

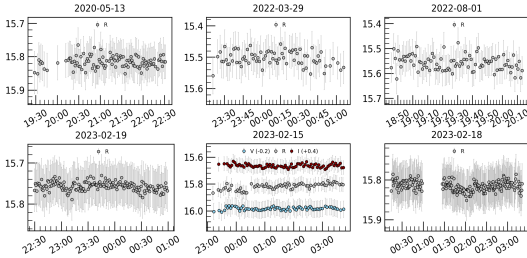
Giriş

Blazarlar, Mpc uzaklıklara kadar uzanan ve gözlemcinin görüş hattına yakın ($<10^\circ$) şekilde hizalanmış relativistik jetlere sahip aktif galaksi çekirdeklerinin (AGÇ) bir sınıfıdır. AGÇ'ler merkezinde $10^6 - 10^{10} M_\odot$ arasında bir süper kütleli kara delik (SKKD) barındırmaktadır. Blazarlar, optik spektrumlarına göre iki alt kategoriye ayrılır: optik spektrumlarında geniş emisyon çizgileri ile karakterize edilen düz spektrum radyo kuasarları (FSRQ'lar) ve zayıf veya hiç emisyon çizgisine sahip olmayan BL Lac nesnelere.

1E 1458.8+2249, $z = 0.235$ kırmızıya kayma değeriyle nispeten parlak bir BL Lac nesnesidir. Massaro ve arkadaşları (2003), 1994-2001 yılları arasında bu blazarın optik gözlemlerini incelemiştir. 1994-1998 yılları arasında blazarın R-parlaklığı 15.5 ile 16.5 kadir arasında değişmiştir. Ocak 2000'de R bandında maksimum 14.75 kadirlik bir parlama gözlemlenmiştir. 8 Şubat 2001'de ise ikinci parlama sırasında $R = 14.62$ kadir ile en parlak hale gelmiştir. Tayfsal enerji dağılımı çalışmaları, 1E 1458.8+2249'un yüksek enerji zirveli bir BL Lac nesnesi (HBL) olduğunu göstermiştir (Fiorucci ve dig., 2004; Fan ve dig., 2023). Neği ve arkadaşları (2022), Zwicky Transient Facility (ZTF) verileriyle 1E 1458.8+2249'un renk değişimlerini incelemiş ve BWB (daha parlak olduğunda daha mavi) davranışı sergilediğini rapor etmiştir.

Gün İçi Değişkenlik Akı Değişimleri

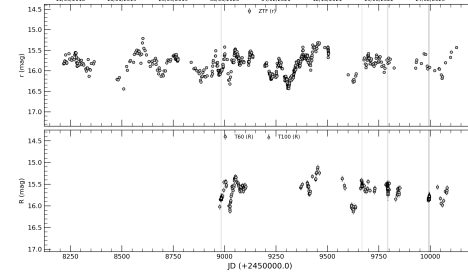
1E 1458.8+2249'un gün içi değişkenliğini araştırmak amacıyla, TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde (TUG) bulunan T100 teleskobuyla gözlemler gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de, kaynağa ait altı günlük gün içi ışık eğrileri gösterilmiştir. Bu ışık eğrilerindeki değişkenlikleri tespit etmek için iki yaygın istatistiksel test uygulanmıştır: güçlendirilmiş F-testi ve iç içe ANOVA (varyans analizi) testi. Elde edilen gün içi ışık eğrilerine bu testler uygulandığında, kaynağın dakikalar mertebesinde anlamlı bir değişim göstermediği ortaya konulmuştur.



Şekil 1: 1E 1458.8+2249 blazarının VRI bantlarındaki gün içi ışık eğrileridir. Yatay ekseninde zaman, dikey ekseninde ise parlaklık temsil edilmektedir.

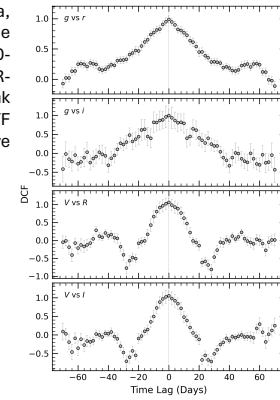
Uzun Dönem Değişkenlik

1E 1458.8+2249'un uzun dönemli davranışını incelemek amacıyla, T100, T60 ve Zwicky Transient Facility (ZTF) teleskoplarından elde edilen gözlemler kullanılmıştır. Şekil 2'de görüldüğü üzere, 2020-2023 yılları arasında yapılan T60 ve T100 gözlemleriyle, ortalama R-bant parlaklığı 15.72 ± 0.05 ve değişkenlik genliği %102 olarak hesaplanmıştır. 2018-2023 yılları arasında yapılan ZTF gözlemlerinde ise, ortalama r-bant parlaklığı 15.83 ± 0.01 ve değişkenlik genliği %122 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2: Kaynağın R ve r bantlarındaki uzun dönemli ışık eğrileridir. Dikine gri çizgiler gün içi gözlemlerine denk gelen günleri temsil etmektedir.

Bantlar Arası Korelasyon



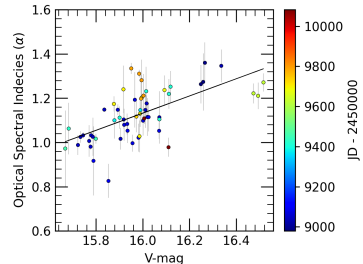
Şekil 3: Takip dönemi boyunca Ayrık Korelasyon Fonksiyonu kullanılarak ZTF g,r,i ve optik V,R,I bantlarındaki ışık eğrilerinin çapraz korelasyon analizidir.

Kaynağın uzun dönemli ışık eğrilerini incelerken, bantlar arasındaki korelasyon ve olası bir zaman gecikmesi araştırılmıştır. Bu amaçla, Ayrık Korelasyon Fonksiyonu (DCF: Discrete Correlation Function) analizi uygulanmış ve her gözlemden elde edilen parlaklıkların ağırlıklı ortalama değerleri ile ortalama Julian Tarihleri (JD) hesaplanmıştır. Şekil 3'te gösterildiği üzere, g, r, i ve optik V, R, I bantlarındaki uzun dönemli ışık eğrilerinin her bir çift kombinasyonu denenmiştir. Işık eğrilerini, iki günlük gruplayarak yapılan analiz sonucunda, tüm çok bantlı çiftler arasında güçlü korelasyonlar tespit edilmiş ve herhangi bir zaman gecikmesi saptanmamıştır.

Tayfsal ve Renk Değişimleri

Tayfsal İndeks-Parlaklık İlişkisi

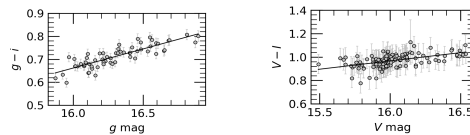
HBL kaynaklar için, sinkrotron emisyon modeli referans alındığında tayfsal indeksin ≤ 0.80 olması beklenmektedir (Urry & Padovani 1995). Kaynağın 62 gece boyunca hesaplanan tayfsal indeksinin ortalaması 1.128 ± 0.063 olarak belirlenmiştir. Tayfsal indeksdeki bu fark, kaynağın optik emisyonunun, galaksinin diğer bileşenlerinden gelen emisyonlarla etkileşimde olduğunu göstermektedir (Meng ve dig 2018). Şekil 4'te görüldüğü gibi, kaynağın hafif "daha parlak olduğundan daha mavi" (BWB: bluer-when-brighter) eğilimi gözlemlenmiştir; ancak zamanla α değerinde belirgin bir trend tespit edilmemiştir. Tayfsal indeks ile V-bandi parlaklığı arasındaki doğrusal regresyon analizi sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 4: Takip dönemi boyunca tayfsal indeksin V-bandi parlaklığı ile olan değişimini, noktaların rengi, gözlem zamanını temsil etmektedir.

Renk-Parlaklık İlişkisi

Kaynağın uzun vadeli renk değişimlerini incelemek amacıyla, V, R, I ve ZTF g, r, i veri setlerini ayrı ayrı analiz edilmiş ve aynı geceye ait verilerin renk indeksleri hesaplanmıştır. Şekil 5'te, V - I renklerini V-bandi parlaklığına, g - i renklerini ise g-bandi parlaklığına karşı değişimi gösterilmiştir. Renk-Parlaklık ilişkilerine yönelik doğrusal regresyon sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur. Sonuçları değerlendirdiğimizde, ZTF g - i rengi ile g bantı parlaklığı arasında güçlü bir korelasyon ($r = 0.84$) ve g - r renk indeksi ile orta dereceli bir korelasyon ($r = 0.66$) tespit edilmiştir. Ancak, diğer renk ilişkileri daha zayıf korelasyonlar ($r \sim 0.5$) göstermektedir.



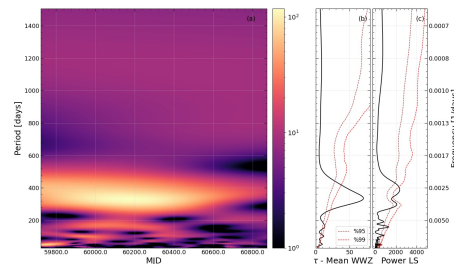
Şekil 5: Kaynağın uzun zaman ölçeğinde renk-parlaklık diyagramı. Siyah çizgiler doğrusal uyumu temsil etmektedir.

Model	slope	intercept	r-value	p-value
V vs α	$+0.333 \pm 0.048$	-4.206 ± 0.768	$+0.535$	$2.134e-10$
g vs $g - r$	$+0.088 \pm 0.006$	-1.002 ± 0.099	$+0.655$	$9.563e-36$
g vs $g - i$	$+0.166 \pm 0.013$	-1.991 ± 0.220	$+0.844$	$3.595e-18$
V vs $V - R$	$+0.081 \pm 0.016$	-0.894 ± 0.261	$+0.403$	$1.785e-06$
V vs $V - I$	$+0.141 \pm 0.020$	-1.294 ± 0.328	$+0.527$	$2.272e-10$

Tablo 1: α renkleri ile uzun zaman ölçeğinde karşılık gelen parlaklıklar arasındaki doğrusal regresyonun sonuçları sunulmuştur.

Değişimlerin Zaman Ölçeği

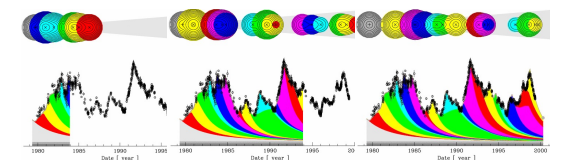
Blazarların optik emisyonlarındaki yarı-periyodik salınımlar (QPO'lar), disk veya jet yapılarındaki sistematik dinamiklerle ilişkilendirilmektedir. Kaynağın birleşik ışık eğrisinde periyodik sinyallerin tespiti için iki yaygın yöntem kullanılmıştır: Lomb-Scargle (LS) periyodogramı ve Weighted Wavelet Z-transformu (WWZ). Şekil 6'da görüldüğü üzere, WWZ analizi, %99 anlamlılık seviyesini aşarak tüm gözlem süresi boyunca belirgin bir şekilde görülen 337^{+133}_{-67} günlük periyodik bir sinyal bulunmuştur. LS periyodogramı ise %95 anlamlılık seviyesini aşan ancak %99 eşiğini geçemeyen, 301 ± 28 gün ve 390 ± 60 gün'de iki tepe sinyal ve 390^{+55}_{-112} günlük sinyal göstermiştir.



Şekil 6: (a) WWZ gücünün zaman ve frekans alanındaki 2D kontur grafiği, (b) ortalama zaman WWZ güç periyodogramı, ve (c) birleşik R bantı ışık eğrisinin LS periyodogramı.

Sonuç

1E 1458.8+2249 gibi HBL blazarların, düşük ve orta enerji zirveli blazarlara kıyasla daha düşük görev döngüsü (DC) oranlarına ve daha küçük değişkenlik genliklerine sahip olması muhtemeldir. Bunun nedeni, HBL'lerdeki manyetik alanların bu durumu engellemesidir. Özellikle, HBL'lerdeki daha yüksek manyetik alanlar ($B > B_c$), küçük ölçekli yapıların gelişimini engelleyerek optik ışık eğrilerinde mikro değişkenlik oluşumunu azaltır (Gopal-Krishna ve dig. 2011). BL Lac çalışmaları bağlamında sıkça atıfta bulunulan jet içinde şok modeli (bkz Şekil 7), bu çalışmada gözlemlenen kısa ve uzun dönem değişkenlikleri (IDV ve LTV) için hafif bir BWB eğilimini açıklayabilir. Eğer jet eksenine göre gözlemcinin görüş hattı arasındaki açı çok küçükse ve jetin Lorentz faktörü yüksekse, jetin presesyon etkisi daha kısa periyodikliklere yönelebilir. Örneğin, gözlemlenen 340 günlük yarı-periyodik salınım (QPO) buna bir örnek teşkil edebilir.



Şekil 7: Jet içinde şok modelini temsil etmektedir. Renkler, toplanan diskinden farklı zaman ve farklı boyutlarda jet üzerine aktarılan maddeyi temsil etmektedir.

İletişim

- murattekkesinoğlu@gmail.com
- aykut.ozdonmez@atauni.edu.tr

Referanslar

- Fan, J., Xiao, H., Yang, W., et al. 2023, ApJS, 268, 23, Fiorucci, M., Ciprini, S., & Tosti, G. 2004, A&A, 419, Massaro, E., Giommi, P., Perri, M., et al. 2003, A&A, 399, 3 Meng, N., Zhang, X., Wu, J., Ma, J., & Zhou, X. 2018, ApJS, 237, Urry, C. M., & Padovani, P. 1995, PASP, 107, 803, Gopal-Krishna, Goyal, A., Joshi, et al. 2011, MNRAS, 416, 10

Teşekkürler

- Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 121F427 numaralı hibe ile desteklenmiştir. TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG) ekibine, proje numaraları T60 ve T100 teleskoplarının kullanımındaki kısmi destekleri için teşekkür ederiz: 19BT60-1505, 22AT60-1907, 19AT100-1486 ve 23AT100-2006.