

DAG 4 Metre Teleskobuyla Yakın Kızılötede Ötegezegen Atmosferi Gözlemleri

Selçuk Yalçinkaya¹  , Özgür Baştürk¹ 

¹ Ankara Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 06100, Türkiye

Accepted: December 7, 2022. Revised: December 7, 2022. Received: November 3, 2022.

Özet

Doğu Anadolu Gözlemevi'nde (DAG) kurulmakta olan 4 metrelik teleskop, kızılöte dalgaboylarında yapabileceği gezegen örtülme gözlemleri ile ötegezegen atmosferlerini anlamaya yönelik çalışmalara önemli katkı yapabilecek potansiyele sahiptir. Bu potansiyele yönelik bir ön-değerlendirme yapabilmek amacıyla bu çalışmada öncelikle geçiş yapan ötegezegenlerin gece-gündüz arası ısı transferinin mükemmel olduğu ve yakın kızılötede yansıtma güçlerinin sıfır olduğu varsayımlarıyla denge sıcaklıkları hesaplanmıştır. Ayrıca, denge sıcaklıklarında birer karacisim olduğu varsayılan geçiş yapan ötegezegenlerin J, H ve K bantlarında örtülme derinlikleri hesaplanmıştır. `signal` kodu ile 4 metre sınıfında bir teleskop ve DAG'da kurulmakta olan 4 metrelik teleskobun kızılöte kamerasına benzer özelliklere sahip bir dedektör ile 6-15.5 kadir aralığında 0.5 kadirlik adımlarla J, H ve K bandında ulaşılabilecek Sinyal/Gürültü değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler örtülme derinlikleri ile karşılaştırılarak birçok sıcak-Jüpiter türü gezegenin örtülmelerinin gözlenmesi için yeterli fotometrik hassasiyete ulaşılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca kızılöte dedektörün gökyüzünde gördüğü alanın küçük olması sebebiyle oluşabilecek kırmızı gürültü kaynaklarının neler olabileceği tartışılmıştır. Hedef ve mukayese yıldızın peş peşe gözlenerek diferansiyel fotometri tekniği ile bu gürültünün azaltılabileceği ve yüksek hassasiyetli geçiş gözlemlerinden elde edilebilecek bilgilerin Gaussyen Süreçler tekniğinde kullanılarak geriye kalan kırmızı gürültünün modellenilebileceği önerilmiştir.

Abstract

We present the potential of currently installing 4 meter telescope of DAG for the exoplanet atmosphere studies with the occultation observations. In order, equilibrium temperatures (T_{eq}) of transiting exoplanets are calculated assuming perfect heat redistribution between the day and night sides and no reflection. Using T_{eq} values, occultation depths in the near-infrared J, H and K bands are calculated with the assumption that the host star and the exoplanets were blackbodies. Then, the hypothetical Signal-to-Noise ratios are calculated for the J, H, and K bands employing the `signal` code for a 4 meter class telescope with a similar infrared camera to that planned to be used with the 4 meter telescope Doğu Anadolu Gözlemevi. The calculations are performed in the 6 - 15.5 magnitude range for each band with 0.5 magnitude steps. We compare the signal-to-noise ratio values with the hypothetical occultation depths and conclude that photometric precision requirements for accultation observations can be satisfied for many hot-Jupiters especially in the K band. We discuss the potential sources of correlated noise due to the small field of view provided by the infrared camera and suggest that the simultaneous observations of the target and comparison star can mitigate the correlated noise, the remains of which can be modelled by employing Gaussian Processes and then removed with the prior knowledge from high precision transit observations.

Anahtar Kelimeler: infrared: planetary systems – atmospheric effects – techniques: photometric

1 Giriş

Barınak yıldızlarına yakın yörüngelerde dolanan dev gaz gezegenler (sıcak Jüpiterler), maruz kaldıkları güçlü tedirginlik etkileri sebebiyle yıldızlarıyla kısa zaman ölçeklerinde dönme dolanma kilitlenmesine girmektedirler. Bu nedenle bu türden gezegenlerin bir yarı-küreleri her zaman gece, diğer yarı-küreleri ise her zaman gündüz olmaktadır. Bu durumda eğer gezegenin gündüz tarafından gece tarafına ısı transferi etkin bir biçimde gerçekleşmiyorsa, gece-gündüz arası sıcaklık farkı çok yüksek olmakta ve gezegenin gündüz yarı-küresinin sıcaklığı, beklenen denge sıcaklığından yüksek olmaktadır. Gece-gündüz

yarı-küreleri arası ısı transferinin miktarı gezegenin atmosfer dinamikleriyle ilgilidir.

Yıldızından gelen enerji ile ısınan sıcak Jüpiterlerin termal ışınımı yakın-orta kızılöte bölgede maksimuma ulaşmaktadır. Bu nedengezegen örtülmesi sırasındaki fotometrik değişim de bu dalgaboyu bölgesinde maksimumdur. Bu durum, kızılötede yapılan gözlemlerin gezegen atmosferi çalışmaları açısından daha avantajlı olmasını sağlamaktadır. Örtülme derinliği, gözlem yapılan dalgaboyu aralığında gezegenden gelen akının yıldızıninkine oranını (δ_d) vermektedir. Yakın-orta kızılötede elde edilen δ_d değeri, yıldızın etkin sıcaklığı ve bileşenlerin mutlak parametreleriyle birleştirilerek gezegenin sıcaklığı hesaplanabilir. Gezegenin stratosferinin altındaki katmanlardan sıcak olabilmesi (sıcaklık terselmesi) nedeniyle bu dalgaboylarında beklenenden yüksek örtülme derinlikleri

* yalcinkayas@ankara.edu.tr

gözlenebilir. Bu olgu şimdiye kadar sadece bazı ultra Sıcak Jüpiterlerde ($T > 2200$ K) gözlenmiştir (Johnson ve diğ. 2022).

Görsel bölgede ise gezegenden gelen akının yıldızinkine oranı genellikle ihmal edilebilecek kadar küçük olmaktadır. Ancak görsel bölgede de bir çok ötegezegenin örtülme derinliği ölçülebilmektedir (Wong ve diğ. 2021). Bu durum, görsel bölgede gezegenden alınan ışının yansıma tarafından domine edilmesinden kaynaklanmaktadır. Her ne kadar sıcak Jüpiterlerin teorik yansıtma güçleri (albedo), yüksek sıcaklıklarda yansıtıcı bulutların yoğunlaşmasından dolayı (Sudarsky ve diğ. 2000), çok küçük olsa da bazı sıcak Jüpiterlerin görsel bölgede yapılan örtülme gözlemleri sonucunda albedolarının teorik değerlerinden daha yüksek bulunduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum sıcak Jüpiter atmosferlerinde, yüksek irtifada yansıtıcı bulutların olmasına bağlanmaktadır (Wong ve diğ. 2021). Kızılöte dalgaboylarında yapılacak örtülme gözlemlerinden gezegenin gündüz tarafının sıcaklığının belirlenebilmesi durumunda, ilgili sıcaklıkta ve çeşitli basınç değerlerinde yoğunlaşarak bulut oluşturabilecek ve elde edilen yüksek albedo değerlerini açıklayabilecek element veya bileşiklerin varlığı ortaya konulabilir.

Sıcak Jüpiterler'in yörünge çemberselleşme süreleri, genellikle 1-2 yüz milyon yıl mertebesindedir. Sıcak Jüpiter barındırdığı bilinen neredeyse tüm sistemlerin yaşları, bu süreden çok daha fazladır. Ancak birçok sıcak Jüpiter'in yörüngesinin istatistiksel anlamlı bir yörünge dışmerkezliliğine (e) sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durum genellikle dışarda bulunan bir ilave cismin yaratacağı tedirginlik etkileriyle açıklanmaktadır (Holman ve diğ. 1997). Pek çok gezegen için yörünge basıncı sadece dikine hız gözlemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Ancak bir evre boyunca yeteri sayı ve duyarlılıkta dikine hız (RV) verisinin alınamaması, gezegen kaynaklı RV değişim genliğinin çok küçük olması ve dışmerkezlilikle enberinin boylamı (ω) arasındaki dejenerasyon sebebiyle çoğu gezegenin yörüngesi çembersel yörünge kabülüyle modellenmektedir. Dışmerkezliliğin serbest bırakıldığı modellerde ise e 'nin doğası gereği pozitif olması gerektiğinden sıfırdan farklı ancak genellikle istatistiksel olarak anlamlı olmayan dışmerkezlilik değerleri elde edilebilmektedir. Örtülme gözlemlerinden elde edilen örtülme ortası zaman kullanılarak e ve ω arasındaki dejenerasyon giderilebilir (Charbonneau ve diğ. 2005) ve sonuç olarak daha hassas ve doğru e değerlerine ulaşılabilir.

Tüm bu nedenlerle kızılöte dalgaboylarında yapılacak ötegezegen örtülmesi gözlemleri önem taşımaktadır. Ancak doğası gereği örtülme derinliği küçük olduğundan örtülme sinyali beyaz gürültü içerisinde kaybolabilir veya kırmızı gürültüyle karışabilir. Bu çalışmada geçiş yapan ötegezegenlerin J, H ve K bandındaki örtülme derinlikleri hesaplanmış ve Doğu Anadolu Gözlemevindeki (DAG) 4 metrelik teleskopla (Yeşilyaprak & Keskin 2020) ulaşılacak beyaz gürültü miktarlarıyla karşılaştırılmıştır. Özellikle kullanılması planlanan dedektörün gördüğü alanın küçük olması sebebiyle karşılaşılabilecek kırmızı (korele) gürültü kaynakları tahmin edilmiş ve bu gürültünün hangi tekniklerle giderilebileceği tartışılmıştır.

2 Örtülme Derinliği Hesabı

Geçiş yapan tüm ötegezegenlerin ve barınak yıldızlarının parametreleri NASA Exoplanet Archive'dan alınarak denge sıcaklıkları hesaplanmıştır. Bu hesaplamada gezegenlerin, yıldızlarından gelen tüm ışınımı soğurduğu (albedolarının

sıfır olduğu) ve gezegenlerin gece-gündüz yarı-küreleri arası ısı transferinin mükemmel şekilde gerçekleştiği kabülleri yapılmıştır. Bu kabüllere göre denge sıcaklıkları (T_{eq}) Hansen & Barman (2007) tarafından verilen ifade ile hesaplanmıştır.

$$T_{eq} = T_{eff} \sqrt{R_p/2a} \quad (1)$$

Buradaki T_{eff} yıldızın etkin sıcaklığı, R_p gezegenin yarıçapı, a ise gezegenin yarıbüyük eksen uzunluğunu göstermektedir. Gezegen ve yıldız denge ve etkin sıcaklıklarında karacisim ışıması yapıyor olmaları varsayımıyla örtülme derinlikleri Wong ve diğ. (2021) verilen formülle hesaplanabilir.

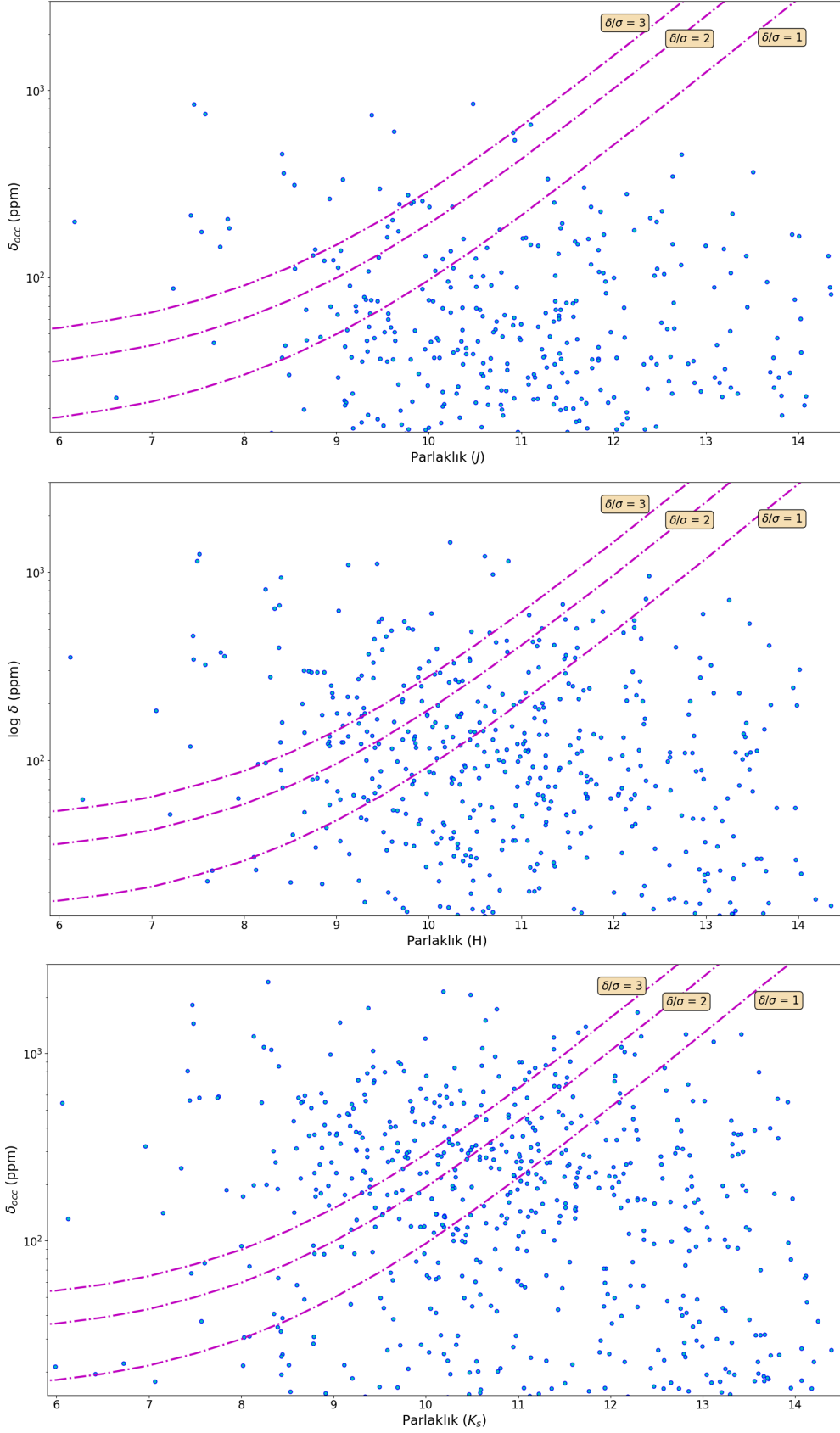
$$T_{eq} = \left(\frac{R_p}{R_s} \right)^2 \frac{\int B_\lambda(T_{eq})t(\lambda)d(\lambda)}{\int B_\lambda(T_{eff})t(\lambda)d(\lambda)} \quad (2)$$

Buradaki R_s yıldızın yarıçapı, B_λ karacisim fonksiyonu, $t(\lambda)$ filtrenin geçirgenlik fonksiyonunu göstermektedir. Filtrelerin geçirgenlik fonksiyonu Spanish Virtual Observatory (SVO) Filter Profile Service'den alınmıştır. Denklem 2 kullanılarak yakın kızılöte filtrelerinde (J, H ve K) tüm geçiş yapan ötegezegenlerin örtülme derinlikleri hesaplanmıştır.

3 Beyaz Gürültü Hesabı

Farklı parlaklığa sahip yıldızların J, H ve K filtreleriyle yapılacak gözlemlerinde ulaşılacak Sinyal/Gürültü Oranı (SNR) signal kodu kullanılarak, DAG teleskobu ve kızılöte kamerasına benzer özelliklere sahip olması nedeniyle 4.2 metrelik William Herschel Teleskobu'na (WHT) bağlı Long-slit Intermediate Resolution Infrared Spectrograph (LIRIS) dedektörü için yapılmıştır. Bu özellikler; yakın kızılötedeki gökyüzü parlaklığı (13 kadir/"), teleskobun geçirgenliği (0.79), optik elemanların geçirgenliği (0.79) ve dedektörün kuantum etkinliğidir (J bandında %80, K bandında %90). DAG 4 metrelik teleskopta kullanılması planlanan Diffraction-limited Infra Red Adaptive optics Camera (DIRAC, Yeşilyaprak & Keskin 2020) ile LIRIS dedektörü, benzer dalgaboyu aralığına duyarlıdır. Bu iki dedektör benzer piksel çözünürlüğüne de sahip olmalarına karşın gökyüzünde gördükleri alan DIRAC ve LIRIS için sırasıyla $33'' \times 33'' \times 2$ (1016×1016 piksel) ve $4'.27 \times 4'.27$ (1024×1024 piksel) olarak verilmiştir.

Bu amaçlarla signal kodu kullanılarak 6-15.5 kadir arasında yarım kadirlik aralıklarla SNR hesabı yapılmıştır. Bu hesaplar için optimum poz süresi olarak, dedektörün satüre olacağı minimum poz süresinin yarısı seçilmiştir. Bu seçim yapılırken dedektör cevabının lineerlik yüzdesinin maksimum olduğu değer, Analog-to-Digital Unit (ADU) biriminde pikselin alabileceği maksimum akı değerinin yarısı olacağı varsayılmıştır. Fotometrik hassasiyeti arttırmak ve parlak yıldızlar gözlenirken dedektörün izin vereceği minimum poz süresinin altında kalmamak için gözlemlerin odak dışı gözlem tekniği (Baştürk ve diğ. 2014) ile yapılacağı düşünüldüğü için yıldızın FWHM değeri $5''$ olacak şekilde odağın bozulacağı durum için SNR hesaplanmıştır. signal kodunda LIRIS için sürekli gözlem modu (ing: stare mode) olmadığından her bir gözlem sekansında ilgili poz süresinde alınacak iki görüntünün ortalamasının kullanılacağı varsayılmıştır. İlgili poz süresi dahilinde örtülme boyunca elde edilebilecek nokta sayısı, örtülmeyi örnekleyebilmek için gerekli nokta sayısından fazla olmalıdır. Bu nedenle tipik bir sıcak Jüpiter'in ortalama örtülme süresinin 3 saat olduğu ve örtülmenin 50 nokta (3.6 dakikada bir nokta) ile örneklenebileceği varsayımlarıyla ilgili poz süresinde ulaşılacak SNR miktarı, 3.6 dakikalık ortalamalara göre



Şekil 1. Geçiş yapan ötegezegenlerin J (üst panel), H (orta panel) ve K (alt panel) bantlarının parlaklıklarına (x-ekseni) karşılık milyonda bir (ppm) cinsinden örtülme derinlikleri (y-ekseni). Pembe noktalı kesikli çizgiler beyaz gürültü kaynaklı saçılma cinsinden örtülme derinliklerini göstermektedir.

Çizelge 1. K_s Parlaklığına göre SNR miktarları

K_s (kadir)	Poz Süresi (saniye)	SNR -	SNR (3.6 dk ortalama)
6	2.4	7870	55339
6.5	3.7	7334	51413
7	4.6	6627	46358
7.5	8.4	5578	40054
8	13	4888	33507
8.5	17	3926	26646
9	22.6	3016	20180
9.5	28.6	2238	14740
10	35.4	1600	10345
10.5	40	1091	6964
11	44	730	4606
11.5	48	485	3025
12	48.8	310	1929
12.5	51	200	1236
13	51	127	782
13.5	52	80	493
14	52	51	314
14.5	52	32	197
15	52	20	123
15.5	52	13	80

tekrar hesaplanmıştır. Şekil 1'de sırasıyla J, H ve K filtreleri için ayrı ayrı parlaklık değerlerine göre ötegezegenlerin örtülme derinlikleri gösterilmiştir. Bu görselde ayrıca örtülme derinlikleri beyaz gürültü cinsinden de ifade edilmektedir.

4 Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, geçiş yapan ötegezegenlerin teorik örtülme derinlikleriyle, 4 metre sınıfında bir teleskop ve bir kızılöte dedektör kullanılarak yapılan gözlemlerle J, H ve K bantlarındaki parlaklıklara göre elde edilebilecek SNR değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 1 alt panelden görüleceği üzere özellikle K_s bandında birçok ötegezegen için ulaşılabilecek SNR miktarı, örtülme derinliğini gözleyebilmek için yeterlidir (Çizelge 1). Örtülme derinliklerinin hesaplanmasında kullanılan T_{eq} değeri hesaplanırken gezegenin gece-gündüz arası ısı dağılımının tekdüze olduğu varsayılmıştır. Şimdiye kadar yapılan gözlemlerin hiçbirinde böyle bir sonuca ulaşılamamıştır. Ötegezegenlerin şimdiye kadar yapılan evre-eğrisi gözlemlerinin tümünde, özellikle sıcak Jüpiterlerin gündüz yarı-kürelerinin gece yarı-kürelerine göre çok daha sıcak olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle ötegezegenlerin örtülme derinliklerinin, hesaplanandan çok daha derin olması gerekmektedir ki yapılan gözlemler de bunu göstermektedir (Garhart ve diğ. 2020).

DAG 4 metrelik teleskobuyla yapılacak gözlemlerde foton gürültüsüne atfedilebilecek beyaz gürültü ($1/SNR$) miktarının, birçok ötegezegen için örtülmenin başarılı bir şekilde gözlenmesine engel olmayacağı sonucuna varılmıştır. Ancak DIRAC dedektörünün gördüğü alanın görece küçük olması, gözlem sırasında mukayese yıldızının hedef yıldız ile aynı anda gözlenememesine neden olabilecektir. Bu durumda gözlem boyunca hava kütlesi, atmosferdeki dinamik değişimler, teleskobun takibi ve dedektör pisellerindeki hassasiyetin zamana bağlı değişiminden dolayı elde edilecek ışık eğrisinde örtülme derinliğinden çok daha yüksek mertebede korele (kırmızı) gürültü olabilecektir. Gece boyunca hedef yıldız ile mukayese yıldızı peş peşe gözlenerek ve mukayese yıldızının aletsel akı değeri, hedef yıldız gözleminin yapıldığı zamana interpolate

edilerek diferansiyel fotometri yapılabilir. Bu durumda kırmızı gürültü miktarı azaltılabilir; ancak yine de elde edilecek ışık eğrisindeki örtülme sinyali, kırmızı gürültünün içerisinde kaybolabilir.

Çembersel veya düşük yörünge dışmerkezliliğine sahip ötegezegenlerin, toplam geçiş süreleri, örtülme sürelerine eşit veya yakın olacaktır. Yine aynı şekilde geçiş başlangıcı (ingress) ve geçiş sonu (egress) zaman ölçekleri de birbirine eşit veya çok yakın olacaktır. Geçiş gözlemlerinden elde edilebilecek bu parametrelere ek olarak yörünge eğim açısı da geçiş gözlemlerinden hesaplanabilir. Bu parametreler kullanılarak Gaussyen Süreçler (ing: Gaussian Processes, kısaca GP) yardımıyla korele gürültü modellenilebilir ve geriye kalan örtülme derinliği ile örtülme ortası zamanı hesaplanabilir (Evans ve diğ. 2015). Kepler, TESS, Spitzer, CHEOPS ve Hubble uzay teleskoplarıyla alınmış evre-eğrisi gözlemleri ve yer-tabanlı teleskoplarla elde edilen dikine hız gözlemleri kullanılarak yörüngesinin çembersel olduğu bilinen ötegezegenler için GP uyumlamak çok isabetli sonuçlar verecektir. Zira bu tür sistemlerde tek bilinmeyen parametre geçiş derinliğidir.

Kaynaklar

- Baştürk Ö., ve diğ., 2014, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, 43, 402, [ADS](#)
Charbonneau D., ve diğ., 2005, [ApJ](#), 626, 523
Evans T. M., Aigrain S., Gibson N., Barstow J. K., Amundsen D. S., Tremblin P., Mourier P., 2015, [MNRAS](#), 451, 680
Garhart E., ve diğ., 2020, [AJ](#), 159, 137
Hansen B. M. S., Barman T., 2007, [ApJ](#), 671, 861
Holman M., Touma J., Tremaine S., 1997, [Nature](#), 386, 254
Johnson M. C., ve diğ., 2022, preprint, ([arXiv:2205.12162](#)), [ADS](#)
Sudarsky D., Burrows A., Pinto P., 2000, [ApJ](#), 538, 885
Wong I., ve diğ., 2021, [AJ](#), 162, 127
Yeşilyaprak C., Keskin O., 2020, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. p. 1144515, [doi:10.1117/12.2560942](#)

Access:

M23-0318: [Turkish J.A&A — Vol.4, Issue 3.](#)