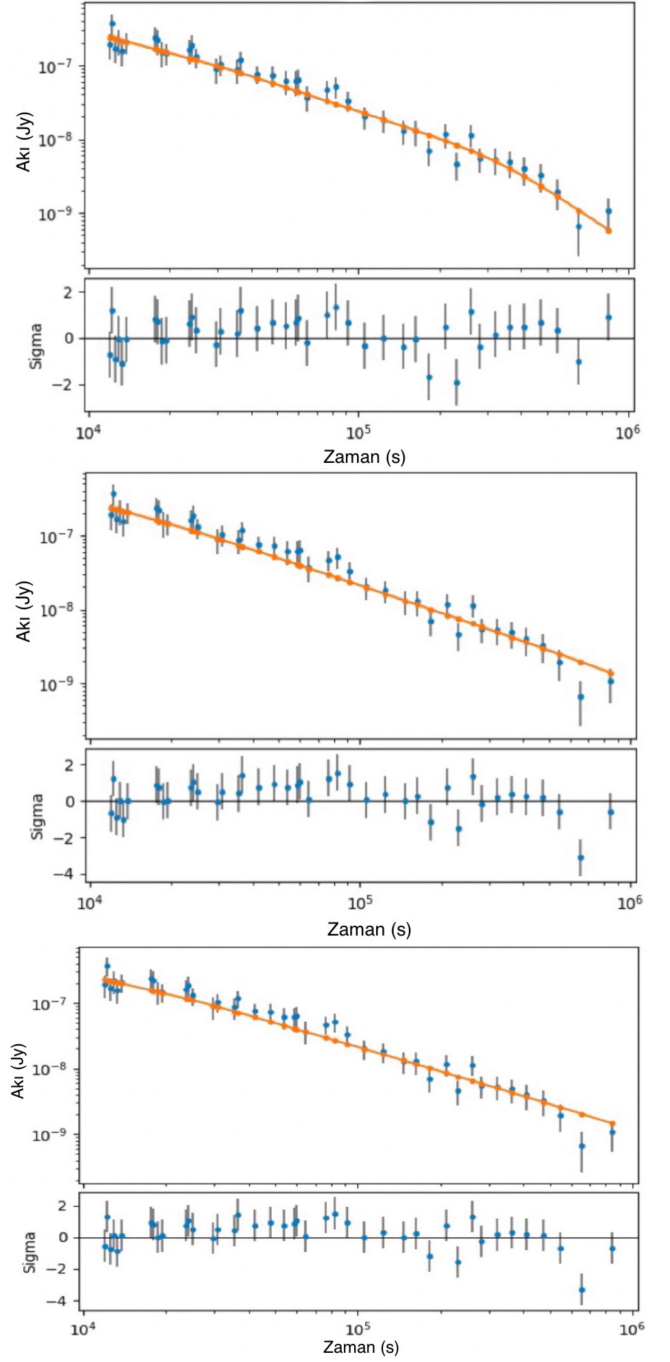
Şekil 3. GRB 121027A kaynağına ait fit sonuçları gösterilmiştir. Üst panel silindirik jet modeline, orta panel Gauss jet modeline ve alt panel ise güç kanunu jet modeline ait sonuçlardır.

kullanıldı. Ancak, bu çalışmada Sherpa içindeki indirgenmiş χ^2 kullanıldı. Kısaca **indirgenmiş χ^2** ,

$$\chi^2 = \sum [y_i - y(x_i)]^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada y_i veri sayısını, $y(x_i)$ fit fonksiyonunu ve σ_i ise her veri noktası için belirsizliği ifade eder.

Gerçek verilere uygulanmadan önce kullanılan yöntemin

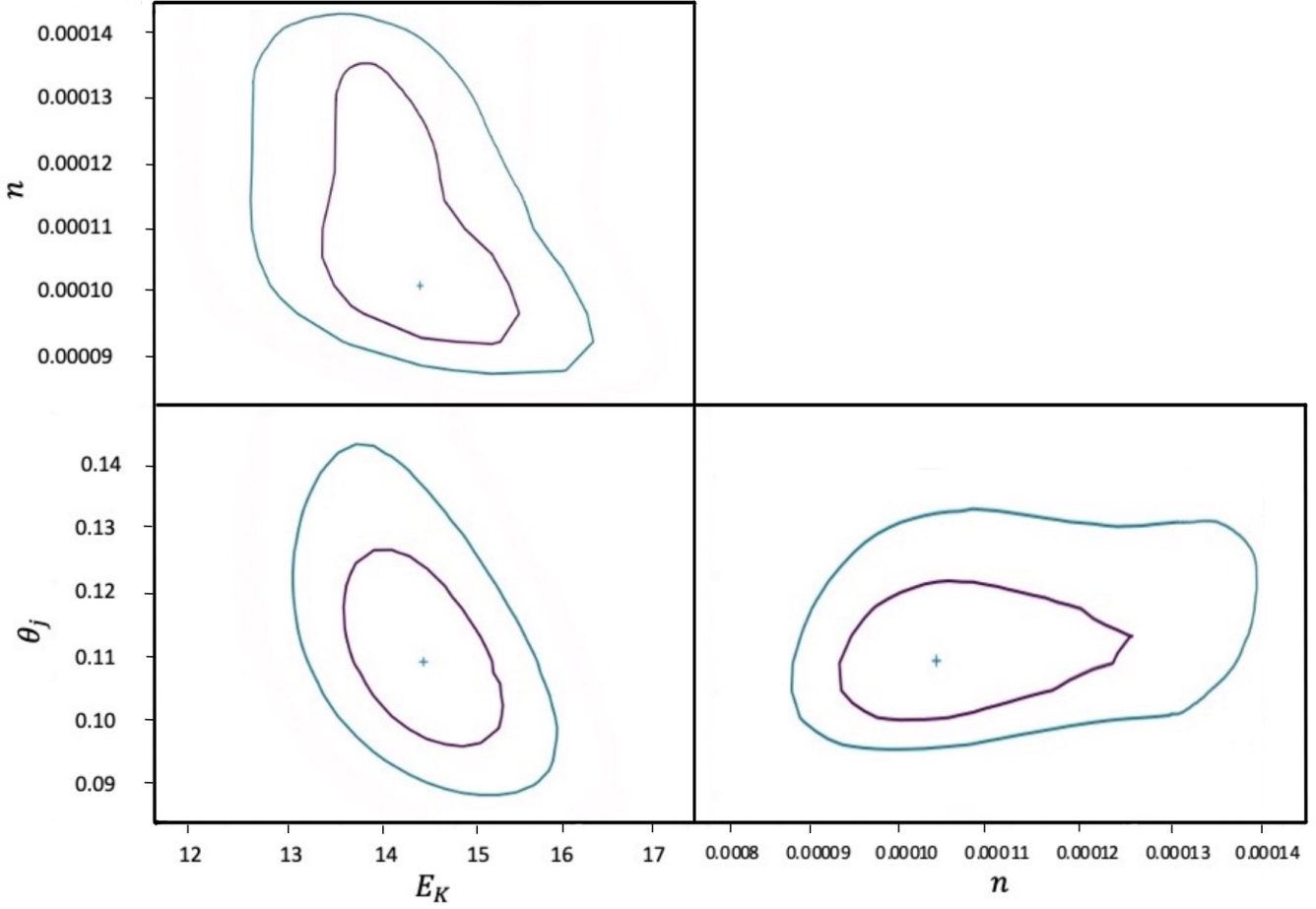


Şekil 4. GRB 051221A kaynağına ait fit sonuçları gösterilmiştir. Üst panel silindirik jet modeline, orta panel Gauss jet modeline ve alt panel ise güç kanunu jet modeline ait sonuçlardır.

iyi sonuçlar verdiğini göstermek amacıyla önce afterglowpy yazılımı ile sentetik ışık eğrileri üretildi ve onların fit sonuçları elde edildi. Daha sonra gerçek verilere uygulanıp ardıl ışınım ışık eğrileri için ayrı ayrı silindirik jet modeli, Gauss jet modeli ve güç kanunu jet modeli fitleri hesaplandı (Şekil 3 ve Şekil 4).

En iyi parametre çıktıklarına ait hataların değişimini görmek amacıyla hata konturları $E_k - \theta_j$, $E_k - n$ ve $\theta_j - n$ şeklinde hesaplandı (silindirik jet modeli örneği Şekil 5'te gösterildi).

Bu çalışmada kullanılan veriler, [Swift-XRT halka açık web](#)



Şekil 5. GRB 51221A kaynağının silindirik jet modeli ile oluşturulan $E_K - \theta_j$, $E_K - n$ ve $\theta_j - n$ 'e karşılık ve 2σ hata konturları gösterilmiştir. Burada artı işareti en iyi χ^2 değerini göstermektedir.

sitesinden alındı. Çalışmada kullanılan X-ışın ışık eğrilerin olası parlamaların önüne geçmek amacıyla 10^4 saniye sonrası verilere sahip ve uzaklığı bilinen kaynaklardan seçildi. Bununla birlikte X-ışınlarının kullanılmasının ayrıca nedenlerinden bir tanesi de olası kilonova katkısından sakınmak oldu.

GIP ardıl ışınım kaynaklarına ait en iyi parametre seti oluşturmadan önce bazı fiziksel ardıl ışınım parametreleri sabit alındı. Kısa ve uzun GIP'lar için ϵ_B , ϵ_e ve p sabit alındı. GRB 051221A kaynağı için $\epsilon_B=0.1$, $\epsilon_e=0.1$, $p=2.24$ parametreleri sabit ve kırmızıya kayması (z) 0.556 alındı (Fong ve diğ. 2015). GRB 121027A kaynağı için $\epsilon_B=3.23 \times 10^{-7}$, $\epsilon_e=0.024$, $p=2.16$ parametreleri sabit ve kırmızıya kayması (z) 1.773 alındı (Zhang ve diğ. 2015). Daha iyi parametre seti oluşturmak için serbest parametre sayısı azaltılarak kullanıcı girdisi olarak belirlendi. Azaltılan bu parametre gözlenme açısı (θ_{obs}) olarak ayarlandı ve gözlenme açısı sıfırdan başlayarak yani; 0, 0.01, 0.02 radyan şeklinde gözlenme parametresi girilerek en iyi χ^2 bulunmaya çalışıldı. Serbest parametreler için seçilen limitler $10^{48} < E_K < 10^{55}$, $0.01 < \theta_j < \pi/2$ ve $10^{-10} < n < 10^{10}$ şeklinde belirlendi (Ryan ve diğ. 2020).

3 Tartışma ve Sonuç

Her bir X-ışın ardıl ışınım ışık eğrisini Sherpa programına veri olarak girilerek ve hazırladığımız model programı kullanılarak

silindirik şapka jet modeli, Gauss jet modeli ve güç kanunu jet modeli ile fit sonuçları elde edilmeye çalışıldı. GRB 121027A uzun GIP kaynağına ait üç farklı jet modeli fit sonuçları Şekil 3'te gösterildi. Şekil 3'te üst panel silindirik şapka jet modeline, orta panel Gauss jet modeline ve alt panel ise güç kanunu jet modeline ait fit sonuçlarını gösterir. Üç farklı jet modeline ait fiziksel parametre hesapları Çizelge 1'de verildi. Silindirik jet modelinde kinetik enerji diğer jet modellerinden daha yüksek enerji sonucuna ulaşıldı. Elde edilen ardıl ışınım fiziksel parametre sonuçları literatürle uyumlu bulundu (Zhang ve diğ. 2015).

GRB 51221A kısa GIP kaynağı ait üç farklı jet modeli fit sonuçları Şekil 4'te gösterildi. Şekil 4'te üst panel silindirik şapka jet modeli, orta panel Gauss jet modeline ve alt panel ise güç kanunu jet modeline ait fit sonuçlarını gösterir. Ardıl ışınım fiziksel parametre fit sonuçları Çizelge 2'de verildi. Kinetik enerji, çevresel yoğunluk gibi parametreler birbirine yakın değerlere sahiptir. Ancak, jet yarı açıklık açısı Gauss jet modeli ve güç kanunu jet modeli birbirine yakın değer bulunurken, silindirik jet modelinde daha dar bir jet yarı açıklık açısı bulundu. Bununlar beraber, silindirik jet modeli gözlenme açısı daha dar bir açıya sahip ve Gauss jet modeli ve güç kanunu jet modeli daha geniş bir bakış açısına sahiptirler. χ^2 değerleri Gauss jet modeli ve güç kanunu jet modeli yakın değerlerde hesaplandı, ancak buna karşılık silindirik jet modelinde ise daha

Çizelge 1. GRB 121027A uzun GIP kaynağına ait ardıl ışınım fit sonuçları verilmiştir

Jet tipi	E_K ($\times 10^{53}$ erg)	n (cm^{-3})	θ_j (rad)	θ_{obs} (rad)	χ^2
Silindirik	$96.6^{+10.6}_{-13.6}$	$482.3^{+358.2}_{-200.4}$	$0.127^{+0.027}_{-0.019}$	0.16	0.74
Gauss	$11.2^{+1.4}_{-1.5}$	$525.2^{+306.2}_{-227.4}$	$0.142^{+0.021}_{-0.011}$	0.18	0.78
Güç kanunu	$10.9^{+1.9}_{-1.5}$	$596.8^{+341.2}_{-255.3}$	$0.098^{+0.039}_{-0.019}$	0.16	0.74

düşük χ^2 değeri bulundu. GRB 51221A kaynağı için bulunan ardıl ışınım fiziksel parametreler literatürle uyumlu olduğu gözlemlendi (Fong ve diğ. 2015).

Bulunan fit sonuçlarına göre silindirik, Gauss ve güç kanunu jet modelleri arasında bir üstünlük gözlenmedi. Her jet tipinde bulunan fit değerlerinde çok büyük farklılıklar bulunmadı. Jet modelleri arasında olası belirgin farklılıkları gözlemek için jetin bakış açısının dışında (off-axis) elde edilen verilerin kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, GRB 121027A kaynağında bulunan en iyi fit sonuç parametreleri farklı jet modellerinde birbirine yakın değerlerde bulunması ancak silindirik jet modelinde kinetik enejinin daha yüksek çıkması jet geometrisinin etkisi olduğu düşünülebilir. Ancak, daha iyi kaniya varmak için farklı dalga boylarında (Optik, Radyo, Kırmızıöte vb.) ve daha fazla GIP ardıl ışınımı fit sonuçları elde edilmelidir.

Kullandığımız bu yöntem ile kısa ve uzun GIP ardıl ışınımlarına ait fiziksel parametreler olan kinetik enerji (E_k), çevresel parçacık sayı yoğunluğu (n), jet yarı açıklık açısı (θ_j), gözlenme açısı (θ_{obs}) gibi parametrelerin yanında mikrofiziksel parametreler olan elektron kesirsel enerji yoğunluğu (ϵ_e) ve manyetik alan kesirsel enerji yoğunluğu da (ϵ_B) bulunabilir. Böylece, patlamanın enerjisi, çevresi ve jet yarı açıklık açısı bulunurken, aynı zamanda jet yapısını da daha iyi anlamamızı sağlayabilir.

Bu çalışmada ekibimizce geliştirilen GIP ardıl ışınım fit yazılımını hem sentetik ışık eğrilerinin fitlerini bulurken hem de gerçek GIP ardıl ışınım verilerinin fitini bulurken oldukça başarılı olduğu literatür ile karşılaştırarak teyit ettik. Gelecek çalışmamızda ardıl ışınım X-ışın ışık eğrilerinin fitlerine devam edip bu fit sonuçlarından elde edin fiziksel parametrelerden her bir kaynak için ardıl ışınım fiziksel parametre setleri oluşturacağız. Bu parametre setlerinden 2m, 4m ve 8m teleskop limitlerinin gözleyebileceği sentetik ışık eğrileri oluşturulup gözlenme stratejileri geliştireceğiz. Özellikle, 4 metrelik Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG) teleskobu için kırmızıöte sentetik ışık eğrileri üretilip, DAG gözlenme stratejileri oluşturacağız.

Teşekkür

Bu çalışma, kısmen T.C. Strateji ve Bütçe Başkanlığı 2016K121370 tarafından ve TÜBİTAK 119F073 projesi tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Bhattacharya M., Carpio J. A., Murase K., Horiuchi S., 2022, High-energy neutrino emission from magnetised jets of rapidly rotating protomagnetars, doi:10.48550/ARXIV.2210.08029, https://arxiv.org/abs/2210.08029
- Bing Z., 2018, The Physics of Gamma-Ray Bursts. Cambridge University Press

Çizelge 2. GRB 05122A kısa GIP kaynağına ait ardıl ışınım fit sonuçları verilmiştir

Jet tipi	E_K ($\times 10^{52}$ erg)	$n(\times 10^{-5})$ (cm^{-3})	θ_j (rad)	θ_{obs} (rad)	χ^2
Silindirik	$1.5^{+0.1}_{-0.1}$	$1.1^{+0.3}_{-0.2}$	$0.106^{+0.011}_{-0.021}$	0.17	0.97
Gauss	$6.2^{+10.4}_{-25.5}$	$2.1^{+0.5}_{-0.3}$	$0.097^{+0.025}_{-0.050}$	0.10	0.88
Güç kanunu	$5.7^{+21.9}_{-11.8}$	$2.1^{+0.6}_{-0.4}$	$0.098^{+0.039}_{-0.019}$	0.10	0.91

- Dainotti M., Vecchio R. D., 2017, *New Astronomy Reviews*, 77, 23
- Fong W., Berger E., Margutti R., Zauderer B. A., 2015, *The Astrophysical Journal*, 815, 102
- Geng J.-J., Dai Z.-G., Huang Y.-F., Wu X.-F., Li L.-B., Li B., Meng Y.-Z., 2018, *The Astrophysical Journal*, 856, L33
- Godet O., Mochkovitch R., 2011, *Comptes Rendus Physique*, 12, 276
- Iyyani S., Sharma V., 2021, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 255, 25
- Kumar P., Zhang B., 2015, *Physics Reports*, 561, 1
- Lamb G. P., Kann D. A., Fernández J. J., Mandel I., Levan A. J., Tanvir N. R., 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 506, 4163
- Leventis K., van der Horst A. J., van Eerten H. J., Wijers R. A. M. J., 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 431, 1026
- Miceli D., Nava L., 2022, *Galaxies*, 10, 66
- Nousek J. A., ve diğ., 2006, *The Astrophysical Journal*, 642, 389
- Pandey S. B., ve diğ., 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 485, 5294
- Piran T., 1999, *Physics Reports*, 314, 575
- Racusin J. L., Karpov S., Sokolowski M., 2008, *Nature*, 455, 183
- Rossi A., ve diğ., 2020, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 493, 3379
- Ryan G., van Eerten H., Piro L., Troja E., 2020, *The Astrophysical Journal*, 896, 166
- Sharma V., Iyyani S., Bhattacharya D., 2021, *The Astrophysical Journal*, 908, L2
- Zhang B.-B., van Eerten H., Burrows D. N., Ryan G. S., Evans P. A., Racusin J. L., Troja E., MacFadyen A., 2015, *The Astrophysical Journal*, 806, 15
- van Eerten H., 2018, *International Journal of Modern Physics D*, 27, 1842002
- van Eerten H., van der Horst A., MacFadyen A., 2012, *The Astrophysical Journal*, 749, 44

Access:

M23-0335: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.