


TESS'in Mirası: Gökada Muhitimizde Geçiş Yapan Ötegezegen Sayımı

Tansu Daylan¹  

¹ Department of Astrophysical Sciences, Princeton University, 4 Ivy Lane, Princeton, NJ 08544

Accepted: December 18, 2022. Revised: November 24, 2022. Received: November 14, 2022.

Özet

Yıldızların önünden geçerken ürettikleri geçiş sinyali, ötegezegenleri keşfedebilmemizi ve nitelendirmemizi sağlayan en önemli gözlemlenebilirlerden biridir. Geçiş Yapan Ötegezegen Tarama Uydusu (TESS) tarafından toplanan hassas ışık ölçüm verisi kullanarak, TESS İlginç Nesne çalışma grubu Kasım 2022 itibarıyla 6.000'i aşkın ötegezegen adayı tespit etmiştir. Bunlar içerisinde barınak yıldızı genç, yörünge mimarisi nadir ve çok-gezegenli birçok sistem bulunmaktadır. Bu çeşitliliğin ötegezegen oluşum ve evrim süreçleri konusundaki algımızı ciddi şekilde güçlendirmesi beklenmektedir. Bilhassa TESS'in keşfettiği birçok küçük ötegezegen JWST ve diğer uzay- ve yer-konuşlu büyük teleskoplar tarafından geçiş tayfı ölçümüne elverişlidir ve Neptün-altı ve karasal ötegezegenlerin atmosfer niteliklerinin ortaya çıkarılmasına büyük bir katkıda bulunmaktadırlar.

Abstract

The photometric signal produced when an exoplanet transits its host star is one of the most fundamental observables that allows us to discover and characterize exoplanets. Using the high-precision photometry from the Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), the TESS Objects of Interest (TOI) working group has identified over 6,000 TOIs as of November 2022. Among these are many systems with young host stars, rare orbital architectures, and multiple planets. It is anticipated that this diversity will significantly strengthen our understanding of processes in planet formation and evolution. In particular, numerous small worlds discovered by TESS are amenable to transmission spectroscopy using JWST and other ground- and space-based large telescopes and play a major role in revealing the atmospheric properties of sub-Neptunes and terrestrial planets.

Anahtar Kelimeler: Planetary systems, (stars:) planetary systems; telescopes, techniques: photometric

1 Giriş

Ötegezegenlerin barınak yıldızlarının önünden geçişleri, keşiflerini ve nitelendirilmelerini mümkün kılan oldukça önemli bir gözlemlenebilir sunmaktadır (Rosenblatt 1971; Black 1980; Tarter ve diğ. 1986). Hassas ışık ölçümleri sayesinde geçiş yaptığı tespit edilen ilk ötegezegen HD 209458 b (Charbonneau ve diğ. 2000; Henry ve diğ. 2000), geçiş yöntemi ile keşfedilen ilk ötegezegen de OGLE-TR-56 b (Udalski ve diğ. 2002; Konacki ve diğ. 2003) olmuştur. Geçiş gözlemlerine dayanan keşifler, keşfedilen ötegezegenlerin yarıçap ve yörünge periyodu gibi fiziksel özelliklerinin dağılımında belirli istatistiksel sapmalara neden olmaktadır (Kipping & Sandford 2016). Buna rağmen bu sapmaların doğru modellenmesi sonucunda, geçiş yöntemini kullanarak ötegezegenlerin oluşum sıklığı (Howard ve diğ. 2010), yörünge mimarisi (Winn & Fabrycky 2015) ve atmosfer özellikleri (Deming ve diğ. 2013; Kreidberg ve diğ. 2014; Daylan ve diğ. 2021b) hakkında bilgi edinebilmek mümkündür.

Gezegemizin oluşumunu ve 4.5 milyar yıllık evrimini anlayabilmemiz için küçük ($R < 4R_{\oplus}$) ötegezegenleri incelememiz gerekir. Geçiş derinliği, gezegen-yıldız yarıçap oranının karesiyle orantılıdır. Örneğin Güneş benzeri bir yıldızın yörüngesindeki Dünya benzeri bir ötegezegenin geçiş derinliği yaklaşık olarak 100 ppm olacaktır. Fakat

gözlemsel açıdan atmosferden kaynaklanan ışık titremesi ışık ölçüm hassasiyetini sınırlamakta, geniş-açılı tarama teleskoplarının elde edebileceği gürültünün ~ 1 ppt seviyesinin altına inmesine izin vermemektedir. Bu nedenle yüksek ($\lesssim 1$ ppt) hassasiyet gerektiren küçük ötegezegenlerin keşfi yer-konuşlu teleskoplar tarafından gerçekleştirilememekte ve uzay-konuşlu teleskoplara ihtiyaç duyulmaktadır (Borucki & Summers 1984). Geçiş yapan küçük ötegezegen arayışı konusunda en büyük atılımlardan biri Kepler Uzay Teleskobu olmuştur (Borucki ve diğ. 2010). Kepler Uzay Teleskobu sayesinde Güneş Sistemi'nde örnekleri bulunmamasına rağmen yarıçapı Dünya ile Neptün'ünki arasında olan ötegezegenlerin galaksimizde bolca bulduklarını (Dressing & Charbonneau 2015) ve yapısal olarak da karasal süper-Dünyalar ve etrafında hidrojen ve helyum zarfı bulunduran mini-Neptünler olarak ikiye ayrıldıklarını öğrendik (Fulton ve diğ. 2017).

Geçiş Yapan Ötegezegen Tarama Uydusu (TESS) (Ricker ve diğ. 2015) 2018 yılı Nisan ayında uzaya gönderilen bir uzay teleskobudur. Ana amacı, barınak yıldızı ötegezegenin kütle ölçümüne elverişli olacak derecede parlak olan, küçük ötegezegenler keşfetmektir. 2018 yılı Temmuz ayında bilim gözlemlerine başlayan TESS geçtiğimiz dört yıl içerisinde önce ana, sonra da ilk uzatma görevini tamamlamıştır ve halihazırda ikinci uzatma görevine devam etmektedir. TESS'in 0.6-1.0 mikron arasındaki dalgaboylarına hassas, geniş açılı dört kamerası sayesinde teleskop toplamda 24 dereceye 96

* tdaylan@princeton.edu

derecelik bir bölgeyi pozlayabilmektedir. Bu da teleskobun yaklaşık bir yılda yarım ekliptik küreyi tarayabilmesini mümkün kılmaktadır. Sadece 116 derece² kaplayan bir alana bakan Kepler Uzay Teleskobu'nun aksine, TESS sadece ana görevi boyunca gökkürenin $\sim 73\%$ 'ünü taramıştır. Yaklaşık olarak tüm gökküreyi tarayabilmesi, TESS'in daha yakın ve parlak bir barınak yıldız topluluğuna hassas hale gelmesini sağlamıştır.

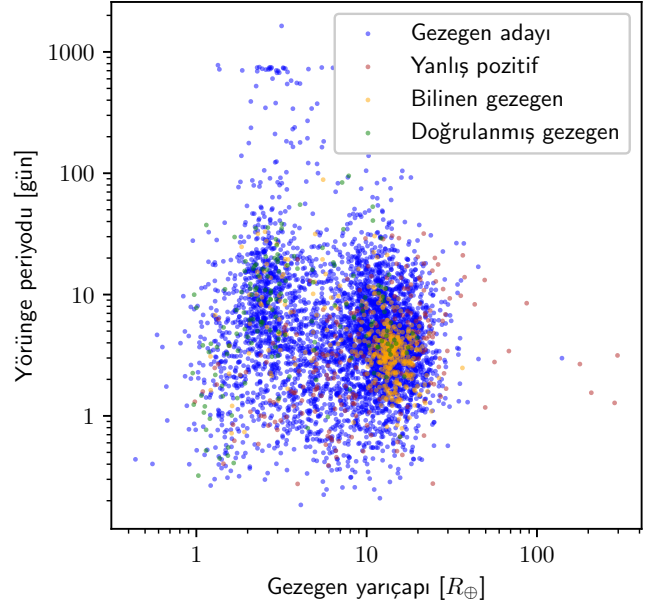
Bu davetli bildiride TESS'in geçtiğimiz dört yıl içerisinde ortaya koyduğu keşiflerin ana hatları özetlenecektir.

2 TESS İlginç Nesne (TOI) süreci

TESS'in Dünya etrafındaki eliptik yörüngesi Dünya'ya yaklaştığı yerberci civarında topladığı veriyi ~ 100 Mbps gibi yüksek hızlarda Dünya'ya iletebilmesini mümkün kılmaktadır. Bu sayede TESS ana görevi boyunca Tam Çerçeve Görüntülerini (FFI) 30 dakikalık, belirli sayıda seçilen hedef etrafındaki pikselleri ise 2 dakikalık sıklıkta toplamıştır. 2020-2022 arasındaki ilk uzatma görevinde ise indirilen iki FFI arasındaki süre 10 dakika olarak belirlenmiş, geçtiğimiz Eylül ayında başlayan ikinci uzatma görevinde ise bu sıklık 200 saniyeye kadar indirilmiştir. İkinci uzatma görevinde ek olarak yeröte civarında da veri iletimi yapılmaya başlanmıştır. TESS'in topladığı görüntülerdeki hedeflerde geçiş yapan ötegezegen aramak için açıklık ışık ölçümü yapılmaktadır. Daha sonra ortaya çıkan ışık eğrilerinde En Küçük Kareler Kutusu (BLS; Kovács ve diğ. 2002) yöntemi kullanılarak döngüsel kutular aranmaktadır (Twicken ve diğ. 2016; Huang ve diğ. 2020). Alınan BLS sinyalleri öncelikle makine öğrenmesi yardımı ile ön elemeyden geçirilmekte (Yu ve diğ. 2019), daha sonra da TESS İlginç Nesne (TOI) çalışma grubu tarafından incelenmektedir. Görevin ilk aylarında hedef yıldızların fiziksel özellikleri için TESS Girdi Kataloğu v7 (TICv7) kullanılmış olsa da (Stassun ve diğ. 2018), kısa sürede Gaia DR2 (Gaia Collaboration ve diğ. 2018) veri sürümündeki ~ 1.3 milyar ıraklık açısı ölçümü sayesinde güncellenen TICv8 (Stassun ve diğ. 2019) kullanılmaya başlanmıştır.

TESS için tüm gökküreyi tarayabilmenin doğal bir götürüsü, algıç piksellerinin büyük (bir kenarı 21'') tutulması zorunluluğu olmuştur. Bu büyük pikseller de gökküredeki belirli bir noktasal kaynaktan alınan ışık eğrisinin komşu kaynaklardan gelen ışığı da içermesine sebep olmaktadır. Örneğin gözlemlenen bir sinyal hedef yıldız önünden geçiş yapan bir ötegezegenle tutarlı olmakla birlikte aynı zamanda hedef yıldızın ışığı yüzünden geçiş derinliği az algılanan bir komşu örten çift olma olasılığı da vardır. Bir başka deyişle, TESS ışık eğrilerinden elde ettiğimiz geçiş sinyallerini istatistiksel olarak doğrulamak (yanlış alarm hipotezini dışlamak) çoğunlukla mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, algıçın kendisinden kaynaklanan bir sistematik hata olmadığı tespit edilen ve ötegezegenlerin sahip olabileceği boyutlarla tutarlı bir derinlikte olan periyodik geçiş sinyalleri birer ötegezegen *adayı* olarak TOI Kataloğu'na eklenmektedir. TOI çalışma grubumuz Kasım 2022 itibarıyla toplam 6.050 adet TOI tespit etmiştir.

TOI çalışma grubuna ek olarak 13.5 TESS kadirinden parlak FFI içerisindeki tüm hedefler için MIT'de üretilen ışık eğrilerini kullanarak bir sönük-yıldız ötegezegen taraması gerçekleştirilmekteyiz (Kunimoto ve diğ. 2022). Bu çalışma çerçevesinde ana görev boyunca çoğunluğu sıcak Jüpiter olmak üzere 1.617 adet TOI tespit edilmiştir. Uzatma görevinde artan görüntüleme sıklığı sayesinde daha küçük barınak yıldızlara hassas hale gelen ve halihazırda devam eden sönük-yıldız

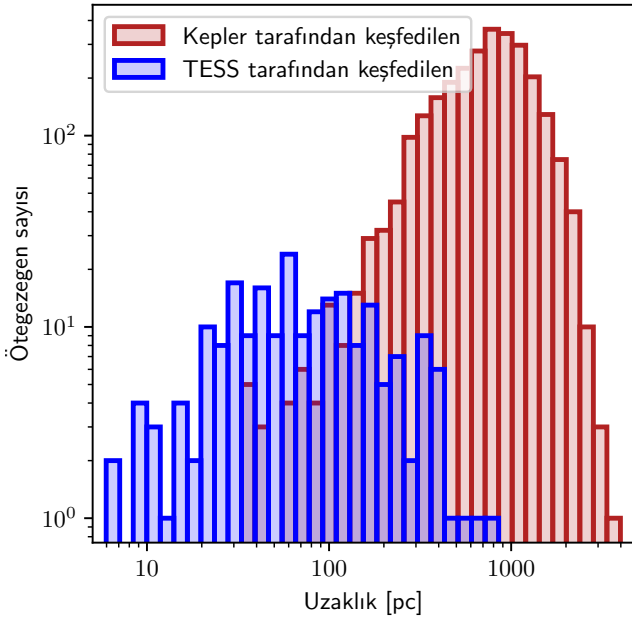


Şekil 1. TESS İlginç Nesnelere (TOI) yörünge periyodu ve yarıçapı dağılımı. Noktalar TOI kataloğundaki şu alt sınıfları ifade etmektedir: TESS ile geçişleri gözlemlenmesine rağmen TESS öncesinde bilinen ötegezegenler (turuncu), TFOP ve Gaia verisi veya müteakip TESS veri analizi sonucunda gezegen olamayacağı anlaşılan nesnelere (kırmızı), takip süreci sonucunda doğrulanmış ötegezegenler (yeşil), geriye kalan ve doğrulanmayı bekleyen ilginç nesnelere (mavi).

taraması Kasım 2022 itibarıyla toplamda 2.611 adet TOI tespit etmiştir.

Astronomi araştırma toplumu ile ExoFOP üzerinden paylaşılan TOI uyarıları daha sonradan TESS Takip Gözlem Programı (TFOP) çerçevesinde Dünya çapında çeşitli yer-konuşlu teleskop kaynakları kullanılarak takip edilmektedir. Geçiş yapan bileşenin gezegen hipotezi ile tutarsızlığı gösterildiğinde yanlış pozitif olarak etiketlenmektedir. Kasım 2022 itibarıyla TOI kataloğunun yalnızca %3'ünün yanlış pozitif olduğu belirlenmiş olsa da, dört senedir takip edilme şansı olan ilk girdilere bakıldığında bu oranın zamanla yükseleceğini düşünmekteyiz. TOI kataloğu içerisinde %7'lik bir oranla TESS ile geçişleri ölçülmesine rağmen TESS'ten önce bilinen ötegezegenler de yer almaktadır. Ortaya çıkan TOI yarıçap ve yörünge periyodu dağılımı Şekil 1'de verilmiştir. Şekilde ~ 700 günlük yörünge periyodu etrafında bir kümelenme görülebilir. Bunun sebebi, birden fazla yıla yayılan ve arada uzun gözlemsel boşluklar bulunan ışık eğrilerinden elde ettiğimiz ilginç nesnelere BLS sinyali ile tutarlı en büyük yörünge periyodu ile katalogluyor olmamızdır.

TOI doğrulaması üç alt süreçten oluşmaktadır: SG1 geçişin kaynak üzerinde olduğunu, SG2 geçiş üretebilecek bileşenin ötegezegen veya kahverengi cüce ile tutarlı, yıldız-altı bir kütle ($\lesssim 80 M_J$) sahip olduğunu, SG3 ise hedef barınak yıldızının yakın ($< 1''$) bir yıldız eşi olmadığını doğrulamayı amaçlar. Küçük olan ötegezegenlerin TFOP önceliği yüksek tutulmakta, bu sayede TESS'in küçük ötegezegen getirisi teşvik edilmektedir (Guerrero ve diğ. 2021).



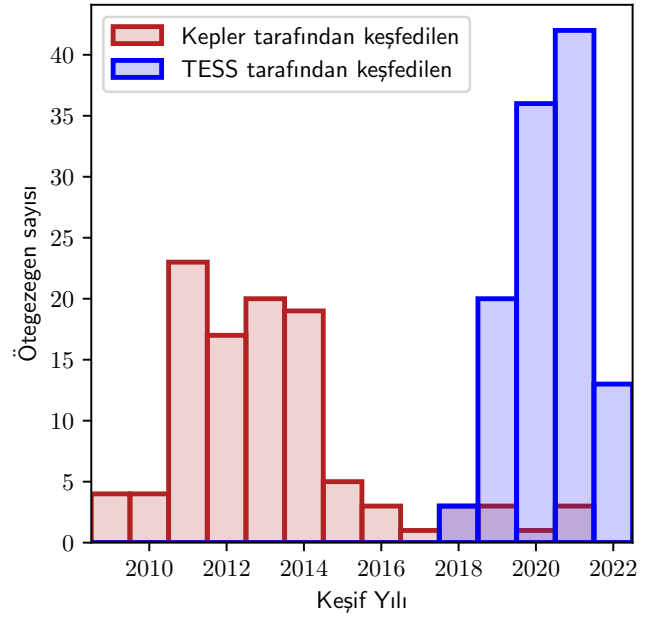
Şekil 2. TESS'in ve Kepler Uzay Teleskobu'nun keşfettiği doğrulanmış ötegezegenlerin Güneş'ten olan uzaklıklarının dağılımı.

3 TESS'in ötegezegen keşifleri

TESS'in ve Kepler Uzay Teleskobu'nun keşfettiği ötegezegen toplulukları arasında önemli farklar bulunmaktadır. Örneğin Şekil 2 TESS'in ve Kepler Uzay Teleskobu'nun keşfettiği doğrulanmış ötegezegenlerin Güneş'ten olan uzaklık dağılımını göstermektedir. TESS'in keşifleri, Kepler Uzay Teleskobu'nunkilerine göre yaklaşık olarak 10 kat daha yakındırlar ve bu nedenle de beş kadir daha parlak barınak yıldızlarına sahiptirler.

Buna ek olarak Şekil 3 TESS ve Kepler Uzay Teleskobu tarafından keşfedilen ve daha sonradan dikine-hız yöntemi ile kütle ölçümü hassas bir şekilde yapılabilen ötegezegenlerin sayılarını vermektedir. Kepler Uzay Teleskobu'nun toplamda keşfettiği doğrulanmış ötegezegen sayısı TESS'inin ~ 10 katı olmasına rağmen, TESS'in nitelendirilebilir ötegezegen bütçesine katkısı 2022 itibarıyla Kepler Uzay Teleskobu'nunkini geride bırakmıştır.

Bildiğimiz ötegezegen sayısı hızla artıyor olsa da, farklı barınak yıldızları etrafındaki ötegezegenlerin çeşitli yörünge mimarilerine oturmuş olması, aydınlatılma ve dinamik geçişlerinin farklı olması sebebiyle gezegen oluşum ve evrim süreçleri hakkındaki algımıza katkıları sınırlı olmaktadır (Owen & Estrada 2020). Bu nedenle, birden fazla ötegezegen barındıran ve gözlemsel olarak elverişli yıldızlar etrafındaki ötegezegenlerin keşfi ve nitelendirilmesi önem teşkil etmektedir. TESS bugüne kadar birçok çok-gezegenli sistem keşfetmiştir (Günther ve diğ. 2019; Gilbert ve diğ. 2020; Badenas-Agusti ve diğ. 2020). Bu keşifleri mümkün kılan çoğu ışık ölçüm ve dikine-hız veri modellemesi *allesfitter* yazılımı kullanılarak yapılmıştır (Günther & Daylan 2021). TESS'in bu doğrultudaki en önemli keşiflerinden biri parlak ($V=9.2$) barınak yıldızına sahip, sıkı çok-gezegenli sistem TOI-1233'tür (Daylan ve diğ. 2021a). 2019 yılında TESS'in 10. ve 11. Sektör boyunca topladığı veride TOI-1233'ün yörüngesinde geçiş yapan bir süper-Dünya, üç adet de mini-Neptün keşfedilmiştir. Bu keşfe



Şekil 3. TESS ve Kepler Uzay Teleskobu tarafından keşfedilen ve daha sonrasında hassas ($> 5\sigma$) kütle ölçümü yapılabilen ötegezegen sayısı.

müteakip TOI-1233 sistemi CHEOPS (Benz ve diğ. 2021) tarafından da takip edilmiş ve sistemde geçiş yapan beşinci bir gezegen daha keşfedilmiştir (Bonfanti ve diğ. 2021; Hoyer ve diğ. 2022). TESS'in keşfettiği bilim potansiyeli yüksek diğer bir hedef de, bir beyaz cüce etrafında bütünlüğünü koruyan ve geçiş yapan ilk ötegezegen olan WD-1856 b olmuştur (Vanderburg ve diğ. 2020). TESS bu keşiflere ek olarak bilinen ötegezegenlerin faz eğrileri aracılığı ile daha detaylı nitelendirilmesini, örneğin gündüz ve gece yüzey sıcaklıklarının belirlenip yansıtıcılık ve ısı dolaşım veriminin ölçülmesini de mümkün kılmaktadır (Daylan ve diğ. 2021b).

4 Tartışma

TESS'in ötegezegen araştırmalarına ana katkısı, yakın ve parlak barınak yıldızları önünden geçiş yapan, kütle ölçümüne ve müteakibinde geçiş tayf ölçümü ile atmosfer nitelendirmesine elverişli olan küçük ötegezegenlerdir. Bu ötegezegenler önümüzdeki yıllarda JWST (Gardner ve diğ. 2006), ARIEL (Tinetti ve diğ. 2016) ve LUVUOIR (The LUVUOIR Team 2019) veya benzeri uzay-konuşlu teleskoplar ve GMT (Johns ve diğ. 2012), TMT (Skidmore 2015), ve ELT (Evans 2008) gibi yeni nesil yer-konuşlu 20-30 metre sınıftaki teleskoplar tarafından takip edilecek ve atmosferleri detaylı bir şekilde nitelendirilecektir. Bunun sonucunda ortaya çıkan atmosfer özelliklerinin (bileşim, metal bolluğu, sıcaklık-basınç ilişkisi gibi) barınak yıldız tipi ve yaşı, aydınlatma, yarıçapa göre nasıl değiştiğini inceleme fırsatı elde edeceğiz. Bu çalışmalar bizi küçük gezegenlerin atmosferlerini hangi koşullarda tutabildiklerini veya kaybettiklerini göstererek, gezegen oluşum modellerimizi güncellememizi sağlayacaklar. Atmosfer kayıp süreci hakkında ortaya çıkan bulguları kullanarak Güneş Sistemi'mizdeki Venüs ve Mars gezegenlerinin yapısal olarak Dünya'ya benzemelerine rağmen atmosfer içeriklerinin neden bu denli farklı olduğunu aydınlatma şansımız olabilir.

Teşekkür

Bu çalışma MIT Kavli Enstitüsü tarafından verilen Kavli Ödülü ve John Templeton Vakfı tarafından verilen LSSTC Catalyst Ödülü ile desteklenmiştir. Ek olarak, TESS görevi NASA'nın Bilim Görev Müdürlüğü (SMD) tarafından desteklenmektedir ve ışık eğrilerinin üretimi NASA Ames Araştırma Merkezi'ndeki süperbilsayar üzerinde yapılmaktadır.

Kaynaklar

- Badenas-Agusti M., ve diğ., 2020, *The Astronomical Journal*, 160, 113
- Benz W., ve diğ., 2021, *Experimental Astronomy*, 51, 109
- Black D. C., 1980, *Space Science Reviews*, 25, 35
- Bonfanti A., ve diğ., 2021, *Astronomy and Astrophysics*, 646, A157
- Borucki W. J., Summers A. L., 1984, *Icarus*, 58, 121
- Borucki W. J., ve diğ., 2010, *Science*, 327, 977
- Charbonneau D., Brown T. M., Latham D. W., Mayor M., 2000, *The Astrophysical Journal*, 529, L45
- Daylan T., ve diğ., 2021a, *The Astronomical Journal*, 161, 85
- Daylan T., ve diğ., 2021b, *The Astronomical Journal*, 161, 131
- Deming D., ve diğ., 2013, *Astrophysical Journal*, 774, 95
- Dressing C. D., Charbonneau D., 2015, *Astrophysical Journal*, 807, 45
- Evans C., 2008, *Astronomy and Geophysics*, 49, 22
- Fulton B. J., ve diğ., 2017, *The Astronomical Journal*, 154, 109
- Gaia Collaboration ve diğ., 2018, *Astronomy and Astrophysics*, 616, A1
- Gardner J. P., ve diğ., 2006, *Space Science Reviews*, 123, 485
- Gilbert E., ve diğ., 2020, *Astronomical Journal*, 160, 116
- Guerrero N. M., ve diğ., 2021, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 254, 39
- Günther M. N., Daylan T., 2021, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 254, 13
- Günther M. N., ve diğ., 2019, *Nature Astronomy*, 3, 1099
- Henry G. W., Marcy G. W., Butler R. P., Vogt S. S., 2000, *The Astrophysical Journal*, 529, L41
- Howard A. W., ve diğ., 2010, *Science*, 330, 653
- Hoyer S., ve diğ., 2022, *arXiv preprints*
- Huang C. X., ve diğ., 2020, *Research Notes of the AAS*, 4, 204
- Johns M., ve diğ., 2012, in *Ground-based and Airborne Telescopes IV*. p. 84441H, [doi:10.1117/12.926716](https://doi.org/10.1117/12.926716)
- Kipping D. M., Sandford E., 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463, 1323
- Konacki M., Torres G., Jha S., Sasselov D. D., 2003, *Nature*, 421, 507
- Kovács G., Zucker S., Mazeh T., 2002, *Astronomy and Astrophysics*, 391, 369
- Kreidberg L., ve diğ., 2014, *Nature*, 505, 69
- Kunimoto M., ve diğ., 2022, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 259, 33
- Owen J. E., Estrada B. C., 2020, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491, 5287
- Ricker G. R., ve diğ., 2015, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1, 014003
- Rosenblatt F., 1971, *Icarus*, 14, 71
- Skidmore W., 2015, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 15, 1945
- Stassun K. G., ve diğ., 2018, *The Astronomical Journal*, 156, 102
- Stassun K. G., ve diğ., 2019, *The Astronomical Journal*, 158, 138
- Tarter J. C., Black D. C., Billingham J., 1986, *Acta Astronautica*, 14, 253
- The LUVUOIR Team 2019, *arXiv preprints*
- Tinetti G., ve diğ., 2016, in *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*. p. 99041X, [doi:10.1117/12.2232370](https://doi.org/10.1117/12.2232370)
- Twicken J. D., ve diğ., 2016, *The Astronomical Journal*, 152, 158

Udalski A., Szewczyk O., Zebrun K., Pietrzynski G., Szymanski M., Kubiak M., Soszynski I., Wyrzykowski L., 2002, *Acta Astronomica*, 52, 317

Vanderburg A., ve diğ., 2020, *Nature*, 585, 363

Winn J. N., Fabrycky D. C., 2015, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 53, 409

Yu L., ve diğ., 2019, *The Astronomical Journal*, 158, 25

Access:

M23-0391: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.