Gama-ışın Patlamalarının Ardıl İşınımlarının 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 Bilimler İ
 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 veriye doğrudan uygulanabilen ve ekibimizce geliştirilen Ciao-Sherpa versiyonu kullanılarak ardıl ışınım fiziksel paremeterleri 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 gözkyüzünde 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 iliskilendirilirken, kısa GIP'lar ise kompakt yıldız birleşmeleri (ör. Nötron yıldız çifti) ile ilişkilendirilir (lyyani & 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 gamaışınlarını güçlendirdiği düşünülür (Bhattacharya ve diğ. 2022). Üretilen jetin aynı yapıya sahip olmadığı farklı çalışmalarda gösterilmiştir. Jetin yapısı, üniform ve keskin kenarlara sahip yani katı açı altında gelen enerjinin eşit olduğunu açılayan silindirik şapka jet modeli (Geng ve diğ. 2018) ve katı açı altından enerjinin açıya bağlı değişimini açıklayana 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 relativistik jet dış çevre ile etkişir 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 ışım tespiti Beppo-SAX uydusu tarafından yapıldı (Piran 1999). Ardıl ışınımlar kesfedilmeden önce varlıklarına dair teoriler ortava atıldı, ancak, ilk X-ışın ardıl ışınım tespiti Beppo-SAX udusunun 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) ışınıma göre X-ışınlarından radyo bölgelerine kadar ve dakilardan aylar mertebesinde ışınm 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 cifti birlesme sonrasındaki kilonovalar özellikle optik-kırmızıöte bant aralığında günler mertebesinde ardıl ışınımlara ek olarak

^{*} diyaddin.ilhan@gmail.com



Şekil 1. Kahverengi çizim silindirik jet tipini, mavi çizim Gauss ve güç kanunu jet tipini gösterir. Burada, jet yarı açıklık açısı (θ_j), merkezi jet (θ_c) ve gözlenme açısı (θ_v) gösterilmiştir (Sharma ve diğ. 2021).

kilonova katkısı sağlayabilirler (Rossi ve diğ. 2020). GIP Ardıl ışınım gözlemleri, kırmızıya kayma, patlama yerinin tespiti ve jetin geometrik yapısı ile ilgili değerli bilgiler verir (Leventis ve diğ. 2013).

2 Yöntem

Ardıl ışınım jetleri teorik ve gözlemsel olarak oldukça hüzmelenmiş yapıya ship oldukları düşünülür. Gözlemsel sonuçlara göre hüzmelenmiş jetin varlığı bir jet kırılması olayı ile teyit edilir (Lamb ve diğ. 2021). Böylece jet kırılmasından sonra ışık eğrilerinde hızlı bir düşüş görülür (van Eerten 2018). Hüzmelenmiş jete ait ışık eğrileri farklı jet modeller ile açıklanabilir. Bu modellerden en çok kullanılan silindirik şapka jet modeli: birim katı açı altında gelen enerjinin sabit olduğu aşağıdaki denklem ile gösterilmiştir.

$$E(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta \leq \theta_j \\ 0, & \theta > \theta_j \end{cases}$$
(1)

Denklemde θ gözlenme açısını ve θ_j jet yarı açılık açısını ifade eder. Gauss jet modeli ise birim katı açı altında enerjinin açıya bağlı değişimi ile ifade edilir:

$$E(\theta) = E_0 e^{\left(\frac{-\theta}{2\theta_j}\right)^2}$$
(2)

Deneklemde θ gözlenme açısını ve θ_j jet yarı açılık açısını ifade eder. Güç kanunu jet modeli ise:

$$E(\theta) = E_0 \left(1 + \frac{\theta^2}{b\theta_j^2} \right)^{-b/2}$$
(3)

denklemi ile ifade edilir. Denklemder E_0 başlangıç enerjisini, θ gözlenme açısını ve θ_j jet yarı açılık açısını ifade eder (Şekil 1). *b* ise θ_j 'i normalize eden ve güç kanunu jet modeli ile Gauss jet modeli arasında karşılaştırılabilir normalizasyon parametresi olarak ifade edilebilir (Ryan ve diğ. 2020).



Şekil 2. X-ışın ardıl ışınım şematiği gösterilmiştir (Kumar & Zhang 2015).

Ardıl ışınımlar, merkezi motordan çok küçük bir hacimde çok büyük bir enerjinin sonucu olarak rölativistik hızlarda bir ateştopu (fireball) modeli ile açıklanır. Dışarı doğru açılan rölativistik hızlardadaki dış şok (forward shock) çevresel madde (circumburst medium) etkileşimi ile zamanla yavaşlar. İvmelenmiş şok içindeki yüklü parçacılar geniş bant (X-ışın, optik, radyo) boyunca sinkrotron ışınımı ile aylar mertebesinde ısısal olmayan ışınım yayarlar (Bing 2018). Swift gözlemleri sonucunda bir X-ışın ardıl ışınım standardı oraya çıktı (Nousek ve diğ. 2006). Şekil 2'de gösterildiği gibi merkezi motorda üretilen şok ilk bir kaç yüz saniyede ana ışınım uzantısı olarak (I), ilk bir kaç bin saniye sonra ana ışınımdan ardıl ışınıma geçiş evresi olarak (II), daha sonra merkezi motorun inaktif duruma geçişi olarak (standart dış şok everesi) (III) ve 10^4 - 10^5 saniyede ise jet kırılma zamanı olarak (IV) açıklanır. Merkezi motorun daha sonra tekrar aktifleşmesi ise bazı kaynaklarda parlama olarak (V) gözlenir (Kumar & Zhang 2015).

afterglowpy, Python dilinde yazılmış iki boyutlu ışık eğrisi üreten bir yazılımdır. Ardıl ışınım fiziksel parametreleri yazılıma direkt kodlanarak sentetik ışık eğrisi üretilir. afterglowpy yazılımı, kullanıcının parametre girdisi sağlayan bir .py uzantılı kod arayüzü bulunur. Bu arayüz içinde farklı jet modelleri barındırdığından birçok parametre bulunur. Bu parametreler: jet tipi (silindir jet tipi, Gauss jet tipi ve güç kanunu jet tipi), toplam izotropik kinetik enerji (E_k) , cevresel parçacık sayı yoğunluğu (n), elektron kesirsel enerji yoğunluğu (ϵ_e) , manyetik alan kesirsel enerji yoğunluğu (ϵ_B), elektron güç kanunu indeksi (p), jet yarı açıklık açısı (θ_i), gözlemci açısı (θ_{obs}) ve uzaklık (L_d) şeklinde sıralanabilir (Pandey ve diğ. 2019). Bununla birlikte, zaman aralığı (Örn: 10^4 - 10^7 saniye arası) ve frekans değeri seçilip sentetik ışık eğrisi üretilir. İstenilen fiziksel parametreler ile yazılıma direkt girdi olarak eklenir ve ışık eğrisi elde edilir.

2.1 Fit modelin gerçek veriye uygulanması

Sherpa, bir modelleme uygulamasıdır. Kullanıcı çeşitli istatistik yöntemlerden faydalanarak basitten karmaşık yapılara kadar fit ve model optimizasyonu yapabilir. Sherpa'nın model fit özelliklerinden dolayı, afterglowpy yazılımını Sherpa içine eklenerek GIP ardıl ışımlara ait fitlerin elde edilmesi sağlandı ve ardıl ışınımlara ait fiziksel parametreleri elde edildi. En iyi parametre setlerinin elde edilmesi amacıyla gerçek (gözlenen) ve model (beklenen) veriler arasındaki ilişkiyi veren χ^2 yöntemi



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

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

$$\chi^{2} = \sum \left[y_{i} - y(x_{i}) \right]^{2} \frac{1}{\sigma_{i}^{2}}$$
(4)

şeklinde ifade edilir. Burada y_i veri sayısını, $y(x_i)$ fit fonksiyonunu ve σ_i ise her veri noktası için belirsiziliği 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 moddeline 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 çıktılarına 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 karşılık1 ve 2 σ 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 ϵ_B =0.1, ϵ_e =0.1, p=2.24 parametreleri sabit ve kırmızıya kayması (z) 0.556 alındı (Fong ve diğ. 2015). GRB 121027A kaynağı için ϵ_B =3.23 × 10⁻⁷, ϵ_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 azaltırak 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 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

 $\ensuremath{\mbox{{\it Fizelge 1.}}}\xspace$ GIP kaynağına ait ardıl ışınım fit sonuçları verilmiştir

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

düşük χ^2 değeri bulundu. GRB 51221A kaynağı için bulunan ardıl ışınım fiziksel parametereler literatürle uyumlu olduğu gözlendi (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 yüsek çıkması jet geometrisinin etkisi olduğu düşünülebilir. Ancak, daha iyi kanıya varmak için farklı dalga boylarında (Optik, Radyo, Kırmızıöte vb.) ve daha fazla GIP ardıl ışınımı fit sonuçları elde edilmelidir.

Kullanıdığımız 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 parameterler olan elektron kesirsel enerji yoğunluğu (ϵ_B) 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 geliştrilen GIP ardıl ışınım fit yazılımını hem sentetik ışık eğrilerinin fitlerini buluken 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 oluşturağız. 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 üretip, DAG gözlenme stratejileri oluşturacağız.

Teşekkür

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

Kaynaklar

- Bhattacharya M., Carpio J. A., Murase K., Horiuchi S., 2022, Highenergy 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	$\mathop{(\times10^{52}\mathrm{erg})}\limits^{E_K}$	$n(imes 10^{-5})\ ({ m cm}^{-3})$	$ heta_j$ (rad)	$ heta_{obs}$ (rad)	χ^2
Silindirik	$1.5^{+0.1}_{-0.1}$	$1.1^{+0.3}_{-0.2}$	$0.106\substack{+0.011\\-0.021}$	0.17	0.97
Gauss	$6.2^{+10.4}_{-25.5}$	$2.1^{+0.5}_{-0.3}$	$0.097\substack{+0.025\\-0.050}$	0.10	0.88
Güç kanunu	$5.7^{+21.9}_{-11.8}$	$2.1^{+0.6}_{-0.4}$	$0.098\substack{+0.039\\-0.019}$	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., Ferná ndez 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 dig., 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.