

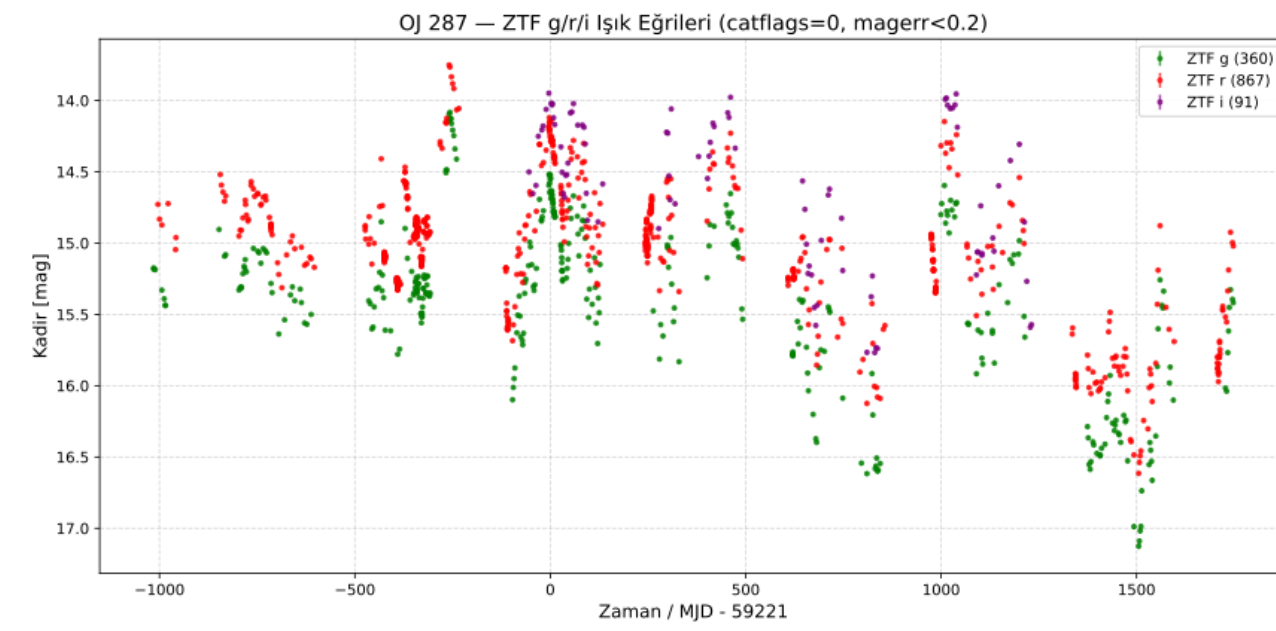
GİRİŞ

Aktif galaktik çekirdekler, süper kütleli kara delikler etrafındaki hızlı dönen maddeden güç alan evrenin en parlak nesneleridir. Blazarlar, AGN'nin bir alt sınıfı olup, bir jetinin Dünya'ya doğru yönelmesi nedeniyle olağanüstü parlaklık ve şiddetli değişkenlik gösterir. Radyo, kızılötesi, görünür, ultraviyole ve gama ışını bantlarında gözlenen bu çok bantlı kaynaklar, özellikle optik bölgedeki hızlı parlaklık dalgalanmaları ile jet fiziği ve enerji salınım mekanizmalarının anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir.

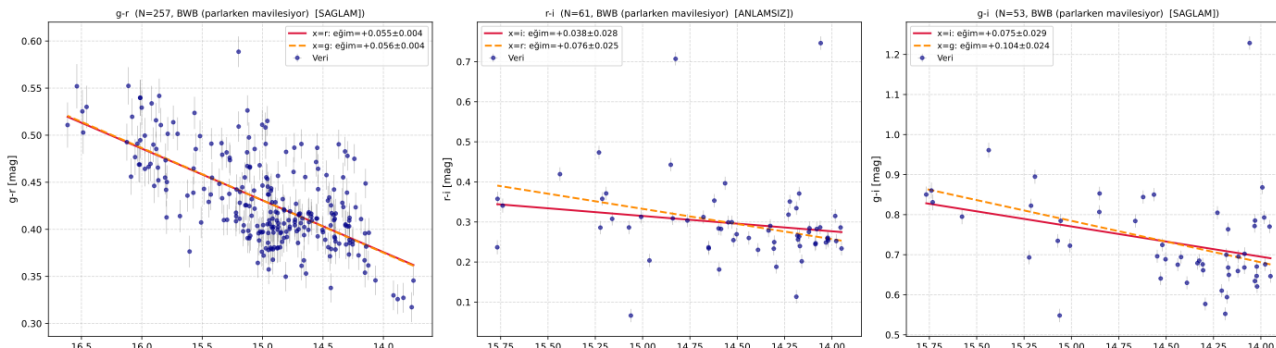
Bu çalışmada, Zwicky Transient Facility (ZTF) arşiv verilerini kullanarak seçili blazarların optik bölgedeki kısa ve uzun dönemli değişkenlik özelliklerini, güç spektral yoğunluk karakteristiklerini ve yarı periyodik osilasyonları (QPO) inceleyerek, bu kaynakların astrofiziksel doğasının daha iyi anlaşılmasını hedefliyoruz.

OJ 287

OJ 287, optik ve radyo bantlarında gösterdiği uzun süreli, quasi-periyodik (yarı-periyodik) patlamalarıyla literatürün en dikkat çekici BL Lacertae nesnelerinden biridir. Yaklaşık 12 yıllık bir döngüyle tekrarlanan bu optik patlamalar, sistemin merkezinde dev bir ikili karadelik mekanizmasının bulunduğu dair en güçlü kanıtları sunmaktadır. Geniş dalga boyu kapsamındaki sürekli gözlemler, bu çift karadelik etkileşiminin yörünge dinamiklerini ve jet yapılarını anlamak adına benzersiz bir laboratuvar işlevi gördüğünü ortaya koymaktadır.



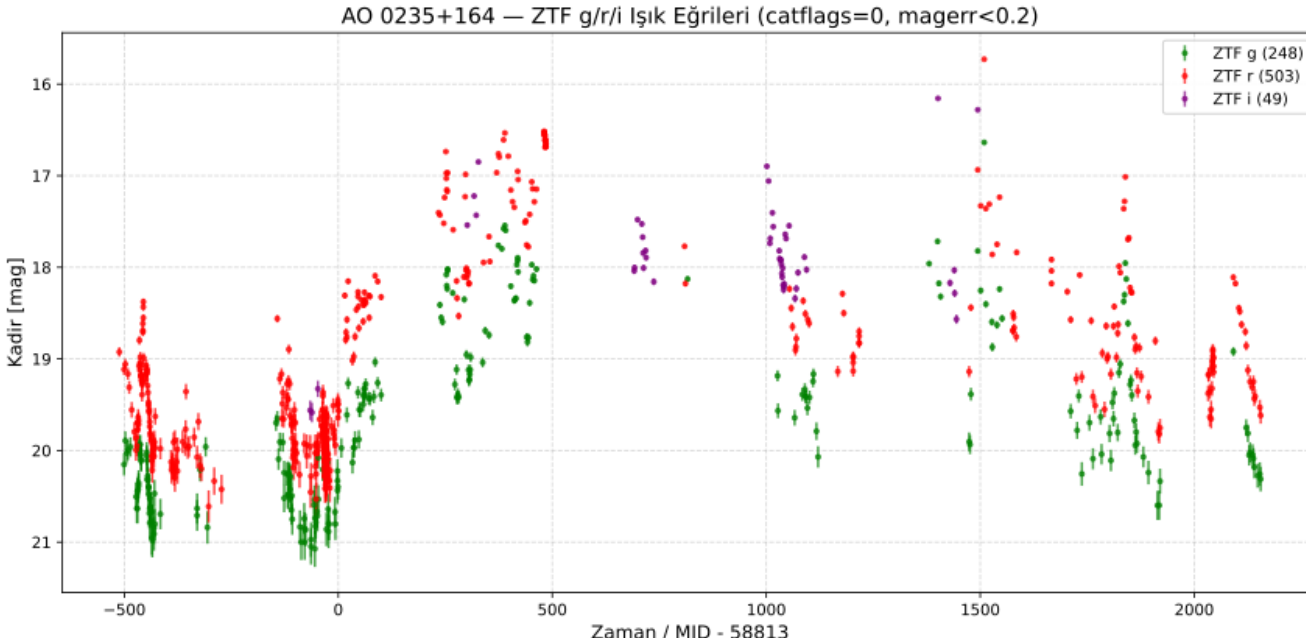
Şekil 1. OJ 287 kaynağına ait ZTF g,r,i ışık Eğrileri



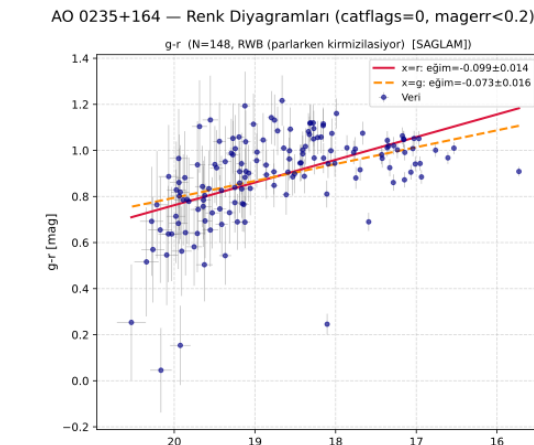
Şekil 2. OJ 287 kaynağına ait Renk-Renk diyagramları

AO 0235+164

AO 0235+164, 40 yılı aşkın fotometrik veri setleriyle desteklenen uzun vadeli gözlemlerde optik bantlarda 6 kadire varan büyük değişimler sergileyen kütleçekimsel mercecek etkili bir blazardır. Kaynağın optik ışık eğrilerinde yaklaşık 8 yıllık quasi-periyodisite (periyodiklik) saptanmış olup, bu durum yine ikili karadelik senaryosuyla açıklanmaktadır. Ayrıca optik ve gama-ışını varyasyonları arasında zaman gecikmesinin gözlenmemesi, yüksek enerjili ışınlamaların jetin aynı bölgesinden kaynaklandığını doğrulamaktadır.



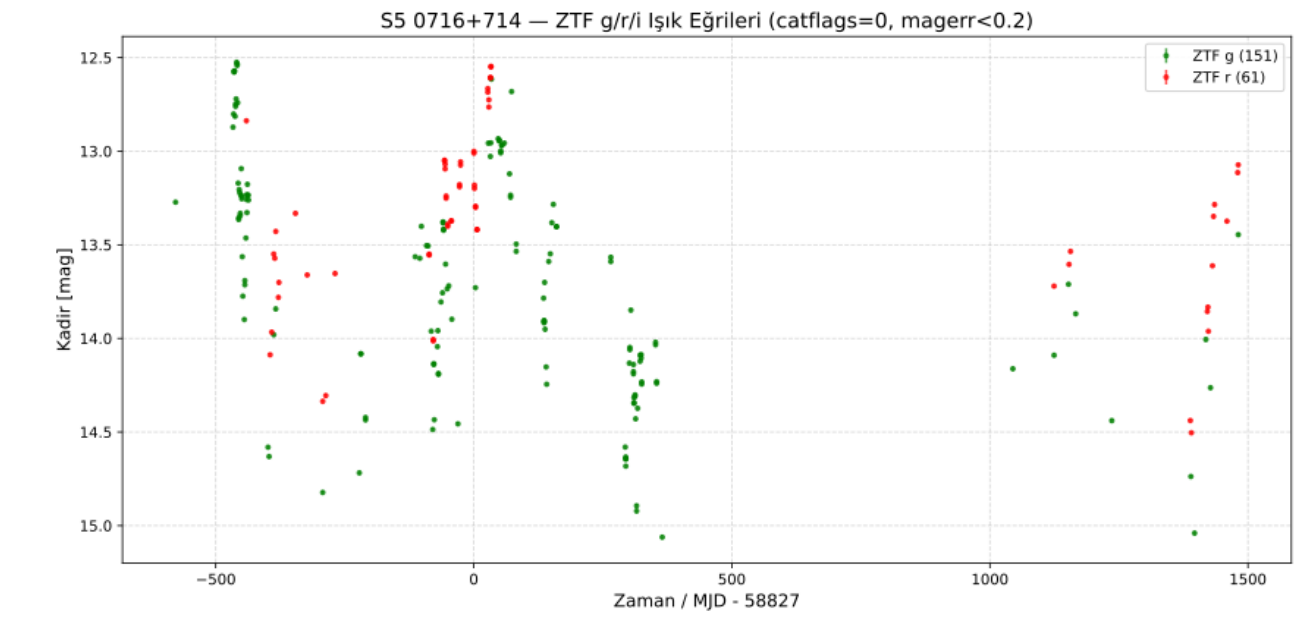
Şekil 4. AO 0235+164 kaynağına ait ZTF g,r,i ışık Eğrileri



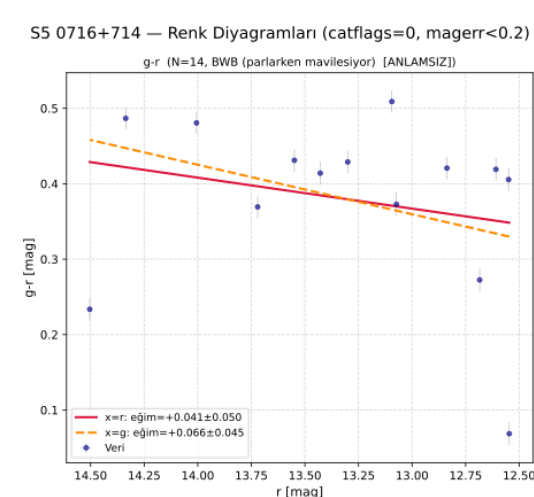
Şekil 5. AO 0235+164 kaynağına ait Renk-Renk diyagramları

S5 0716+714

S5 0716+714, hem optik hem de yüksek enerjili tayf bölgelerinde sergilediği aşırı derecede hızlı ve güçlü ışık eğrisi değişimleriyle (intraday variability) tanınan, son derece aktif bir BL Lac nesnesidir. Uzun soluklu izleme kampanyaları, bu kaynağın optik ve radyo dalga boyları arasında güçlü bir korelasyon barındırdığını ve renk değişimlerinde "parlakken daha mavi" eğilimi sergilediğini göstermektedir. Hızlı zaman ölçekli salınımları, relativistik jet içerisindeki şok dalgası dinamiklerinin ve plazma süreçlerinin detaylı bir şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 7. S5 0716+714 kaynağına ait ZTF g,r,i ışık Eğrileri



Şekil 8. S5 0716+714 kaynağına ait Renk-Renk diyagramları

Tartışma

Üç blazarın da ~7–8 yıllık ZTF ışık eğrileri, 2.5–4 kadir genlikte, periyot taşımayan kırmızı-gürültü karakterli değişkenlik göstermektedir. Renk davranışı örneklemini ikiye ayırır: OJ 287 (ve zayıf istatistikle S5 0716+714) parlarken mavileşirken (BWB), AO 0235+164 parlarken kırmızılaşmaktadır (RWB) — jetteki şok kaynaklı senkrotron sertleşmesiyle, ikincisi sönük evrede baskınlaşan mavi termal bileşenle uyumludur. Eğimlerin anlamlılığı eşzamanlı ölçüm çifti sayısına doğrudan bağlıdır ($N = 257 \rightarrow \approx 14\sigma$; $N = 14 \rightarrow < 1\sigma$). QPO açısından mevcut veri yetersizdir: tepeler ya örnekleme kaynaklıdır (1 gün) ya da gözlem süresine ~5 çevrimden az sığmaktadır (610 gün); ayrıca Monte Carlo eşikleri kalibre değildir. Literatürdeki ~12 ve ~5–8 yıllık çevrimler ZTF taban çizgisiyle sınınamaz. Devam çalışmasında anlamlılık testleri yeniden kurulacak ve ASAS-SN/ATLAS verileriyle uzatılacaktır.

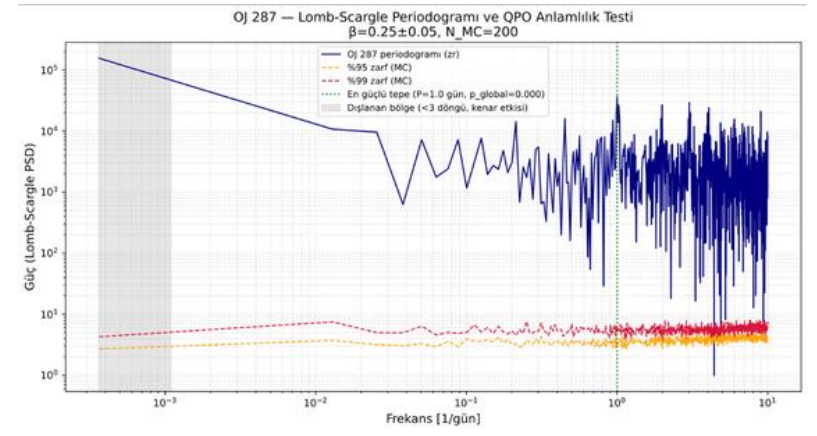
YÖNTEM

Zwicky Transient Facility (ZTF), Palomar Gözlemevi'ndeki 1.2 m Samuel Oschin Schmidt teleskobuna kurulu geniş alanlı bir zaman-domain tarama sistemidir. Bu çalışmada, g, r ve daha sınırlı sayıda i bandında elde edilen, düzensiz örneklenmiş uzun zaman tabanlı fotometrik veriler kullanılmıştır. Verilere kalite filtreleri uygulanarak güvenilir ölçümler seçilmiş, ışık eğrileri oluşturulmuş ve zaman eksenini MJD - t_0 biçiminde düzenlenmiştir.

Fotometrik ve Zaman Serisi Analizi

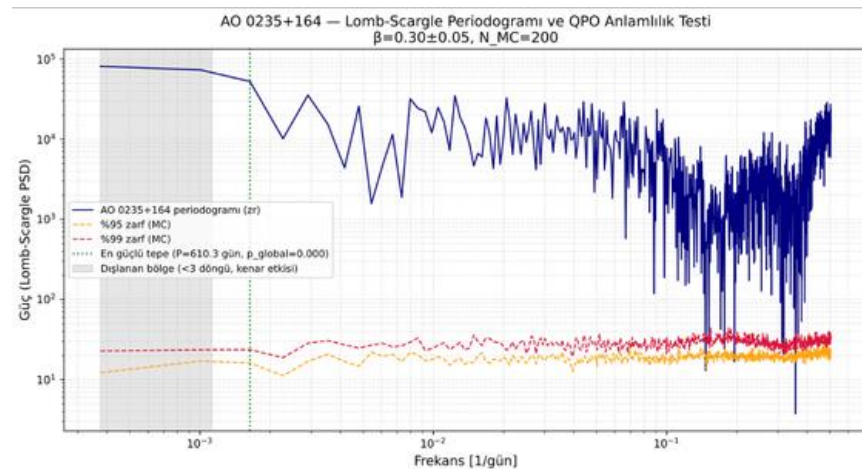
Filtrelenmiş fotometrik veriler zaman sırasına konularak bantlara ayrılmıştır. Eş zamanlı gözlemler kullanılarak g-r, r-i ve g-i renkleri hesaplanmış ve renk-parlaklık ilişkileri doğrusal uyumlarla incelenmiştir. Olası periyodik davranışların belirlenmesi amacıyla Lomb-Scargle periodogramı ve güç tayfı analizi uygulanmış; elde edilen sinyallerin anlamlılığı Monte Carlo benzetimleriyle değerlendirilmiştir. Ayrıca, değişkenliğin zaman içerisindeki frekans davranışını incelemek amacıyla WWZ (Weighted Wavelet Z-transform) yöntemi kullanılmıştır.

OJ 287: 360 g, 867 r ve 91 i ölçümüyle örneklemin en iyi kapsanan kaynağıdır; ~14.0–17.1 kadir aralığında $\Delta g \approx 2.9$ kadirlik değişim ve MJD - 59221 $\approx -250, 0, +1000$ civarında belirgin parlamaları görülür. g-r eğimi $+0.055 \pm 0.004 (\approx 14\sigma)$ ile sağlam bir BWB (parlarken mavileşen) eğilimi verir; g-i $(+0.075 \pm 0.029)$ aynı yöndedir, r-i ise $(+0.038 \pm 0.028)$ i bandındaki seyrek örnekleme ($N = 61$) nedeniyle anlamsızdır. Şekil 3'deki periodogramdaki en güçlü tepe $P = 1.0$ gün olup, veri yetersizliği nedeniyle oldukça gürültüye sahiptir. ~12 yıllık ikili karadelik çevrimi bu veri ile test edilemez.



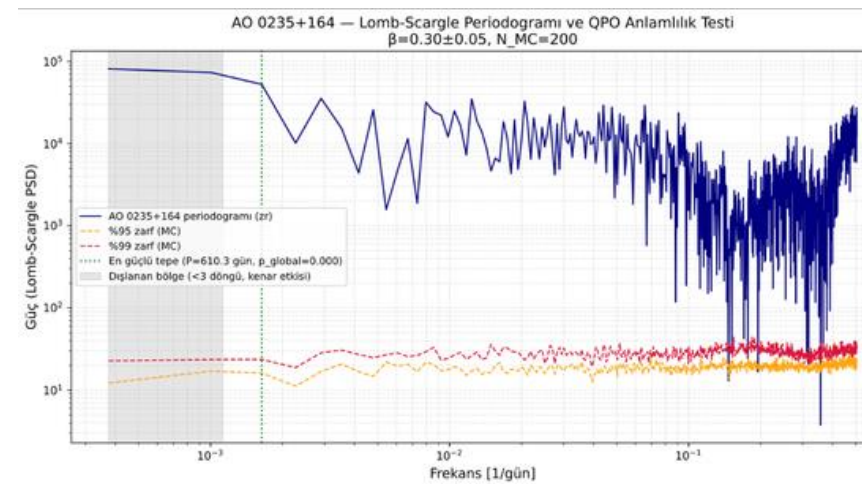
Şekil 3. OJ 287 kaynağına ait Lomb-Scargle Periodogramı ve QPO testi grafiği.

AO 0235+164. Örneklemin en geniş genlikli kaynağıdır: r bandında ~16.3–20.6 kadir arası $\Delta r \approx 4.3$ kadirlik değişim ve iki büyük parlaması vardır. Renk davranışı diğer iki kaynaktan niteliksel olarak farklıdır: g-r eğimi -0.099 ± 0.014 ve -0.073 ± 0.016 , yani sağlam bir RWB (parlarken kırmızılaşan) eğilim. Bu, sönük evrelerde mavi termal disk bileşeninin baskınlaşmasıyla ve/veya $z = 0.524$ 'teki araya giren sistem ile konak galaksinin sabit katkısıyla açıklanabilir (Junkkarinen ve ark. 2004). Şekil 6'da ~610 günlük tepe, gözlem süresine yalnızca ~4–5 çevrim sığdığı ve anlamlılık testi kalibre olmadığı için gerçek bir QPO değil, doğrulanması gereken bir aday olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 6. AO 0235+164 kaynağına ait Lomb-Scargle Periodogramı ve QPO testi grafiği.

S5 0716+714. ~12.5–15.05 kadir arasında $\Delta g \approx 2.5$ kadirlik değişim göstermekle birlikte ZTF kapsamı örneklemin en zayıfıdır: yalnızca 151 g ve 61 r ölçümü, i bandında hiç veri yoktur. Eşzamanlı g-r çifti sayısı yalnızca $N = 14$ 'tür; ölçülen eğimler $(+0.041 \pm 0.050$ ve $+0.066 \pm 0.045)$ literatürdeki BWB eğilimiyle (Ghisellini ve ark. 1997) aynı işarette olsa da 1σ 'nın altında kaldığından istatistiksel olarak yetersizdir. Kaynağın karakteristik değişkenliği (Wagner & Witzel 1995) ZTF'in gecelik kadansıyla çözülmediğinden, bu kaynak için Lomb-Scargle / QPO analizi veri yetersizliği gerekçesiyle anlamlı sonuç vermemiştir.



Şekil 9. S5 0716+714 kaynağına ait Lomb-Scargle Periodogramı ve QPO testi grafiği.

Referanslar

- Bellm, E. C., Kulkarni, S. R., Graham, M. J., et al. 2019, PASP, 131, 018002
Cohen, R. D., Smith, H. E., Junkkarinen, V. T., & Burbidge, E. M. 1987, ApJ, 318, 396
Dey, L., Valtonen, M. J., Gopakumar, A., et al. 2018, ApJ, 866, 11
Emmanoulopoulos, D., McHardy, I. M., & Papadakis, I. E. 2013, MNRAS, 433, 907
Foster, G. 1996, AJ, 112, 1709
Ghisellini, G., Villata, M., Raiteri, C. M., et al. 1997, A&A, 327, 61
Graham, M. J., Kulkarni, S. R., Bellm, E. C., et al. 2019, PASP, 131, 078001
Gu, M. F., Lee, C.-U., Pak, S., Yim, H. S., & Fletcher, A. B. 2006, A&A, 450, 39
Junkkarinen, V. T., Cohen, R. D., Beaver, E. A., et al. 2004, ApJ, 614, 658
Kelly, B. C., Bechtold, J., & Siemiginowska, A. 2009, ApJ, 698, 895
Lomb, N. R. 1976, Ap&SS, 39, 447
Marscher, A. P., & Gear, W. K. 1985, ApJ, 298, 114
Maschi, F. J., Laher, R. R., Rusholme, B., et al. 2019, PASP, 131, 018003
Nilsson, K., Pursimo, T., Sillanpää, A., Takalo, L. O., & Lindfors, E. 2008, A&A, 487, L29
Raiteri, C. M., Villata, M., Aller, H. D., et al. 2001, A&A, 377, 396
Raiteri, C. M., Villata, M., Aller, H. D., et al. 2001, A&A, 377, 396
Sandrinelli, A., Covino, S., Treves, A., et al. 2017, A&A, 600, A132
Scargle, J. D. 1982, ApJ, 263, 835
Schlafly, E. F., & Finkbeiner, D. P. 2011, ApJ, 737, 103
Sillanpää, A., Haara, S., Valtonen, M. J., Sundelius, B., & Byrd, G. G. 1988, ApJ, 325, 628
Timmer, J., & Koenig, M. 1995, A&A, 300, 707
Urry, C. M., & Padovani, P. 1995, PASP, 107, 803
Valtonen, M. J., Lehto, H. J., Nilsson, K., et al. 2008, Nature, 452, 851
VanderPlas, J. T. 2018, ApJS, 236, 16
Vaughan, S. 2005, A&A, 431, 391
Vaughan, S., Uttley, P., Markowitz, A. G., et al. 2016, MNRAS, 461, 3145
Villata, M., & Raiteri, C. M. 1999, A&A, 347, 30
Wagner, S. J., & Witzel, A. 1995, ARA&A, 33, 163