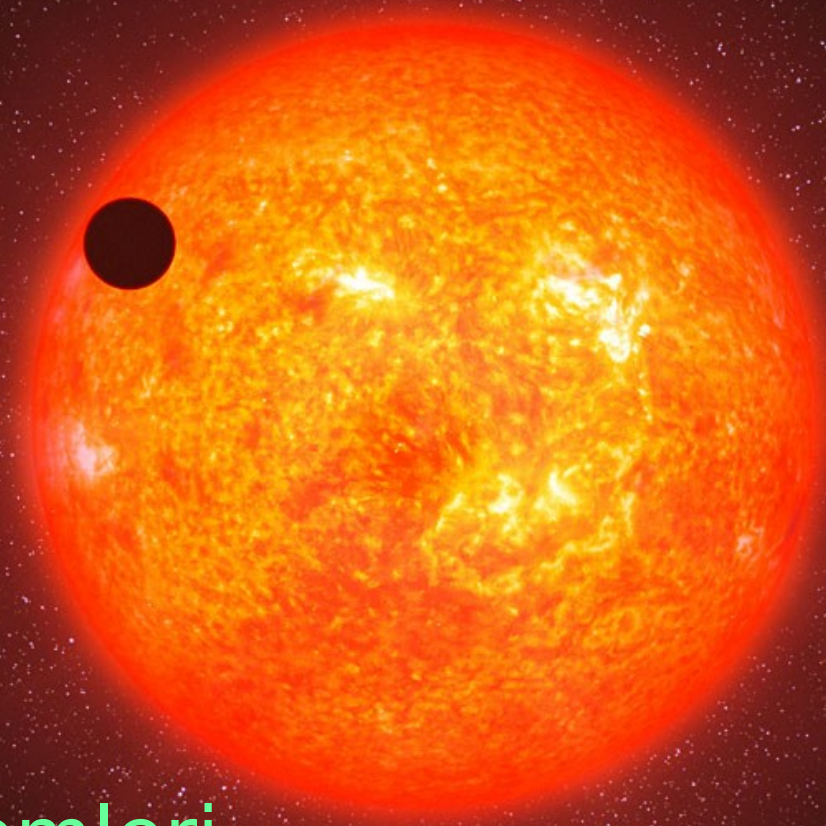




AST413

Gezegen Sistemleri
ve Oluşumu

Ders 4 : Geçiş Yöntemi – II
İleri Konular

Işık Eğrisinden Fiziksel Parametrelere - I

1. Yarıçap (R_g): Geçiş derinliğinden (kontrast) görelî ($k = \sqrt{\delta} = R_g / R_*$) büyüklüğe geçilir.

2. Kütle (M_p): Kütleye geçebilmek için ise dikine hız yarı genliğine (K) ihtiyaç duyulur.

$$\frac{M_g}{(M_g + M_*)^{2/3}} = \frac{K_* \sqrt{1-e^2}}{\sin i} \left(\frac{P}{2\pi G} \right)^{1/3}$$

Bir geçiş için yörünge eğim açısı (i) bulunabildiğinden dikine hızdaki $m_2 \sin i$ dejenerasyonu ortadan kalkar. Ancak $M_g \ll M_*$ alınsa dahi elde edilen $M_g / M_*^{2/3}$ olacağı için yıldızın kütlesini belirlemeden gezegenin kütlesini belirlemek mümkün olmaz

M_* , R_* için [interferometrik gözlemler](#) (Baines vd. 2009), [asterosismoloji](#) (Stello vd. 2009), [çift yıldız sistemleri](#) kullanılarak oluşturulan kalibrasyonlar ve yıldız evrim modelleri kullanılabilir.

3. Etki Parametresi (b): Sadece gözlenebilir nicelikler cinsinden hesap edilebilir (R_g 'nin R_* 'dan, T_{14} ile T_{23} 'ün yörünge döneminden çok küçük olduğu kabul edilerek) olan yaklaşık ifadesi

$$b^2 \approx \frac{(1 - \sqrt{\delta})^2 - (T_{23}/T_{14})^2 (1 + \sqrt{\delta})^2}{1 - (T_{23}/T_{14})^2}$$

Basitleştirme: $\tau \ll T$ (bkz. Geçişin Parametreleri, Slayt-12, Şekil) olduğu varsayılırsa (ki bu gezegenin çok büyük olmadığı ya da sıyrarak geçtiği zamanların dışında iyi bir varsayımdır) ifadeler daha da sadeleşir.

$$b^2 \sim 1 - \sqrt{\delta} \frac{T_{14}}{\tau}$$

Işık Eğrisinden Fiziksel Parametrelere - II

4. Yörünge Büyüklüğüne Ölçeklendirilmiş Yıldız Yarıçapı (R_*/a): Dikine hız gözlemlerinden gelen e ve ω da kullanılarak (yine aynı basitleştirme ve yaklaşımlarla) elde edilebilir.

$$\frac{R_*}{a} \approx \frac{\pi}{2\delta^{1/4}} \frac{\sqrt{T_{14}^2 - T_{23}^2}}{P} \left(\frac{1+e \sin \omega}{\sqrt{1-e^2}} \right) \xrightarrow{\tau \ll T} \frac{R_*}{a} \sim \frac{\pi}{\delta^{1/4}} \frac{\sqrt{T_{14} \tau}}{P} \left(\frac{1+e \sin \omega}{\sqrt{1-e^2}} \right)$$

R_*/a (ve R_g/a) Oranını Belirlemenin Önemi:

1. Bu oran yıldızla gezegen arasındaki tedirginlik kuvvetlerinin ne derece etkili olabileceğini gösterir.

2. R_g/a oranı yıldızın ışığının hangi oranda gezegenin yüzeyine ulaştığını da belirler.

5. Ortalama Yıldız Yoğunluğu (ρ_*): R_*/a oranı ortalama yıldız yoğunluğu ile gezegen yoğunluğu arasındaki ilişki üzerinden yıldızın ortalama yoğunluğunu elde etmemizi sağlar. Bu daha önce de Kepler 3. yasayla elde ettiğimiz ilişkiye özdeştir (Seager & Mallen-Ornelas 2003). Gezegenin ortalama yoğunluğu (ρ_g), ihmal edilmedikleri durumda kütle ve yarıçapı iyi karakterize edilmişse bilinir. Ancak $k^3 = (R_g/R_*)^3$ zaten çok küçük bir nicelik olduğu için belirsizliği yüksek olsa dahi etkisi azdır. Ortalama yıldız yoğunluğu yıldızın yüzey çekim ivmesini belirleyebilmek bakımından da kritiktir.

$$\rho_* + k^3 \rho_g = \frac{3\pi}{G P^2} \left(\frac{a}{R_*} \right)^3$$

Işık Eğrisinden Fiziksel Parametrelere - III

6. Yörünge Eğim Açısı (i): Etki parametresi hesap edildikten sonra yörünge eğim açısına aşağıdaki ifadeyle geçilir.

$$b_{geçiş} = \frac{a \cos(i)}{R_*} \frac{(1-e^2)}{1+e \sin(\omega)}$$

7. Gezegenin Yüzey Çekim İvmesi (g_g): Ayrıca yine Kepler'in 3. yasası ve dikine hız yarı genliği ifadesi kullanılarak elde edilen aşağıdaki ifadeyle yıldızın parametrelerinden bağımsız olarak gezegenin yüzey çekim ivmesine ilişkin bilgi sahibi olmak da mümkündür.

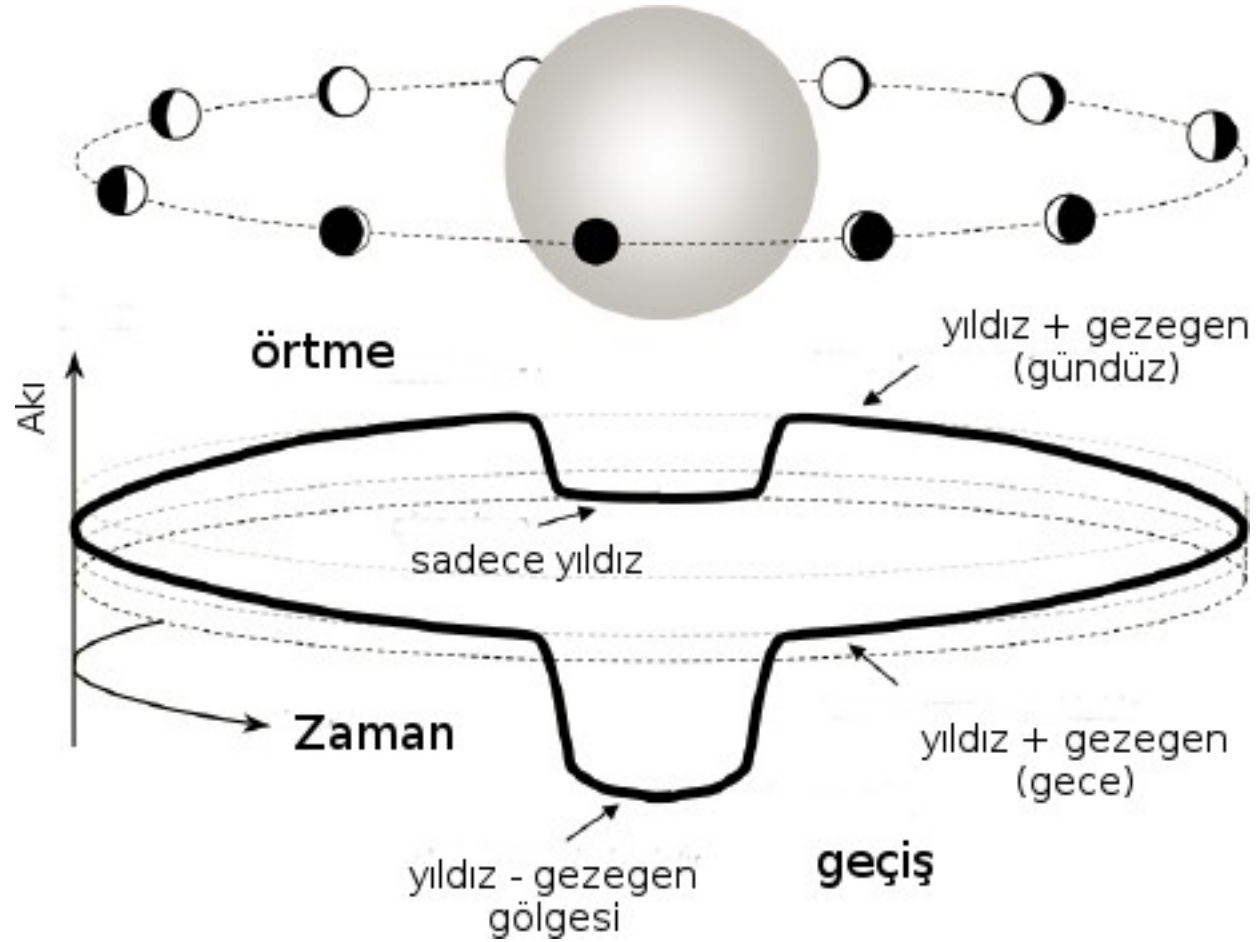
$$K_* = \frac{M_g}{M_* + M_g} \frac{a \sin i}{\sqrt{1-e^2}} \longrightarrow g_g = \frac{2\pi}{P} \frac{\sqrt{1-e^2}}{(R_g/a)^2} \frac{K_*}{\sin i}$$

7. Yörünge Şekli (e, ω): Örtme ile geçiş arasındaki zaman (Δt_c) ve örtme ile geçişin gerçekleştiği sürelerin oranı ($T_{örtme} / T_{geçiş}$) **dış merkezlik (e)** ve **enberinin argümanı (ω)** parametrelerinin elde edilmesini sağlar.

$$\Delta t_c = T_{örtme} - T_{geçiş} = \frac{P}{2} \left[1 + \frac{4}{\pi} e \cos \omega \right] \quad \frac{T_{örtme}}{T_{geçiş}} = \frac{1+e \sin \omega}{1-e \sin \omega}$$

Geçiş Geometrisi

Winn vd. 2010



Gezegenden Alınan Akı ve Geçiş Derinliği ($\delta_{\text{geçiş}}$)

F_* ve F_g sırasıyla yıldızdan ve gezegenden gözlemciye ulaşan akı olmak üzere, Toplam akının zamanla değişimi ($F(t)$), geçiş ve örtmeler sırasında azalır:

$$F(t) = F_* + F_g - \begin{matrix} k^2 \alpha_{\text{geçiş}} F_* & \text{geçiş} \\ 0 & \text{tutulma dışı} \\ \alpha_{\text{örtme}} F_g & \text{örtme} \end{matrix}$$

I_* ve I_g sırasıyla yıldız ve gezegenin tüm disk üzerinden akıları olmak üzere, **Normalize akı ($f(t)$)** aşağıdaki şekilde tanımlanır. Gezegenden gelen akının iki kaynağı vardır: yıldızın ışığını yansıtma ve termal emisyon.

$$k = \frac{R_g}{R_*} \quad f(t) = \frac{F(t)}{F_*} \quad \frac{F_g}{F_*} = \frac{4\pi R_g^2 I_g / d^2}{4\pi R_*^2 I_* / d^2} \Rightarrow \frac{F_g}{F_*} = k^2 \frac{I_g}{I_*}$$

Dolayısı ile normalize ışıktaki değişim: $f(t) = 1 + k^2 \frac{I_g(t)}{I_*(t)} - \begin{matrix} k^2 \alpha_{\text{geçiş}}(t) & \text{geçiş} \\ 0 & \text{tutulma dışı} \\ k^2 \frac{I_g(t)}{I_*} \alpha_{\text{örtme}}(t) & \text{örtme} \end{matrix}$

Gezegenden gelen akı (I_g) gezegenin yörünge hareketi boyunca yıldızdan yansıttığı akı evreyle değiştiği için değişkendir. Yerden yapılan gözlemlerde gezegenden gelen oldukça küçük akıyı tespit etmek çoğu zaman mümkün olmadığından bu akıyı yok saymak iyi bir yaklaşımdır. Bu durumda geçiş sırasındaki akı değişiminin derinliği $\delta_{\text{geçiş}}$, gözlenebiliyorsa örtme sırasındaki değişim derinliği $\delta_{\text{örtme}}$ ise aşağıdaki şekilde verilir.

$$\delta_{\text{geçiş}} \approx k^2 \left[1 - \frac{I_g}{I_*} \right] \xrightarrow{I_g \rightarrow 0} \delta_{\text{geçiş}} \approx k^2 \quad \delta_{\text{örtme}} \approx k^2 \frac{I_g}{I_*}$$

Geçiş Işık Eğrisinin Şekli 1 / 2

Geçiş ışık eğrilerinde normalize toplam akı $f(t)$, gezegenden gelen akı (F_g) ve yıldızdan gelen (F_*) toplam akının yıldızdan gelen akıya normalize edilmesiyle bulunur.

$$f(t) \approx \frac{F(t)}{F_*} = \frac{F_g + F_*}{F_*} \text{ ve } \frac{F_g}{F_*} \approx k^2 \frac{I_g}{I_*}$$

olmak üzere,

Geçiş Denklemi

$$f(t) = 1 + k^2 \frac{I_g}{I_*} - k^2 \alpha_{\text{geçiş}}(t)$$

Yıldızdan gelen akı
(normalizasyon
gereği $\rightarrow 1$)

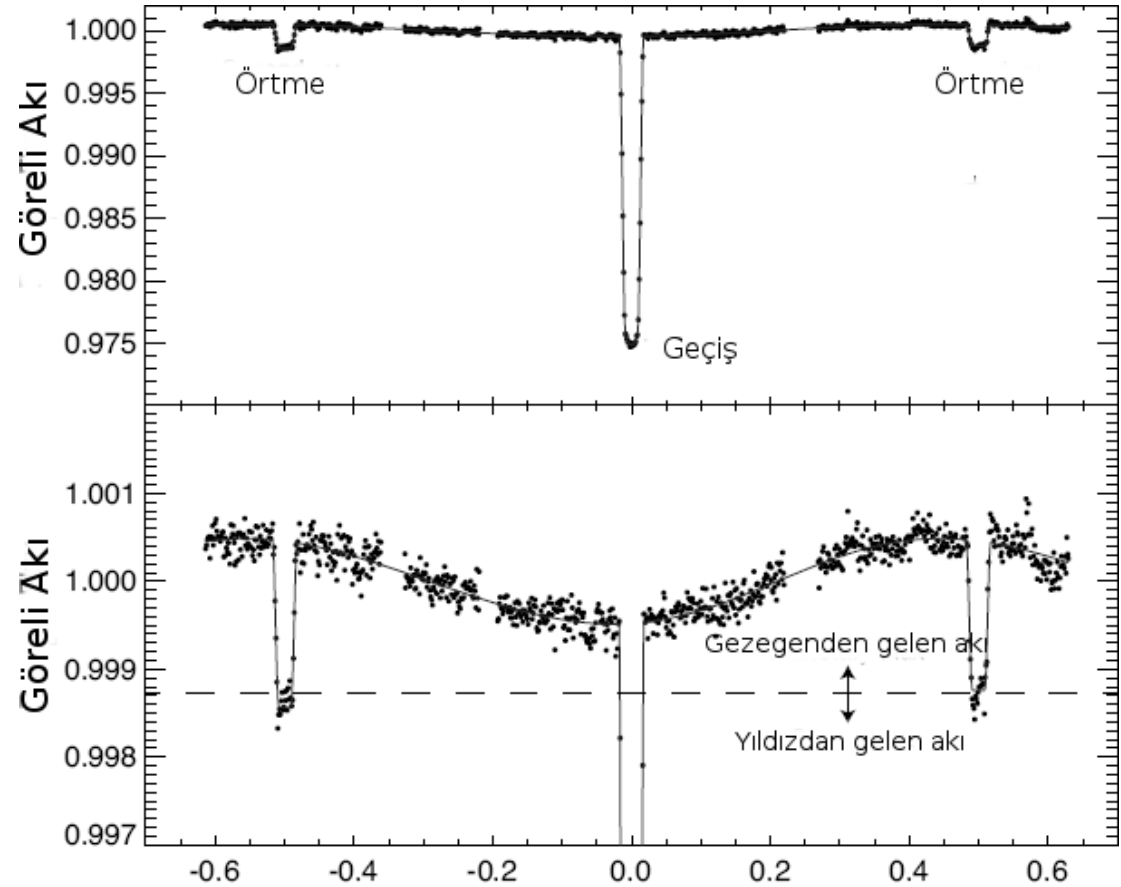
Gezegenden
Gelen (termal emisyon +
yansıma) normalize akı

Geçişin çaldığı akı
(normalize)

Örtme Denklemi

$$f(t) = 1 + k^2 \frac{I_g}{I_*} - k^2 \frac{I_g}{I_*} \alpha_{\text{örtme}}(t)$$

Madhusudhan vd. 2014



Gezegenin
Evreleri



Not: Örtme tam olarak gerçekleştiği zaman örtme parametresinin $\alpha_{\text{örtme}} = 1$ olduğuna ve gezegenden ışığın gelmediğine dikkat ediniz! Bu nedenle ışık eğrisinde örtmenin neden olduğu düşmenin maksimum olduğu yerde sadece yıldızdan gelen akı görülmektedir.

Geçiş Işık Eğrisinin Şekli 2 / 2

Geçiş sırasındaki kontrast

$$\delta_{geçiş} \simeq k^2 \left[1 - \frac{I_g(t_{geçiş})}{I_*} \right]$$

Örtme sırasındaki kontrast

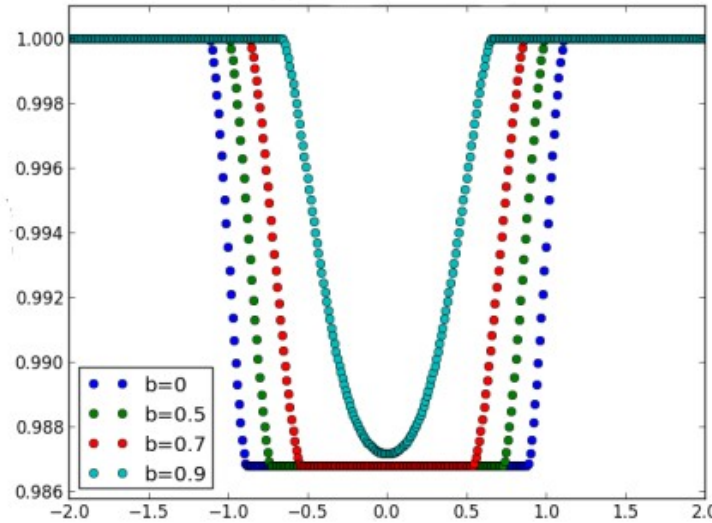
$$\delta_{örtme} \simeq k^2 \frac{I_g(t_{örtme})}{I_*}$$

Etki Parametreleri

$$b_{geçiş} = \frac{a \cos(i)}{R_*} \frac{(1-e^2)}{1+e \sin(\omega)}$$

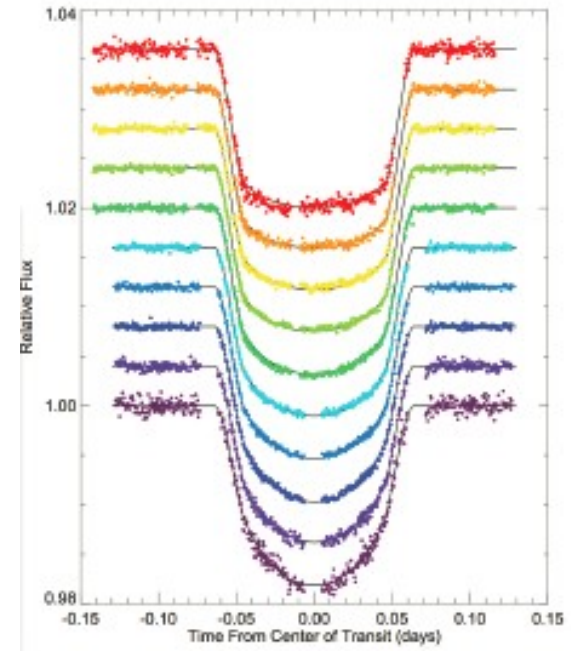
$$b_{örtme} = \frac{a \cos(i)}{R_*} \frac{(1-e^2)}{1-e \sin(\omega)}$$

Etki Parametresinin (b) Işık Eğrisine Etkisi



Knutson vd. 2007

Kenar Kararmasının Işık Eğrisine Etkisi



Knutson vd. 2007

$\alpha_{geçiş}$

Geçiş Işık Eğrisinin Şekli

Şekil Bozulması Kaynaklı Etki

Gezegen yıldızına çok yakın olduğu vakit yıldızın üzerinde kuvvetli tedirginlik etkisi kaynaklı (yıldızın gezegene yakın ve uzak tarafına uygulanan kütle çekim kuvvetleri arasındaki farkın neden olduğu etki) şekil bozulmalarına neden olabilir. Bu da ışık eğrisine yansıyabilir.

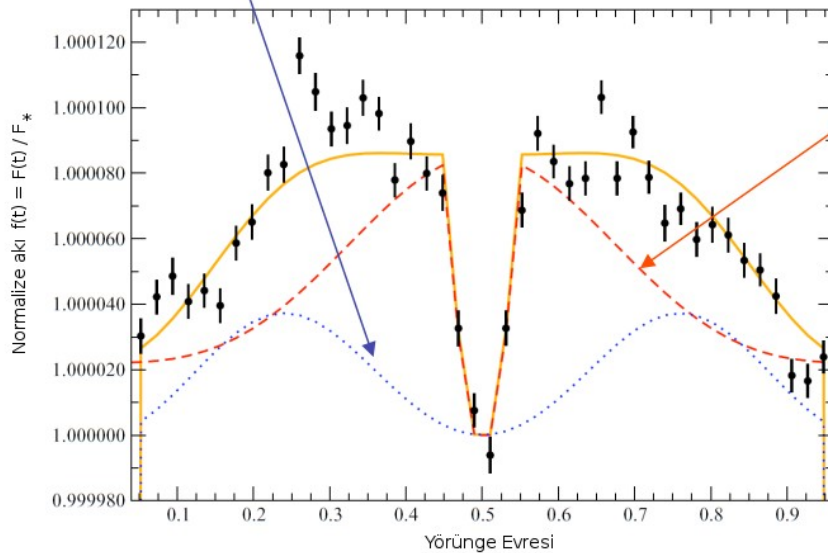
Değişim Genliği ($A_{\text{Şekil-Bozulması}}$)

$$A_{\text{Şekil-Bozulması}} = \alpha_{\text{elips}} \frac{M_g \sin(i)}{M_*} \left(\frac{R_*}{a}\right)^3 \sin i [ppm]$$

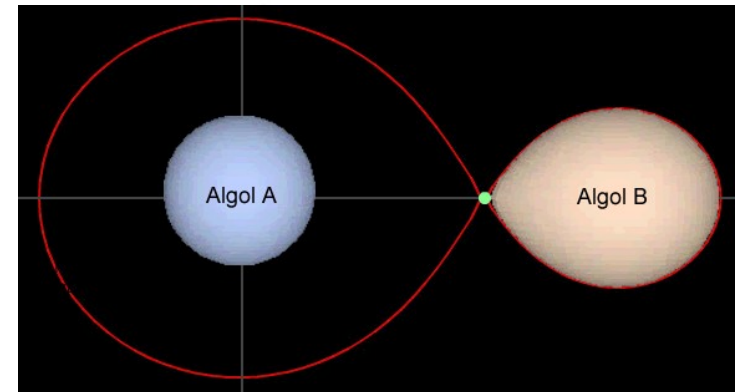
Şekil Bozulması Etkisi

$$A_{\text{Şekil bozulması}} = 13 \alpha_{\text{elips}} \sin i \left(\frac{R_*}{R_{\text{Güneş}}}\right)^3 \left(\frac{M_*}{M_{\text{Güneş}}}\right)^{-2} (P[\text{gün}])^{-2} \left(\frac{M_g \sin(i)}{M_{\text{jüp}}}\right) [ppm]$$

Evreyle Değişen
Yansıma Etkisi



Aşağıda Algol sistemi için şekil bozulması görülmektedir. Bu etkinin boyutu gezegen-yıldız sistemi için çok daha küçük olmakla birlikte örnek olarak verilen HAT-P-7 sisteminde gezegen yıldız yıldız yarıçapının sadece 4 katı uzaklıktadır.



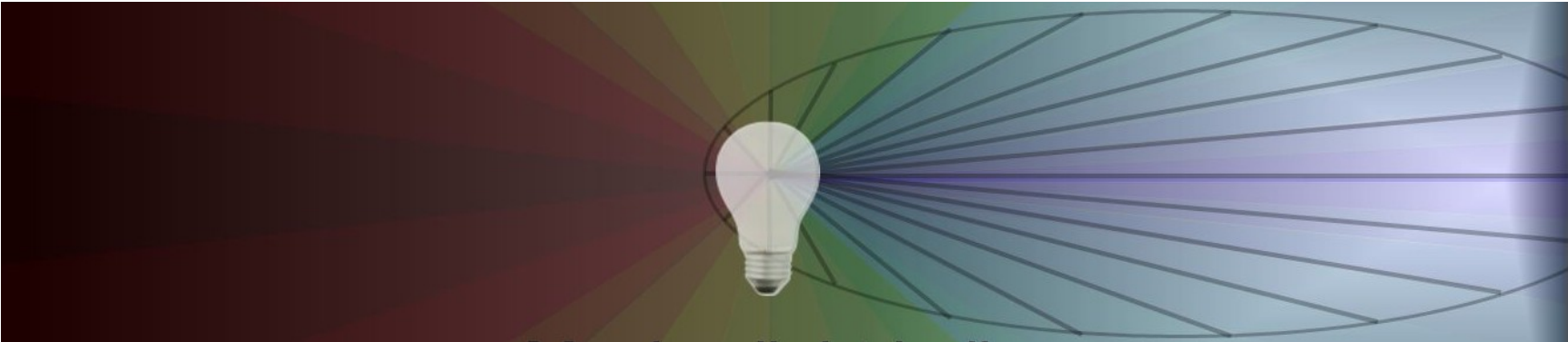
Geçiş Işık Eğrisinin Şekli

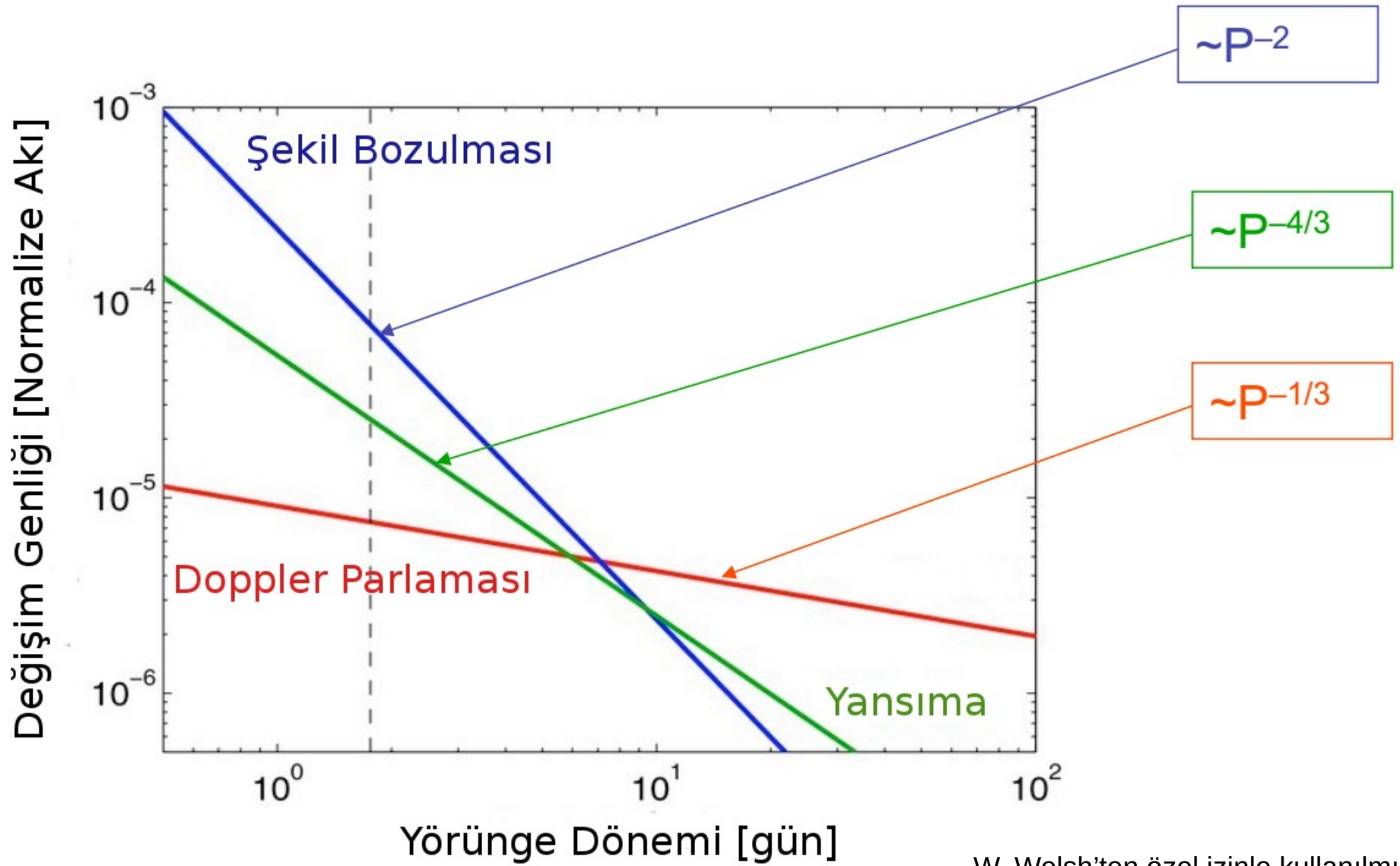
Doppler “Parlaması” (Doppler Boosting)

Yıldızın ortak kütle merkezi etrafındaki hareketi onun gözlemciye yaklaşıp uzaklaşmasına neden olur. Tamamen görelilik (rölativistik) kaynaklı bu etki fotonların yönlenmesi nedeniyle yıldızın yaklaşırken olduğundan daha parlak, uzaklaşırken daha sönük görünmesine neden olur. Değişim Genliği ($A_{\text{Doppler Parlaması}}$) aşağıdaki ifadeyle verilebilir. İfadeden (aynı zamanda şekil bozulması ifadesinden de) gezegenin kütlesinin (M_g) elde edilebileceği görülebilir.

$$A_{\text{Doppler Parlaması}} = \alpha_{\text{parlama}} 4 \frac{K_*}{c} = 2.7 \alpha_{\text{parlama}} \left(\frac{M_*}{M_{\text{Güneş}}} \right)^{-2/3} (P[\text{gün}])^{(-1/3)} \left(\frac{M_g \sin(i)}{M_{\text{jüp}}} \right) [\text{ppm}]$$

Bir ışık kaynağının hareketi gözlemci doğrultusunda hem ışığın maviye kaymasına (Doppler kayması) hem de fotonların yönlenmesi nedeniyle daha parlak görünmesine (Doppler parlaması) neden olur.



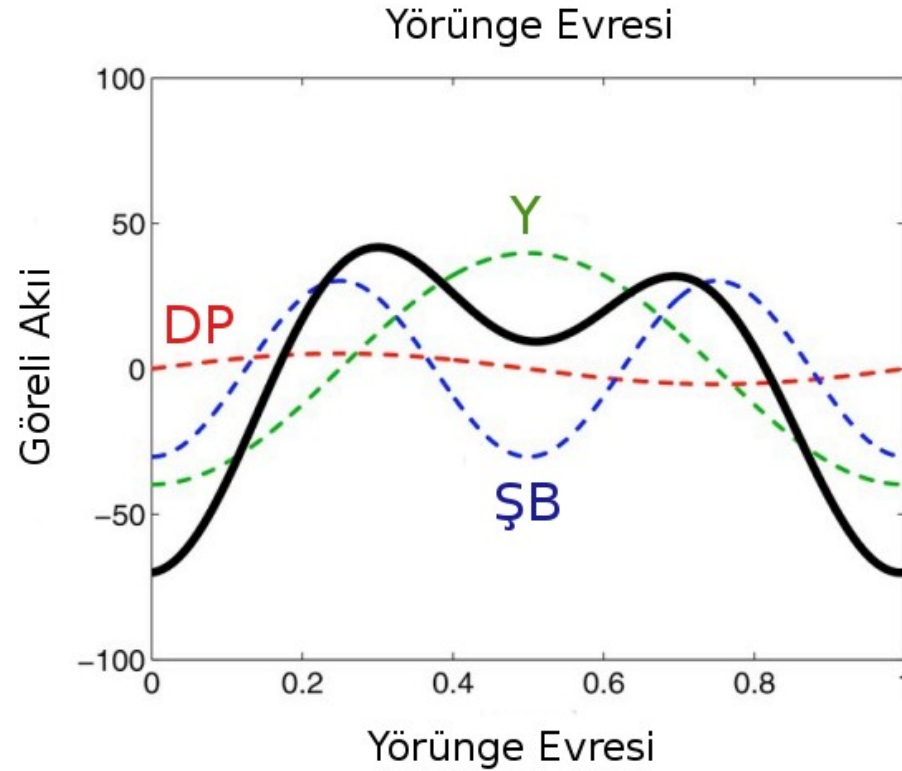
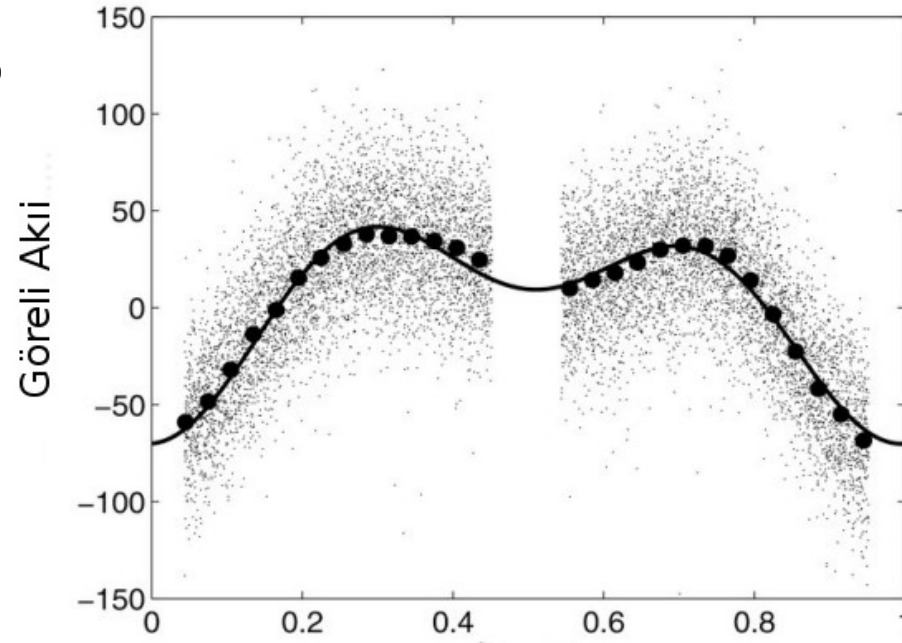


W. Welsh'ten özel izinle kullanılmıştır.

Grafikte şekil bozulması, Doppler parlaması ve yansıma etkilerinin gezegenin barınak yıldızdan uzaklığına bağlı yörünge dönemine karşılık düzeyleri ışık değişim genliği cinsinden verilmiştir. ~ 2.2 gün civarındaki dikey kesikli doğru HAT-P-7 için çizilmiştir. Görüldüğü üzere şekil bozulması ve yansıma ~ 10 güne kadar ışık eğrisini domine ederken daha büyük yörünge dönemlerinde (uzaklıklarda) Doppler parlaması daha etkili olmaktadır. Genliğin yörünge dönemine bağlılığının lineer olmadığına ancak grafiğin x-ekseninin logaritmik çizildiğine dikkat ediniz.

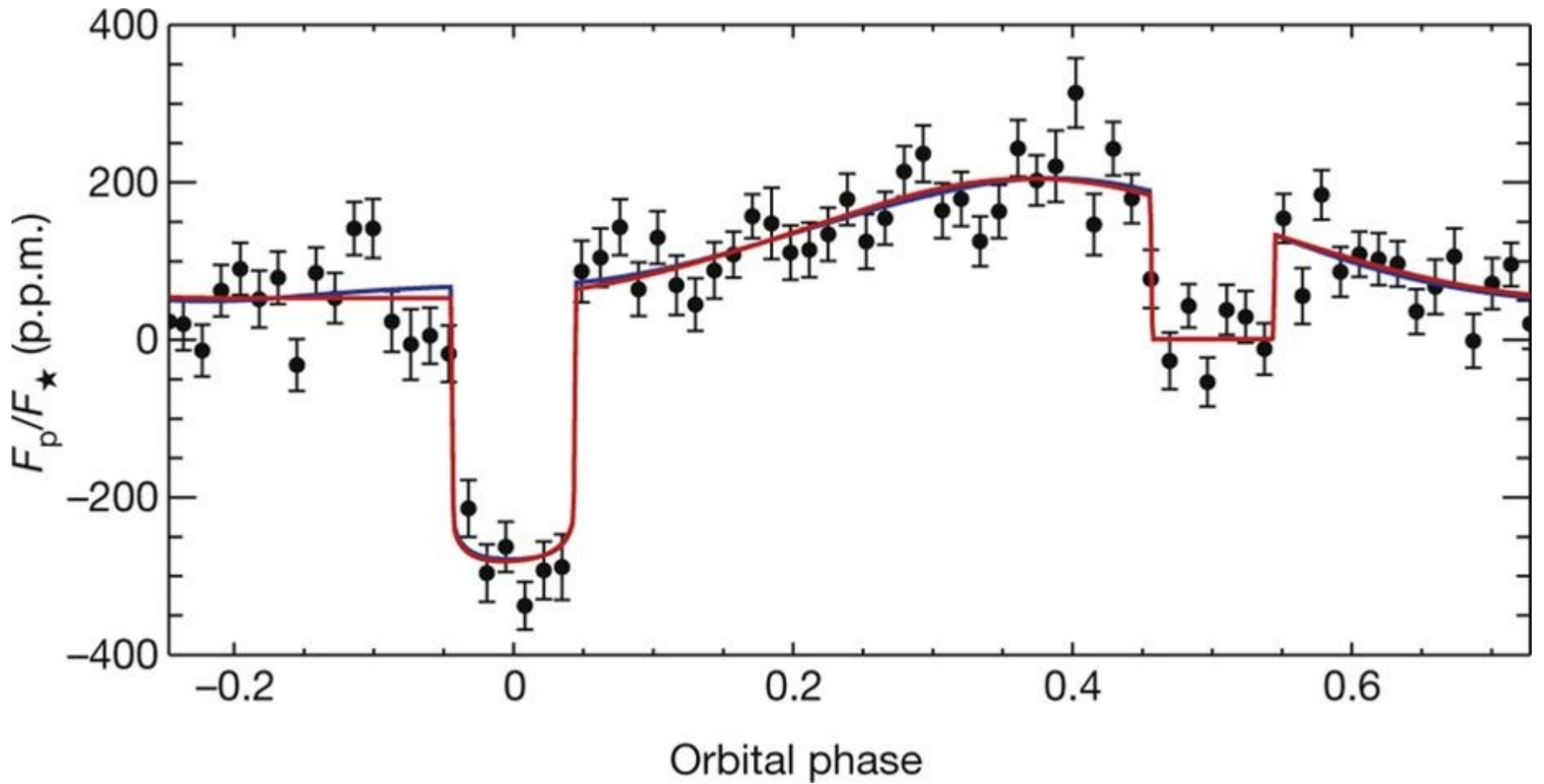
KOI 13.01

$$M_2 \sin i = 9.2 \pm 1.1 M_{\text{Jüp}}$$



KOI-13.01 sisteminde her üç etki dikkate alınmadan ışık eğrisi modellenememiştir.

Shporer vd., 2012, AJ, 142, 195



55 Cancri e Spitzer/IRAC 4.5- μ m ışık şiddetinin evreye bağlı değişimi
(Demory vd. 2016)

Geometrik – Bond Albedo

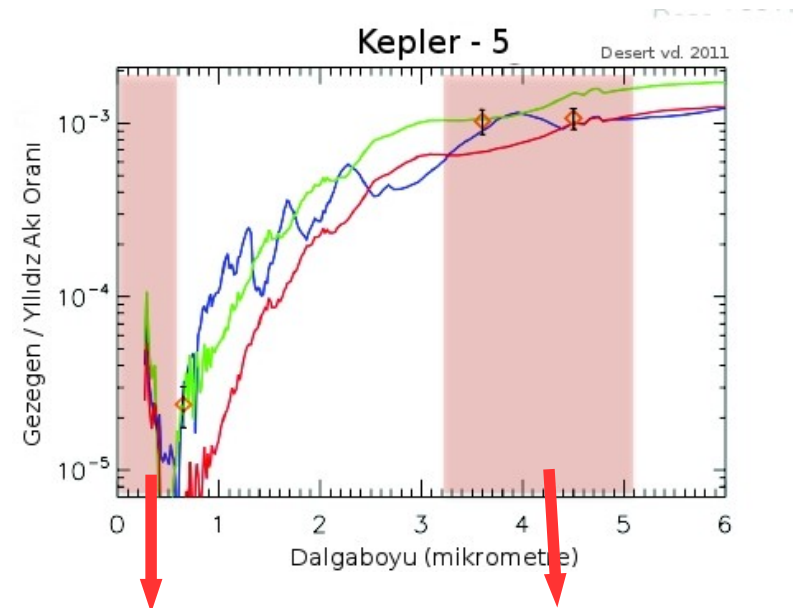
Geometrik Albedo: Bir cismin (gezegenin) ışık kaynağından (yıldızdan) (0 evre) görünen parlaklığının kendisiyle aynı çapta, üzerine düşen her fotonu aynı şekilde geri yansıtabilen, ideal, düz bir diskin (Lambert diski) parlaklığına oranı olarak tanımlanır.

Bond Albedo: Bir cismin (gezegenin) üzerinden uzaya yansıyan ışığın, ışık kaynağından (yıldızdan) gelen toplam ışığa oranı olarak tanımlanır. Geometrik albedodan farklı olarak tüm yörünge evreleri üzerinden tanımlanır. Geometrik albedo evre integrali (ing. phase integral) ile çarpılarak elde edilir. Evre açısı (α) 0° (gezegenin gece tarafı) ile 180° (gezegenin gündüz tarafı tamamen görünürken) arasında değişecek şekilde tanımlanır.

$$A_\lambda = p q_\lambda, q_\lambda = 2 \int_0^\pi \frac{I_{\alpha,\lambda}}{I_{0,\lambda}} \sin \alpha d\alpha$$

Uyarı!: Tipik bir sıcak Jüpiter yarıçapının Güneş'ininkinin 1/10'u, Güneş'in yarıçapının da sıcak Jüpiterin uzaklığının 1/10'u olduğunu varsayarsanız, $(R_g / a)^2$ terimi 10^{-4} gibi oldukça küçük bir sayıdır. Bunu bir de 1'den küçük bir rakam olan (Jüpiter için 0.34, Ay için 0.12, HD209458b için $< 0.05!$) yansıtma katsayısı (geometrik albedo) ile çarpacak olursanız örtme sırasında yansıtma kaynaklı ışık kaybını saptamanın ne kadar güç olduğunu görebilirsiniz.

Sağda, gezegen ile yıldızın akı oranlarının Kepler-5 sistemi için dalgaboyu ile değişimini görüyorsunuz. Tipik bir gezegen sisteminde görsel dalgaboyu aralığında gezegenden gelen ışığın neredeyse tamamı yansıma iken, uzun dalgaboylarına gidildiğinde gezegenin termal emisyonunun (sıcaklığı kaynaklı ışımasını) etkisi artar. (Renkli eğriler üç farklı atmosfer modelini göstermektedir.)



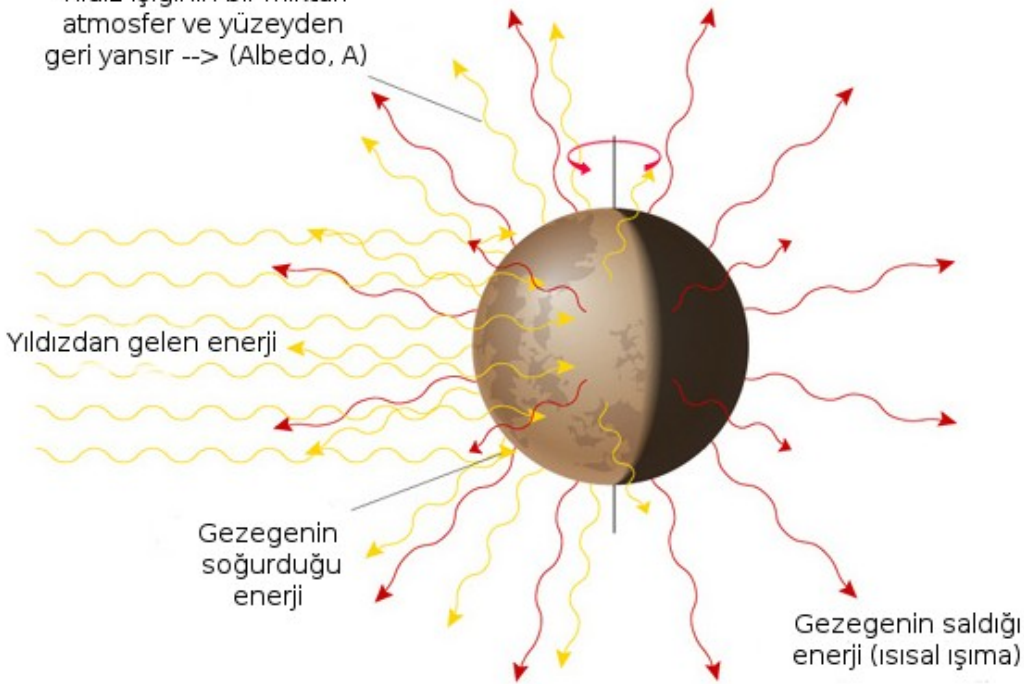
Görsel dalgaboyu aralığını yıldız domine eder, gezegenden sadece yansıma kaynaklı ışıma alınır

Kızılötede ise gezegenin termal emisyonu da etkili olmaya başlar

Denge Sıcaklığı (Equilibrium Temperature)

Temel Yaklaşım, gezegeni enerjisini sadece yıldızından alan bir “karacisim” olarak hayal etmektir. Bu yaklaşımla hesaplanan sıcaklığına **Denge Sıcaklığı** adı verilir. Denge sıcaklığı hesaplanırken gezegenin atmosferi (dolayısıyla sera etkisi) ve kendi ışınlamı da yok sayılır.

Yıldız ışığının bir miktarı atmosfer ve yüzeyden geri yansır --> (Albedo, A)



Gezegenin birim alan başına soğurduğu toplam enerji:

$$(1 - A) L_* / (4 \pi d^2) \quad (A: \text{albedo}, d: \text{gezegen-yıldız uzaklığı})$$

Yıldıza bakan yüzeyinde (πR_g^2) soğurduğu toplam enerji:

$$\pi R_g^2 (1 - A) L_* / (4 \pi d^2) \quad (L_*: \text{yıldızın ışınlam gücü})$$

Denge koşulu: Gelen Enerji = Harcanan Enerji

Gezegenin birim alanından salınan ısısal enerji:

$$\epsilon \sigma T^4, \epsilon: \text{salma gücü}, \text{Tüm yüzeyinden: } 4 \pi R_g^2 \epsilon \sigma T^4$$

Gezegenin yüzeyinde soğrulan toplam enerji (sadece yıldıza bakan yönde) = Gezegen tarafından salınan ısısal enerji (her yönde) :

$$\pi R_g^2 (1 - A) L_* / (4 \pi d^2) = 4 \pi R_g^2 \epsilon \sigma T^4$$

$$T_{denge} = \left(\frac{(1-A)L_*}{16 \pi \epsilon \sigma d^2} \right)^{1/4} = \left(\frac{(1-A)4 \pi R_*^2 \sigma T_*^4}{16 \pi \epsilon \sigma d^2} \right)^{1/4} \rightarrow T_{denge} = \left(\frac{1-A}{\epsilon} \right)^{1/4} T_* \sqrt{\frac{R_*}{2d}} \quad \epsilon \sim 1$$

Gezegen Geçişleri ve Yörünge Eğimleri

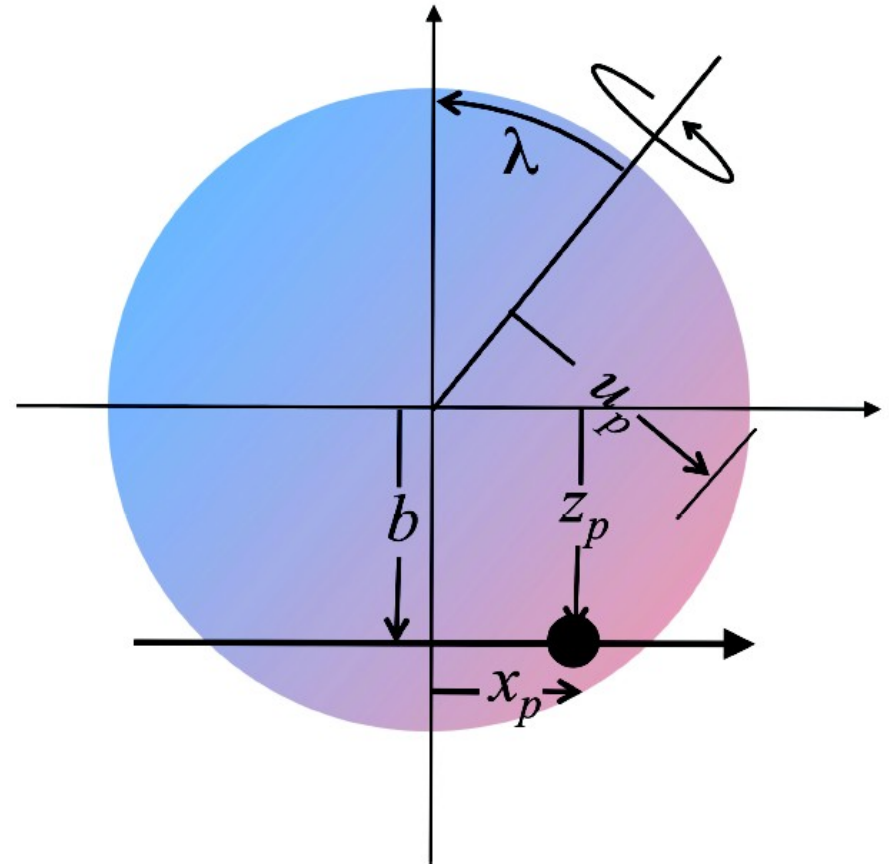
sıcak-Jüpiterler ($M_p > 0.3 M_{jüp}$, $P_{yör.} < 10^{gün}$)

1. “buz çizgisinin” ötesinde oluşmalı
2. Peki bulundukları yere nasıl geldiler?
 - Öngezegen diskleri içinde içe doğru düzenli göç (Goldreich ve Tremaine 1980),
 - Dıştaki bir cismin etkisiyle içeri göç (Kozai-Lidov mekanizması)
 - Gezegen-gezegen etkileşimleri (Fabricky ve Tremaine 2007, Dawson ve Murray-Clay 2013),
- Gezegen-yıldız, Gezegen-gezegen arası tedirginlik kuvvetleri (Albrecht vd. 2012),
- Muhtemelen tüm bu mekanizmaların bir bileşkesi

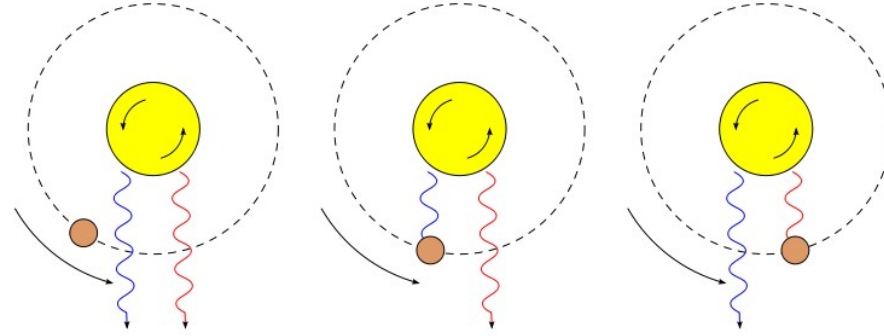
Mevcut bu senaryolar sonuçta oluşan gezegen popülasyon karakteristikleri üzerine farklı öngörülere sahiptirler. Gezegenin yörüngesi ile yıldızın dönme eksenini arasındaki açı (Ψ) bu parametrelerden en önemlisidir. Dolaysı ile bu açıyı (ya da gökyüzündeki izdüşümünü, λ) belirlemek, gezegen oluşum senaryolarının testi açısından önem taşır (Mancini ve Southworth (2016)).

Bu açıyı gezegen geçişleri sırasında

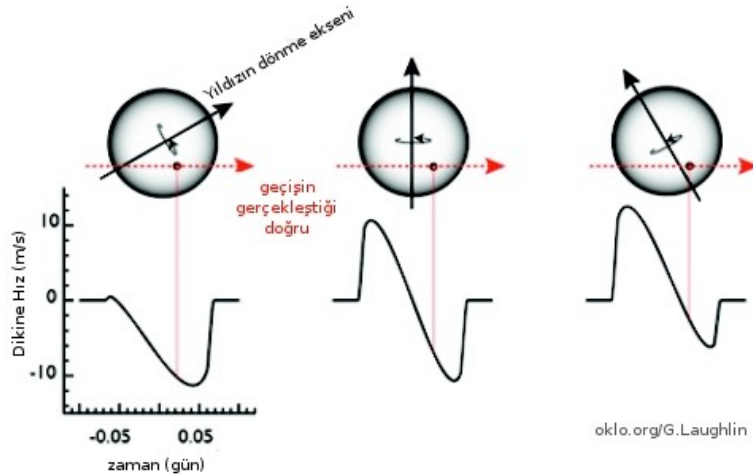
- 1) Rossiter-McLaughlin etkisi gözlemleri,
- 2) Doppler tomografi (Ψ)
- 3) Yüzey parlaklık dağılımı düzensizliklerinin gözlemleri ile belirlemek mümkündür.



Rossiter – McLaughlin Etkisi



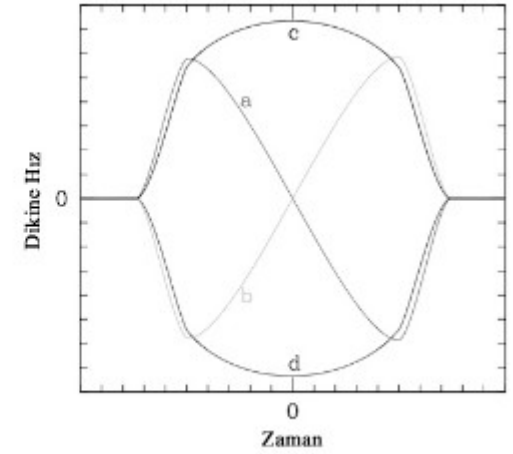
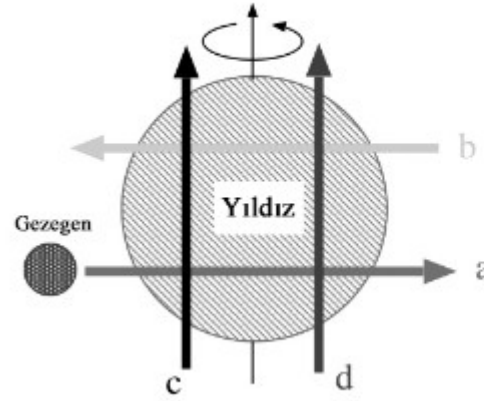
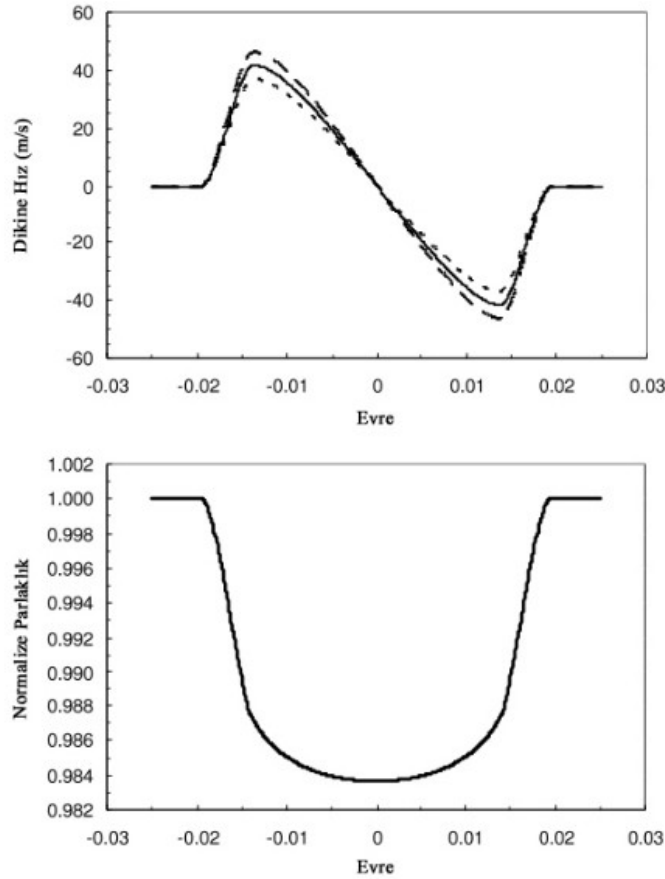
Gözlemcinin şekle alttan baktığı düşünülmelidir. Kendi etrafında saatin ters yönünde dönen yıldızın gözlemciye yaklaşan tarafının katkıda bulunduğu soğurma çizgileri maviye kayarken, uzaklaşan tarafın katkıda bulunduğu çizgiler ise maviye kayar. Yıldız gözlemlerinde disk çözünürlüğüne sahip olmadığımız için toplamda gözlenen yıldızın dönmesi nedeniyle genişlemiş bir çizgidir. Ancak gözlemciye yıldızın arasından geçen gezegen (örneğimizde o da saatin ters yönünde dolandığı için önce) katkıda bulunduğu çizgilerin maviye kaydığı gözlemciye yaklaşan tarafı, sonra da uzaklaşan tarafı kapatır ve bu nedenle bu süreçlerde yıldız diskinin o bölgelerinden gelen ışığı engeller. Sonuç olarak, çizgilerin maviye kaydığı gözlemciye yaklaşan taraf gezegen tarafından kapatıldığında kırmızıya kayma; kırmızıya kaydığı gözlemciden uzaklaşan taraftan gelen ışık gezegen tarafından bloke edildiğinde ise maviye kayma baskın hale gelir. Bu nedenle gezegenin yıldız önünden geçişi sırasında ilave bir dikine hız değişimi gözlenir. Dikine hızda gözlenen bu anomaliye “Rossiter-McLaughlin” etkisi adı verilir.



Rossiter-McLaughlin etkisinin şekli ve boyutu yıldızın dönme eksenini ile gezegenin yörünge düzlemi arasındaki açıyla doğrudan ilişkili olduğu için (solda), bu açının saptanmasına olanak sağlar. Bu başlı başına çok önemli bir bilgidir. Zira merkezi yığılma teorisi bu açının 90° 'ye yakın olduğunu öngörür. Oysa özellikle son yıllarda gözlenen pek çok sistemde durum böyle değildir!

$$\Delta V_{RM} \approx k^2 \sqrt{1-b^2} v_* \sin i_*$$

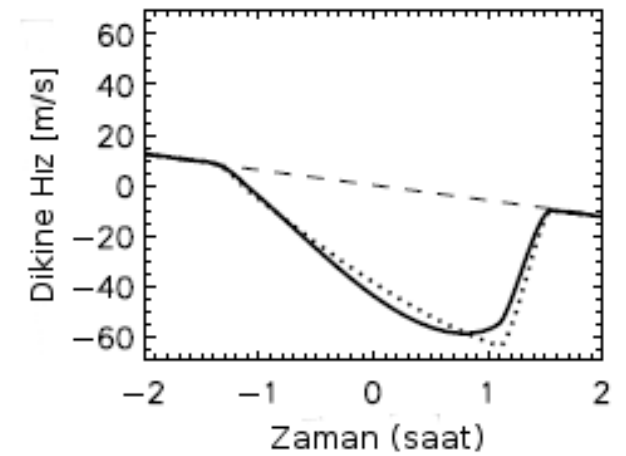
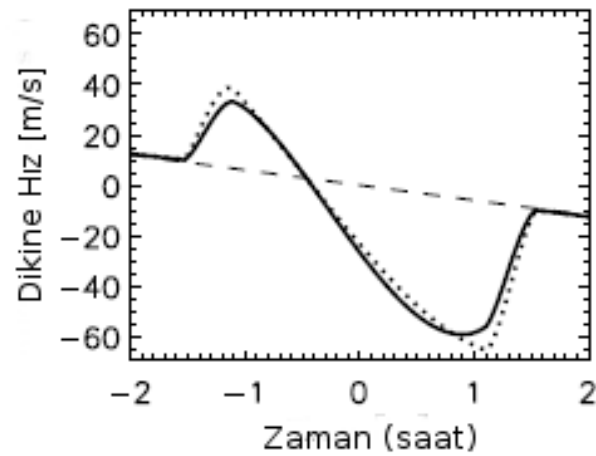
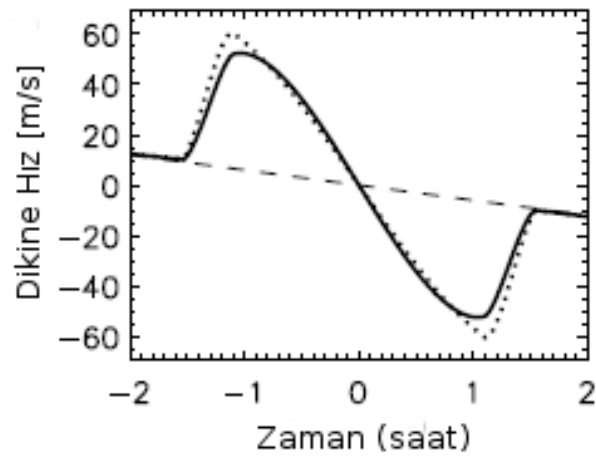
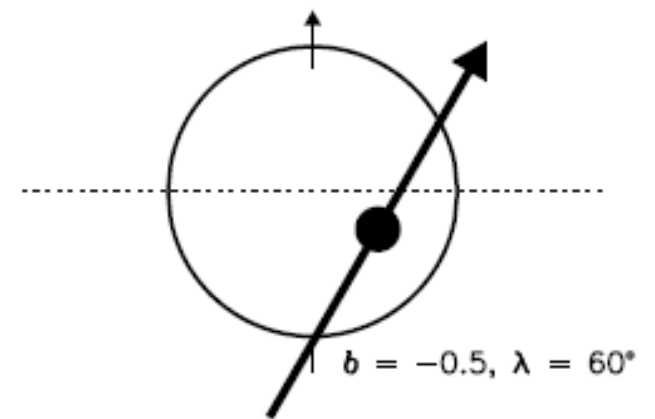
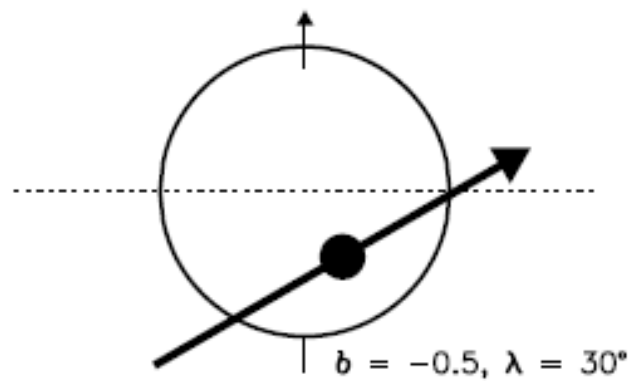
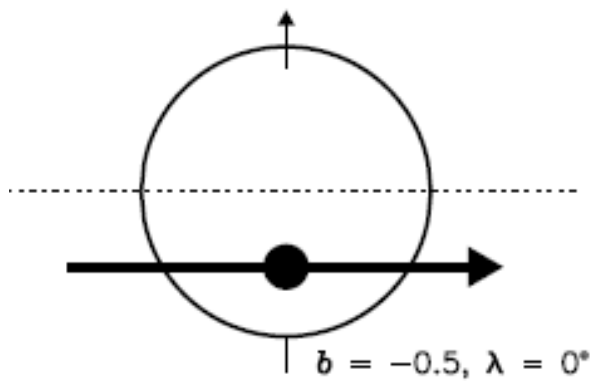
Rossiter – McLaughlin Etkisi



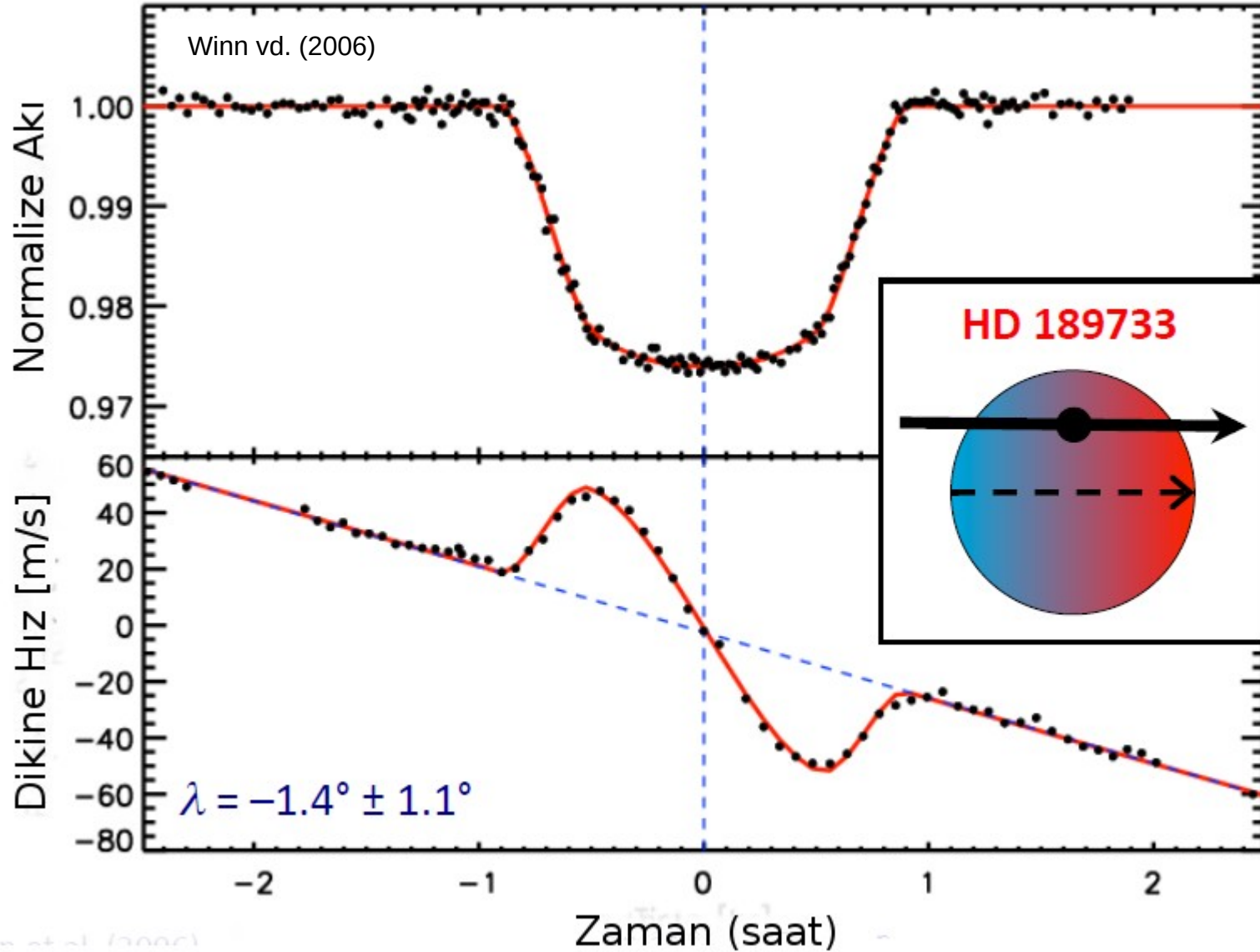
Yıldızın dönme eksenini ile bileşeninin yörünge düzlemi arasındaki çeşitli açılar için dikine hız değişimi (Ohta vd. 2005)

Yukarıda geçiş sırasındaki dikine hız değişimi, aşağıda ise eş zamanlı parlaklık değişimi görülmektedir. Yıldızın dönme hızının dikine hız değişiminin genliği üzerindeki etkisini göstermek üzere 4.5, 5 ve 4 km/s'lik dönme hızlarındaki dikine hızlar sırasıyla kesiksiz, noktalı ve kesikli eğrilerle verilmiştir. Her iki değişim yıldızın dönme dönemine evrelendirilmiştir. (Gimenez vd. 2006)

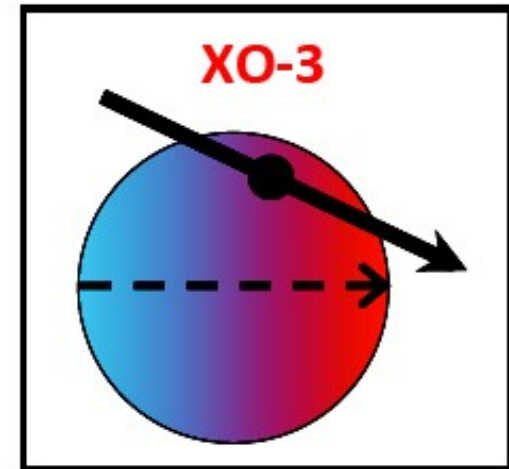
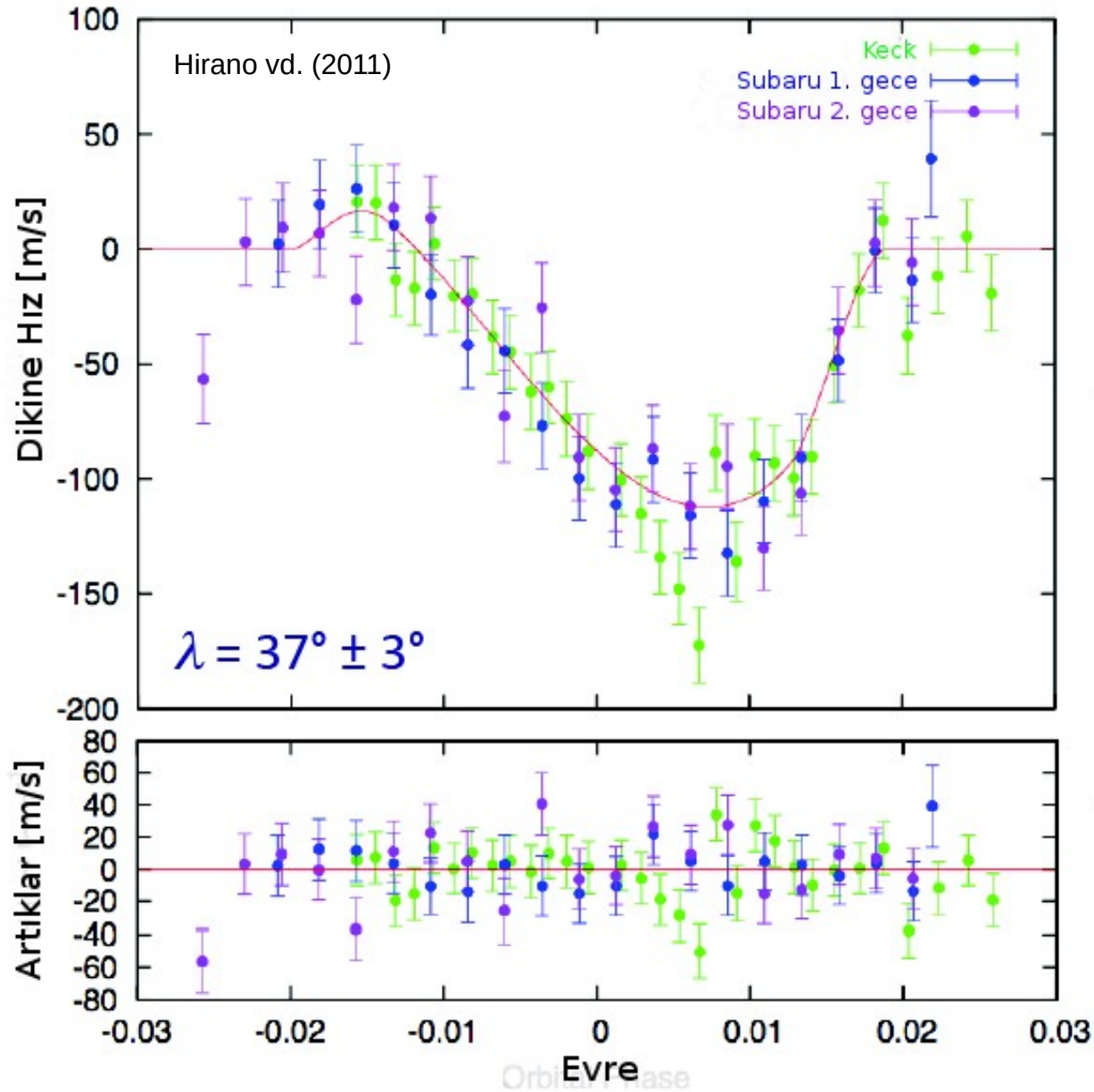
Rossiter – McLaughlin Etkisi



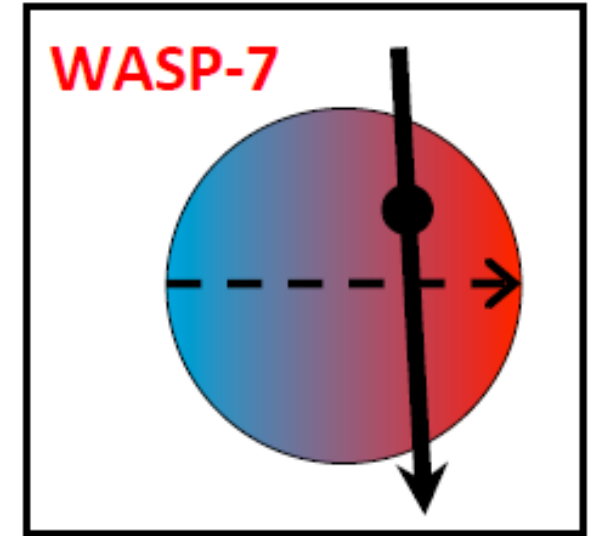
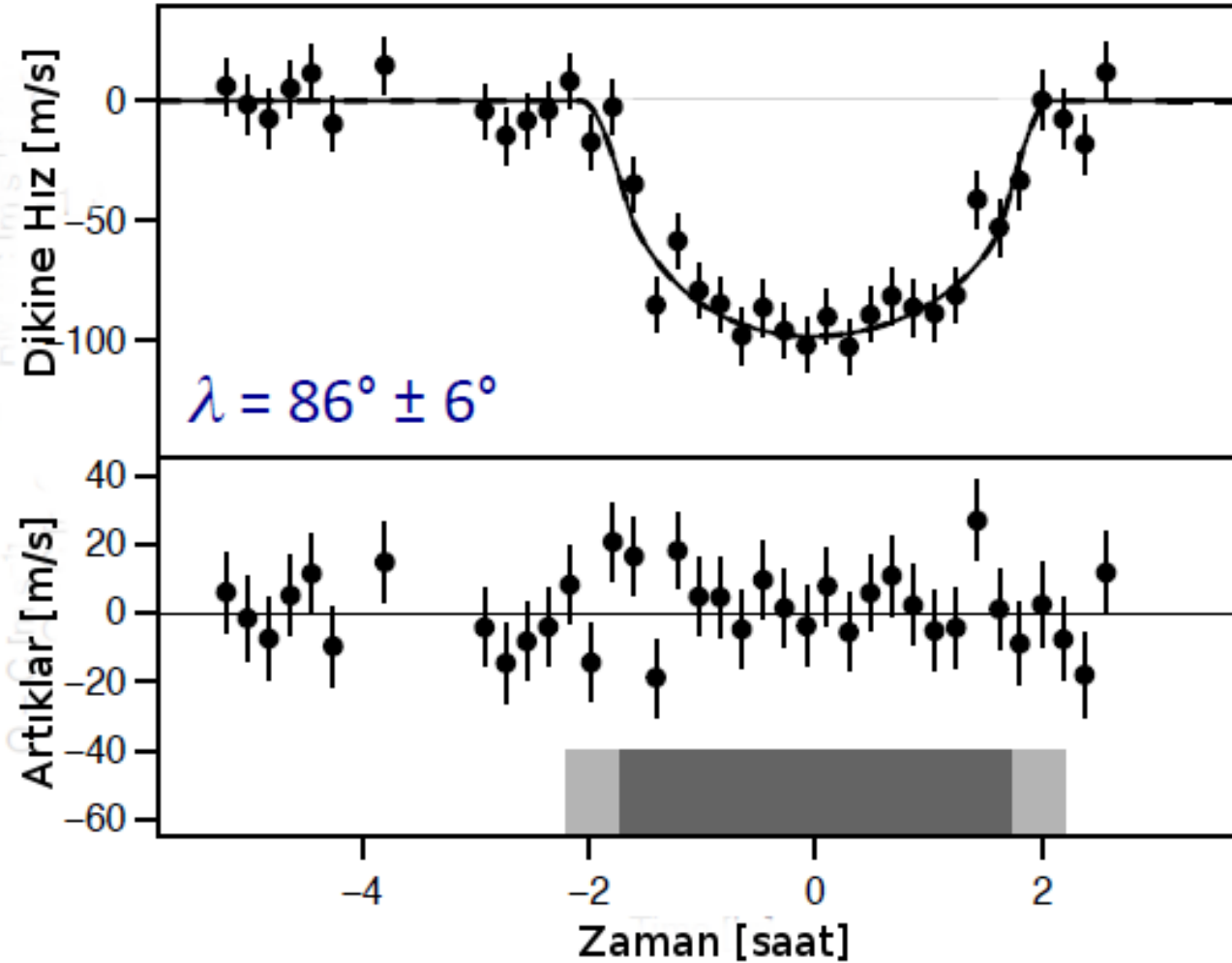
Yıldızın Dönme Eksenini Hızlı Yörünge



Yıldızın Dönme Eksenine Eğik Yörünge

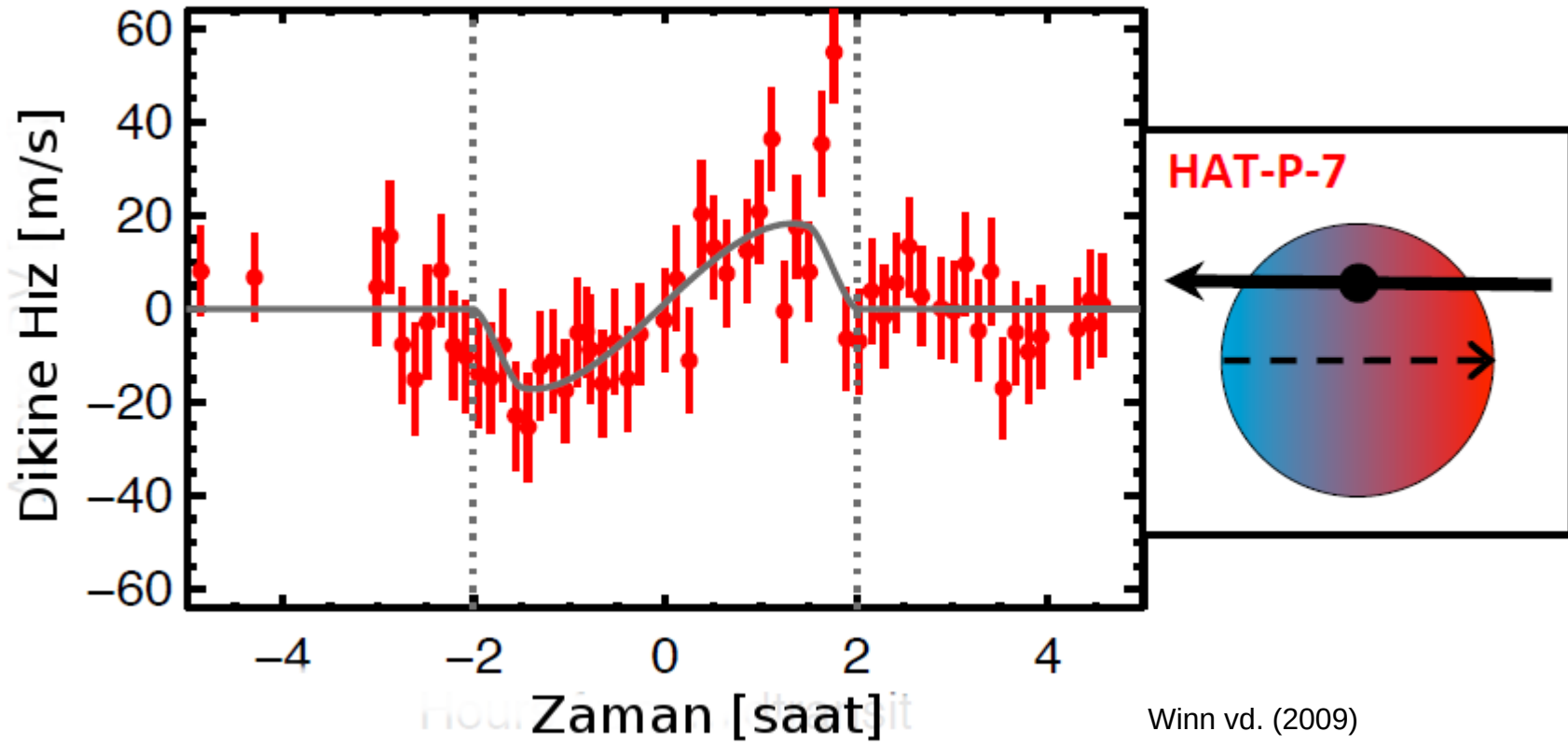


Yıldızın Dönme Eksenine Dik Yörünge



Albrecht vd. (2011)

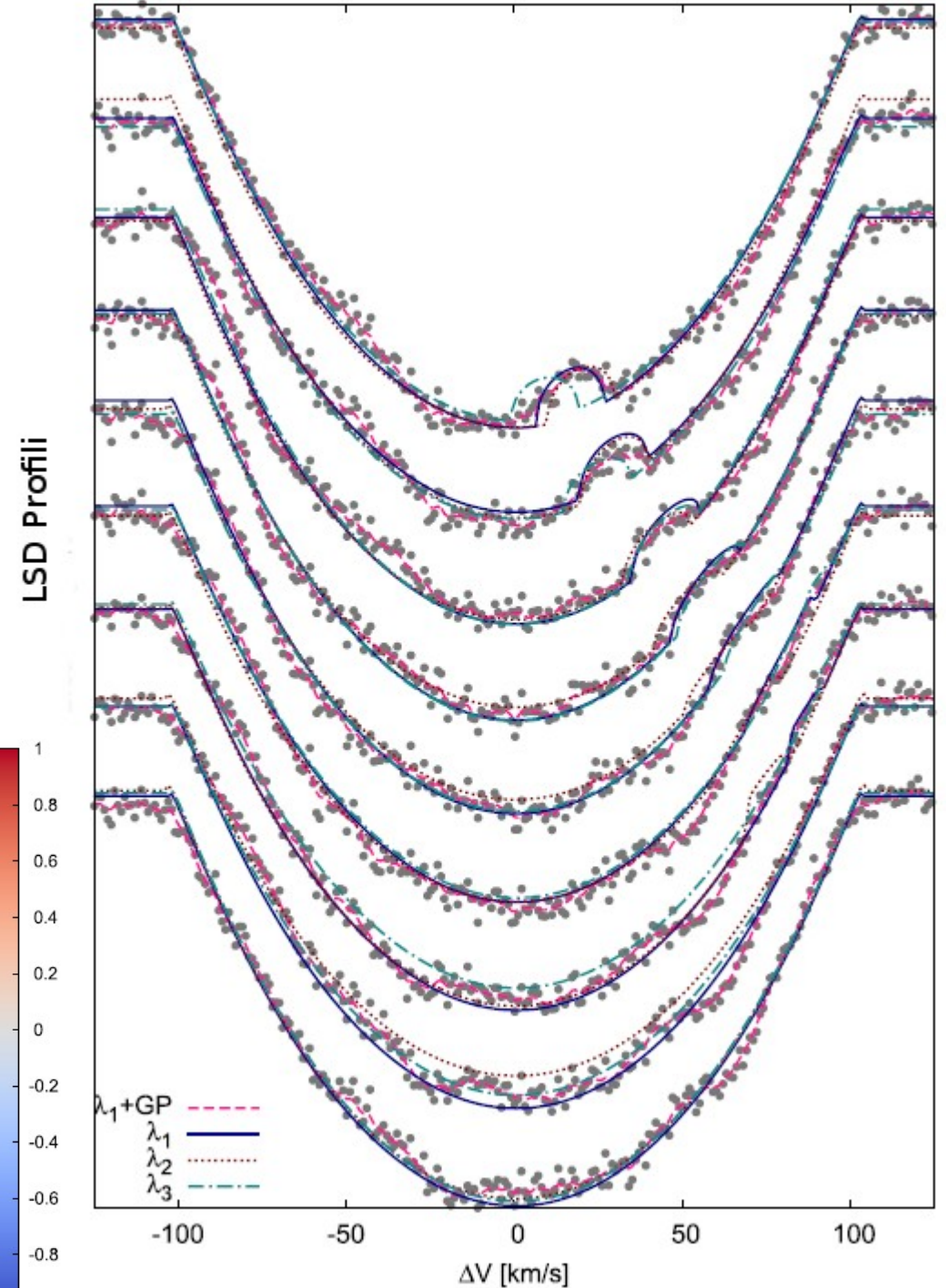
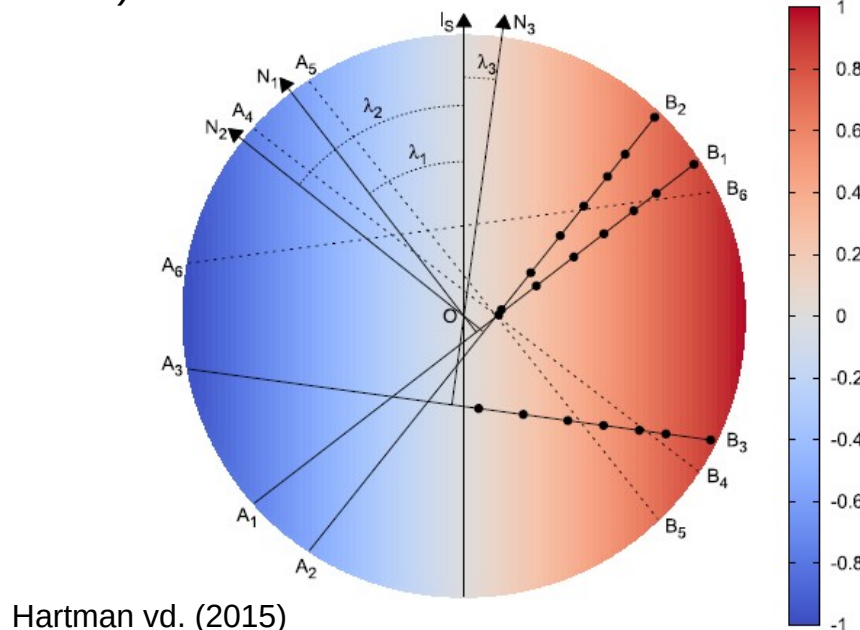
Retrograd Yörünge

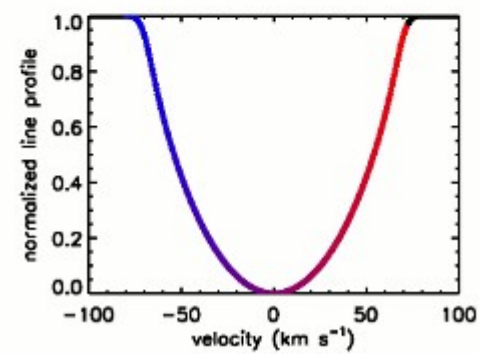
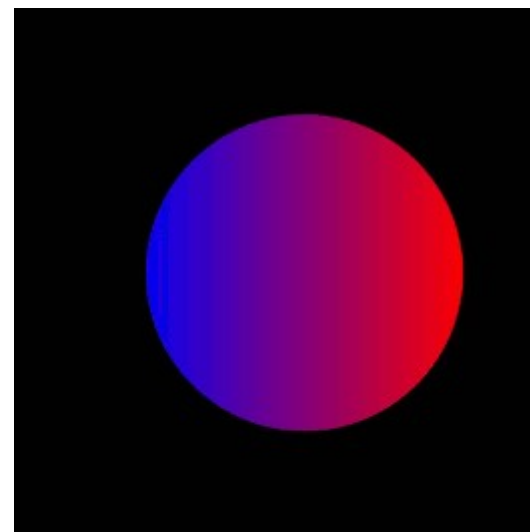
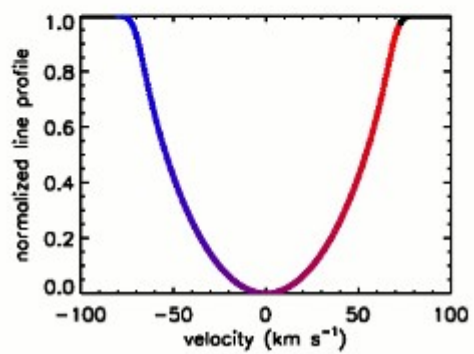
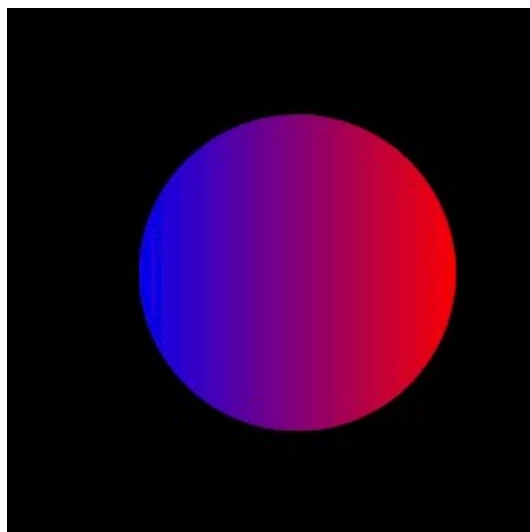
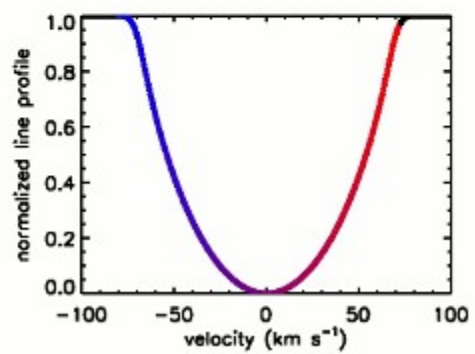
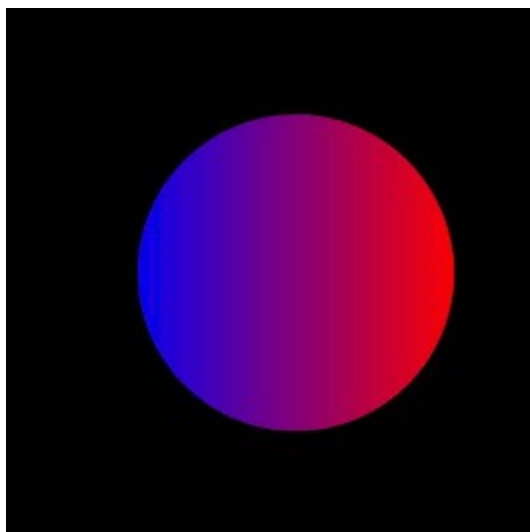


Doppler Tomografi

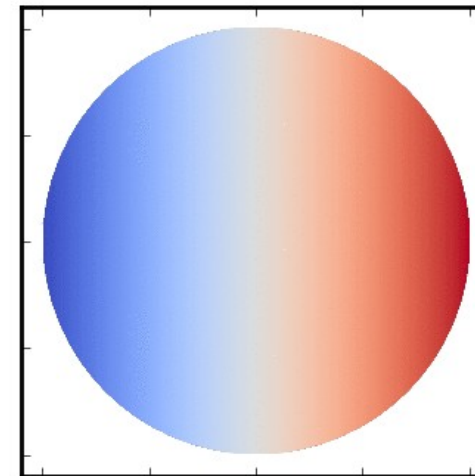
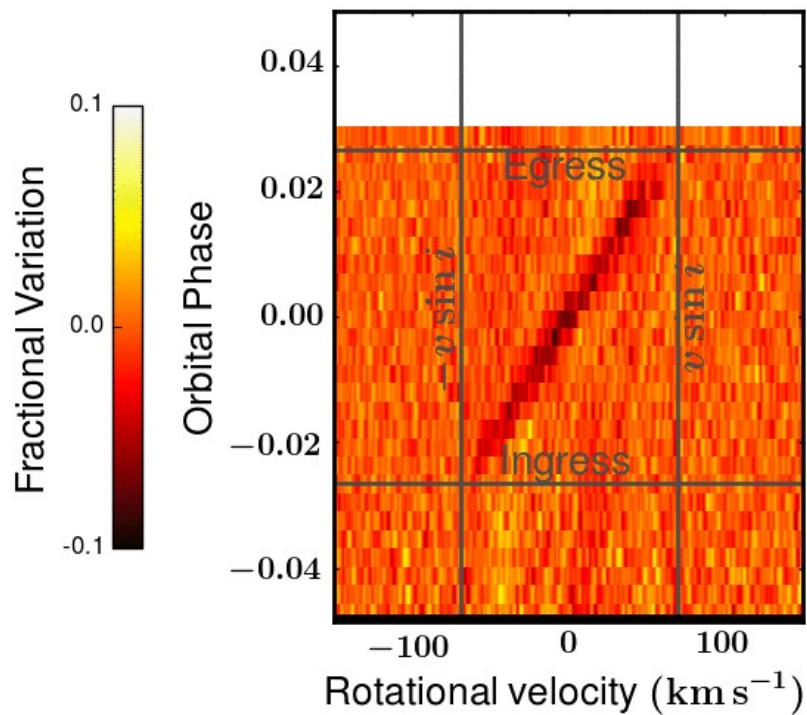
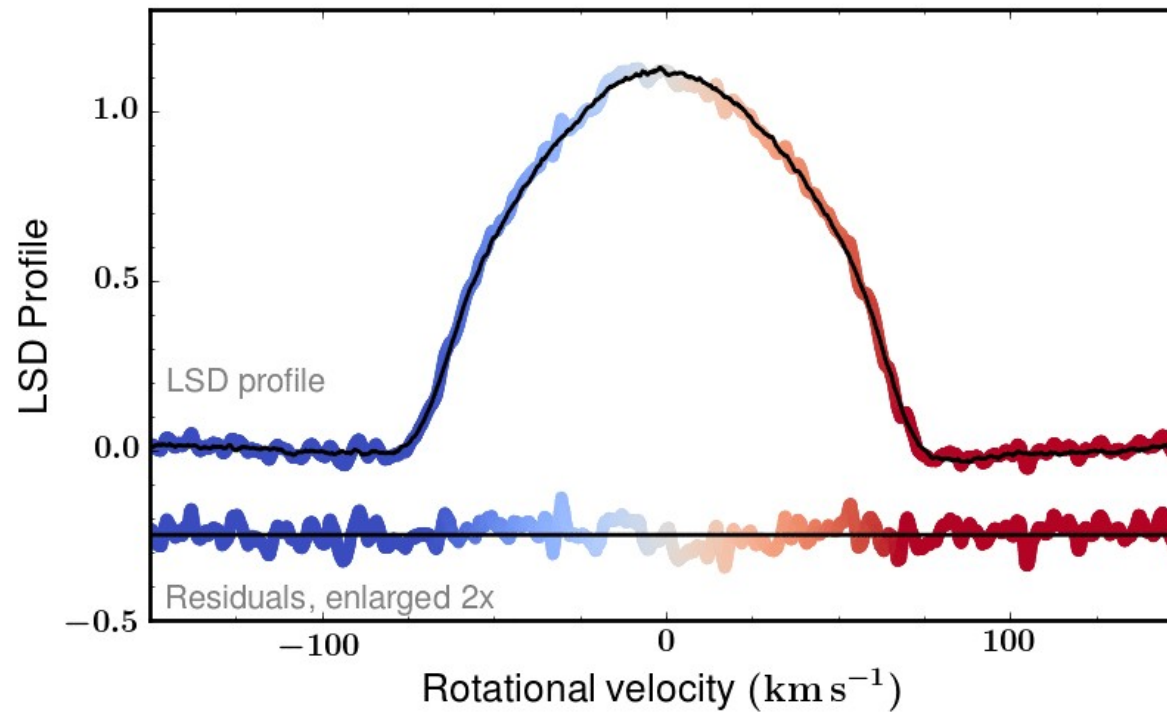
LSD (En Küçük Kareler Tersevrışim) yöntemiyle gezegenin neden olduğu profil bozulmasının doğrudan belirlenmesine dayanır. Yöntemin güçlüğü gezegen geçişi sırasında çok sayıda yüksek tayfsal çözünürlüklü tayfının alınmasının gerekliliğinden gelir.

Buna karşın bazı geçiş yapan gezegenler için gezegenin yörünge eğimi ile yıldızın dönme eksenindeki açı (Ψ) belirlenebilmiştir (HD 15082b: Collier-Cameron vd. 2010; KOI-12b: Bourrier vd. 2015; HAT-P-57b: Hartmann vd. 2015; KELT-17b: Zhou vd. 2016)



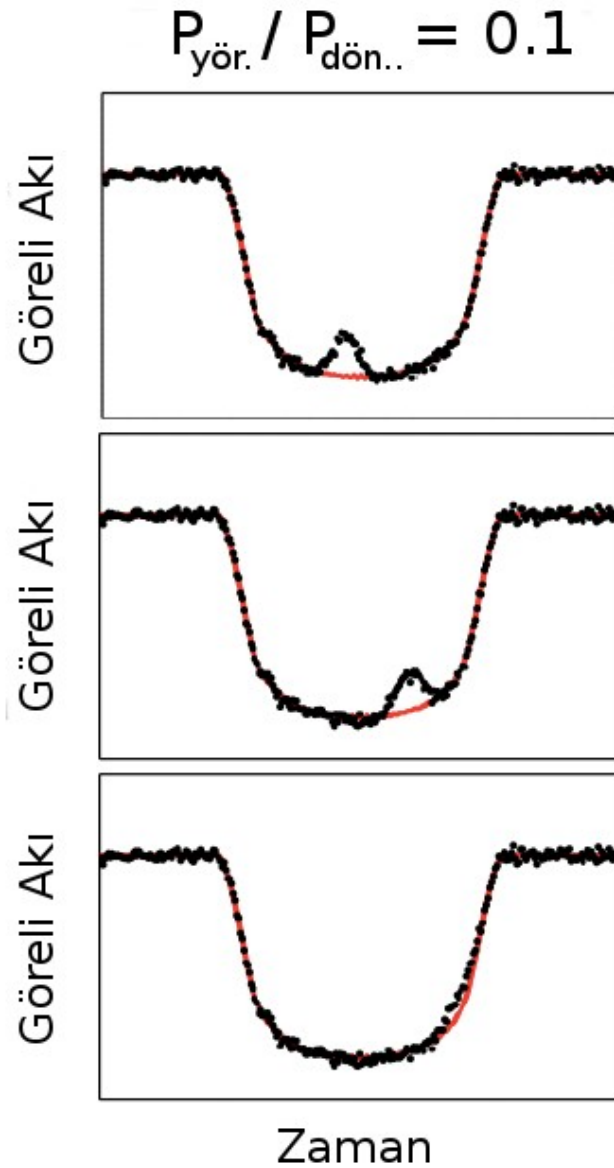
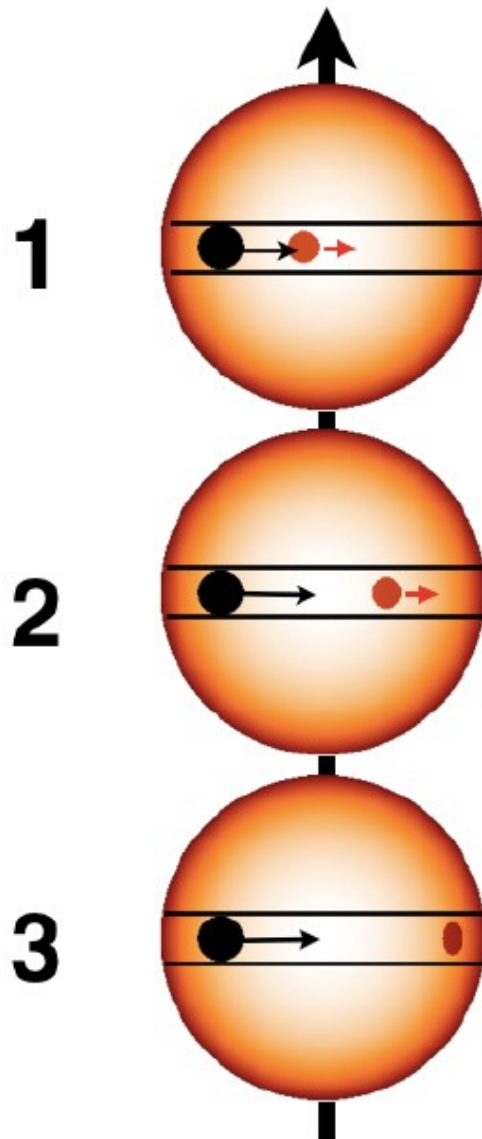


KELT-7b

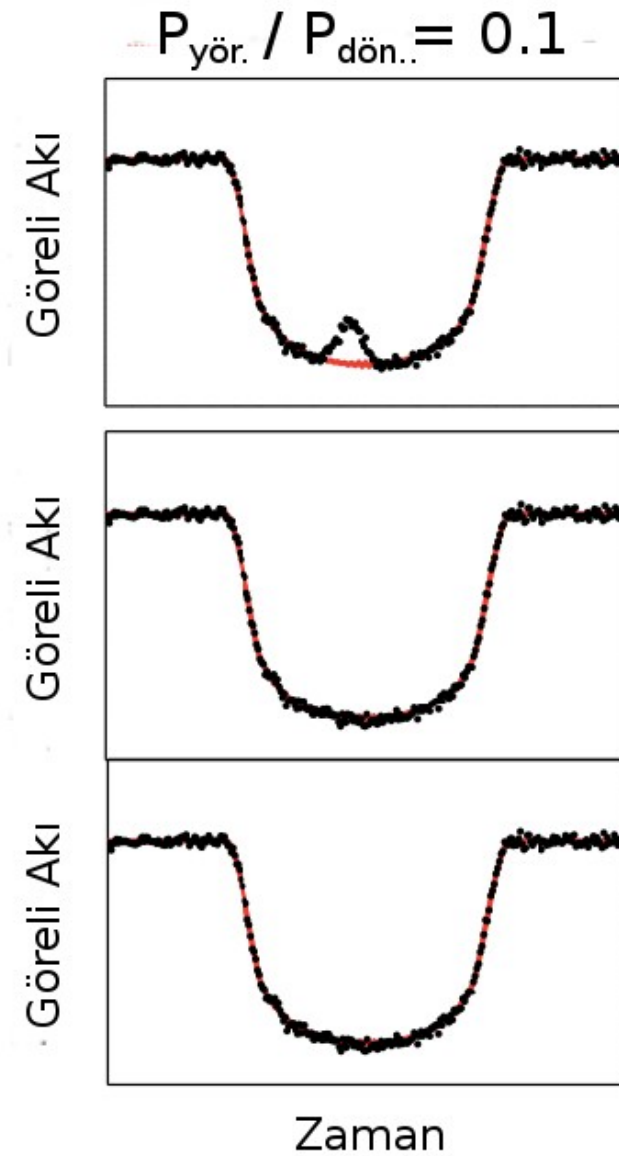
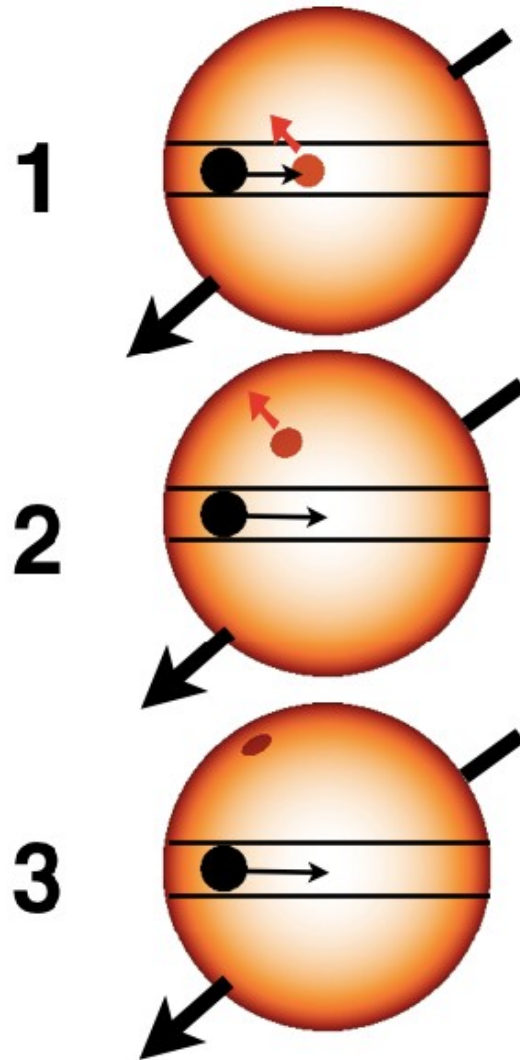


Marshall Johnson'dan özel izinle alınmıştır.
<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~johnson.7240/#research>

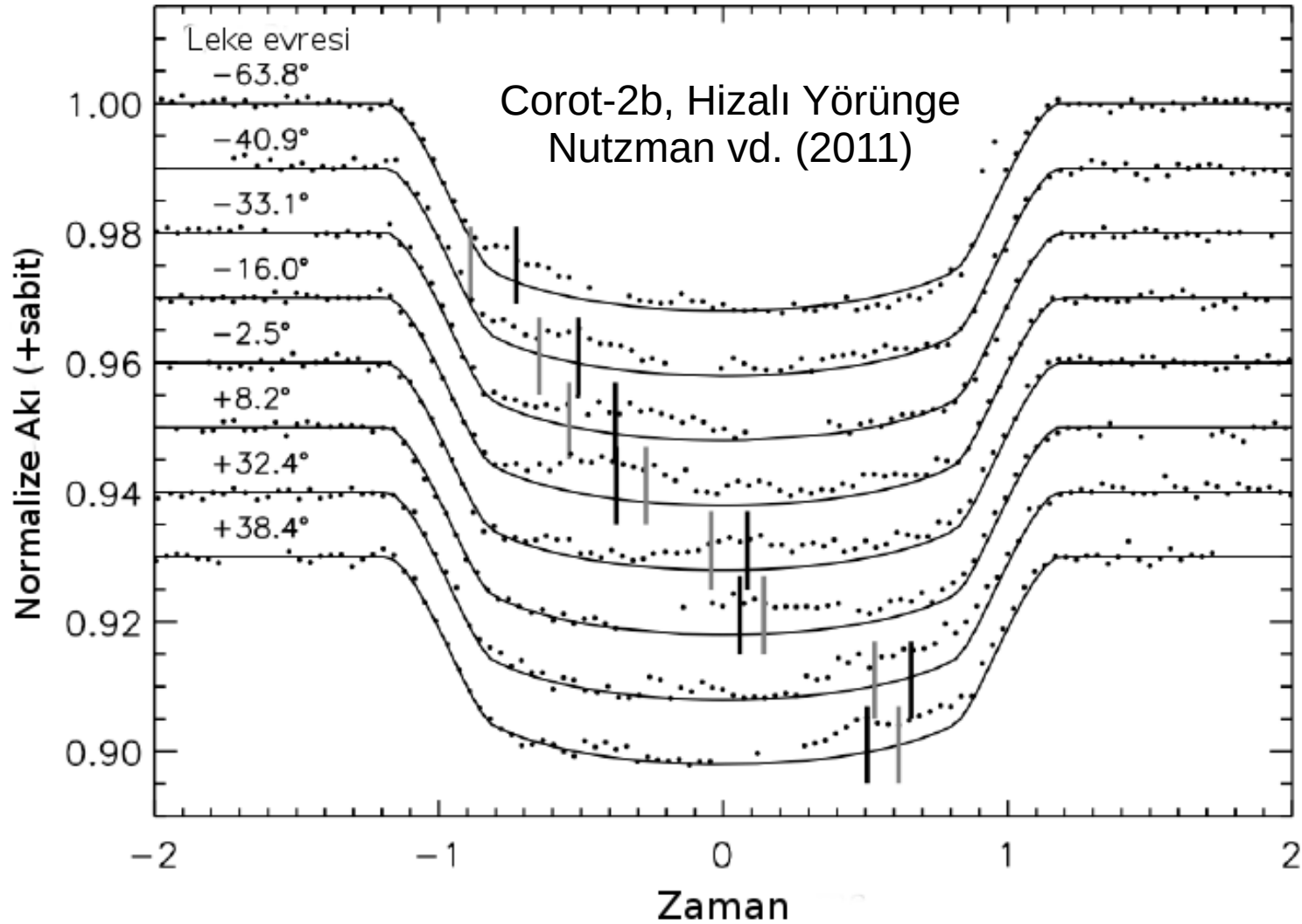
Gezegen Geçişlerinde Leke Bölgesi Gözlemleri - I



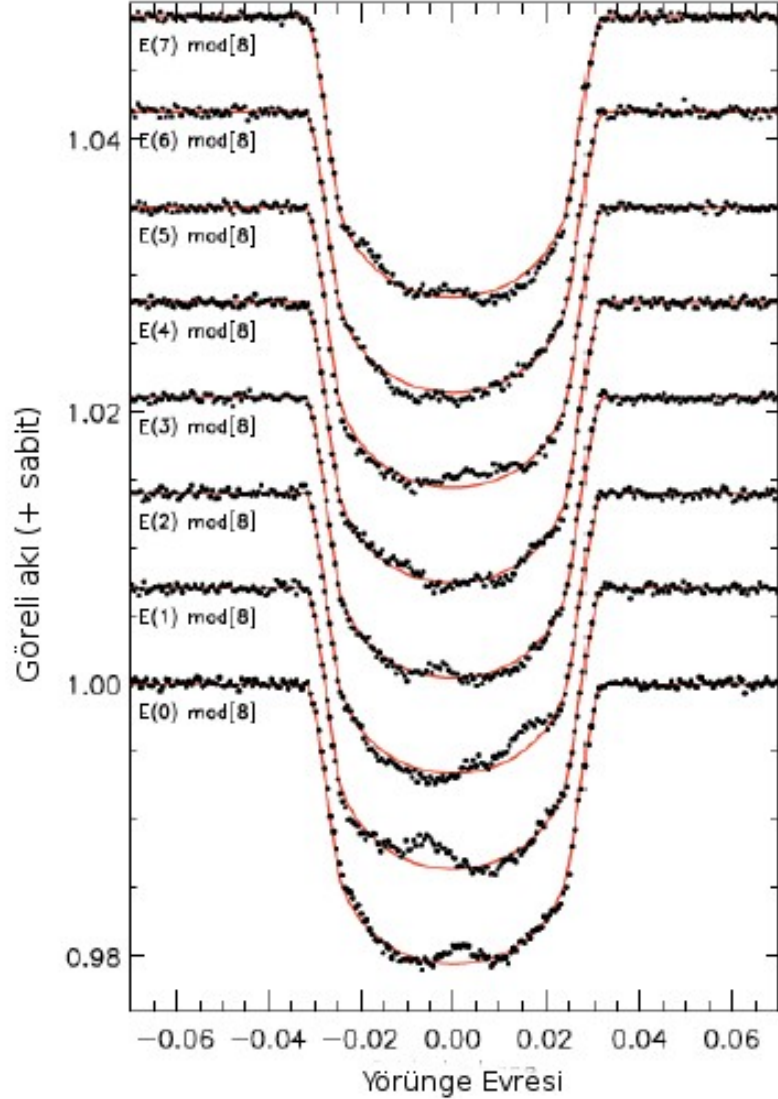
Gezegen Geçişlerinde Leke Bölgesi Gözlemleri - II



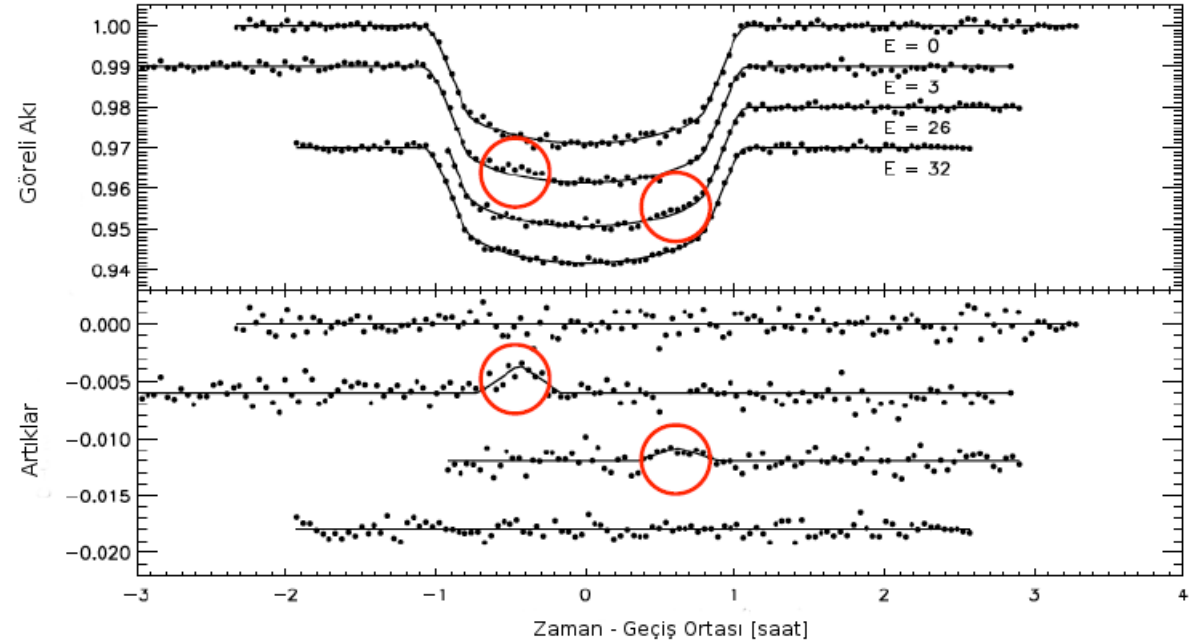
Gezegen Geçişlerinde Leke Bölgesi Gözlemleri - III



Gezegen Geçişlerinde Leke Bölgesi Gözlemleri - IV



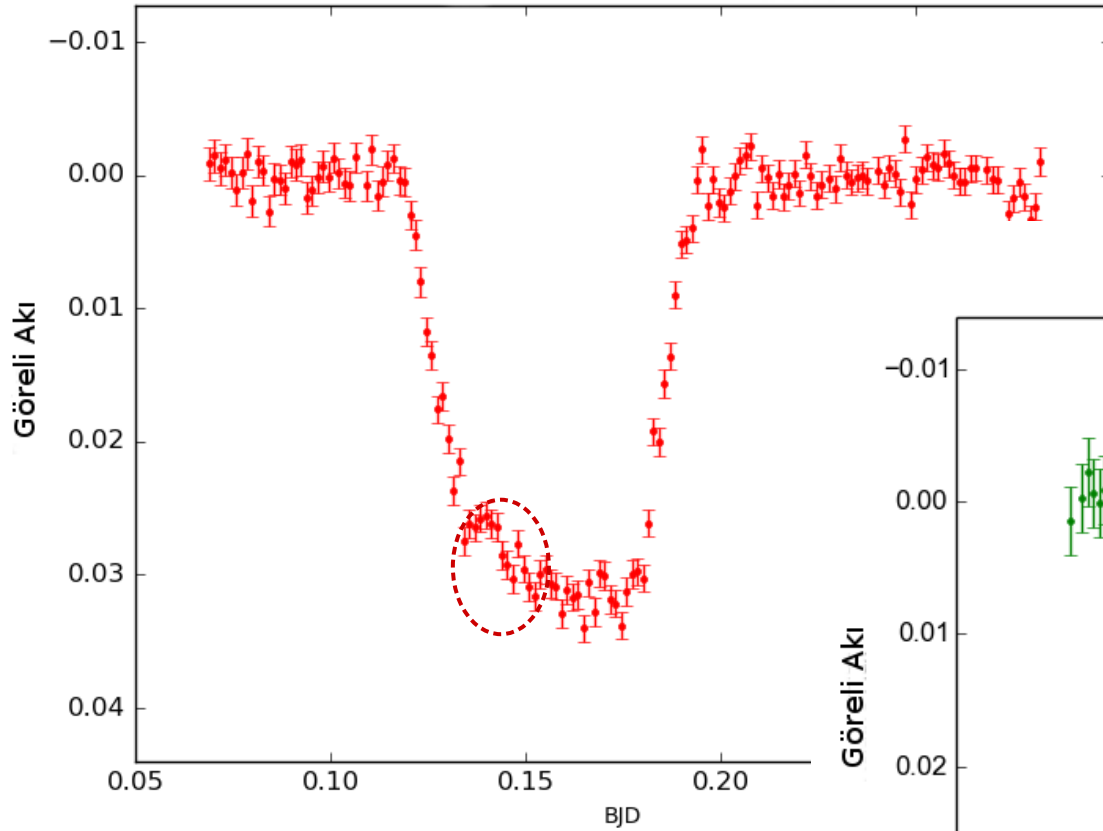
Kepler-17b, Hizalı Yörünge
Desert vd. (2011)



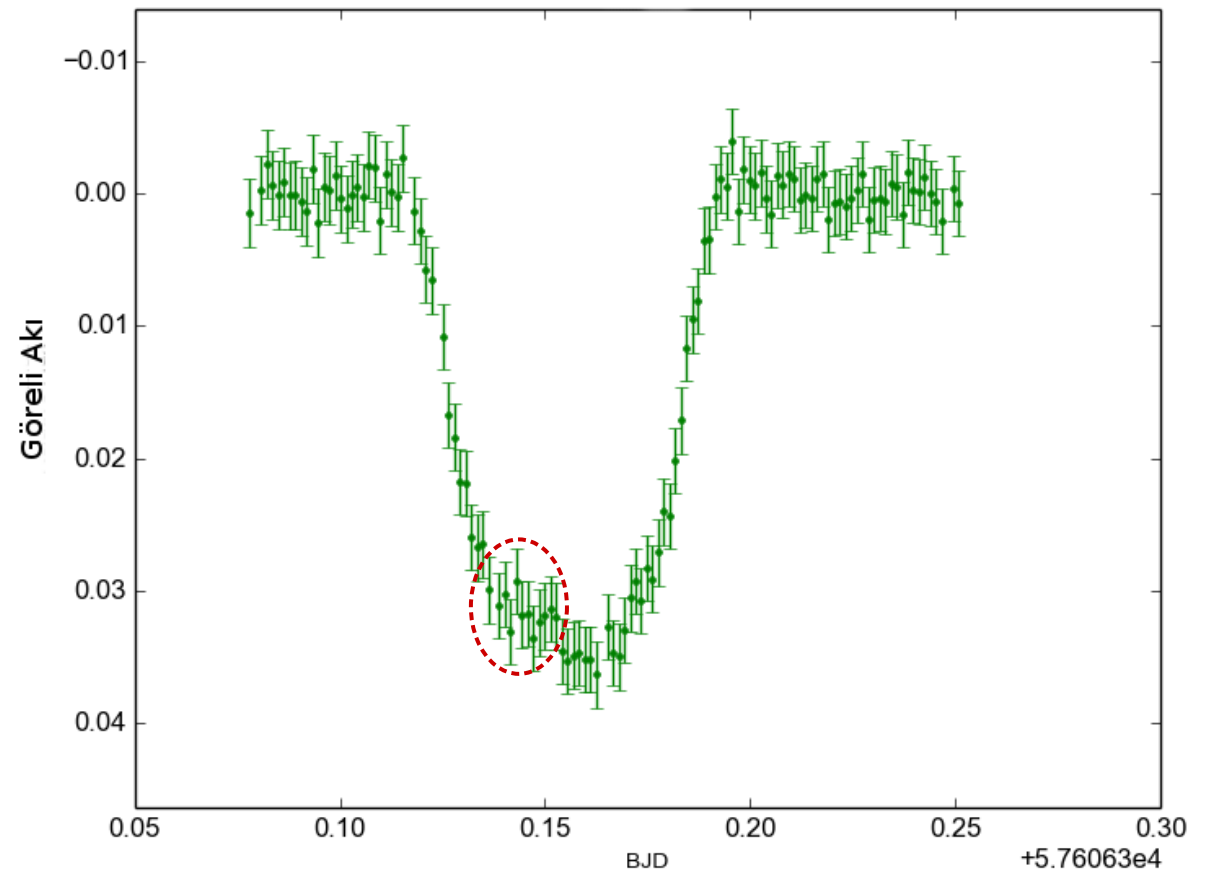
WASP-4b, Hizalanmamış Yörünge
Sanchis Ojeda ve Winn (2011)

Gezegen Geçişlerinde Leke Bölgesi Gözlemleri - V

WASP-52b R Bandı Işık Eğrisi
TUG-T100, 2016-07-29, $\mu = 1.08$ mmag



WASP-52b V Bandı Işık Eğrisi
TUG-T100, 2016-08-05, $\mu = 2.50$ mmag



Gezegeenin Kendi Işıması (Termal Emisyon)

$T_{\text{eff}} = 1000 \text{ K}$ sıcaklığında bir gezegen için, hem yıldızın hem de gezegenin karacisim ışımasını yaptığını varsayarak ışıma şiddetleri:

$$\text{Yıldızın Işığ\i} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k T_*} - 1)} 2\pi R_*^2$$

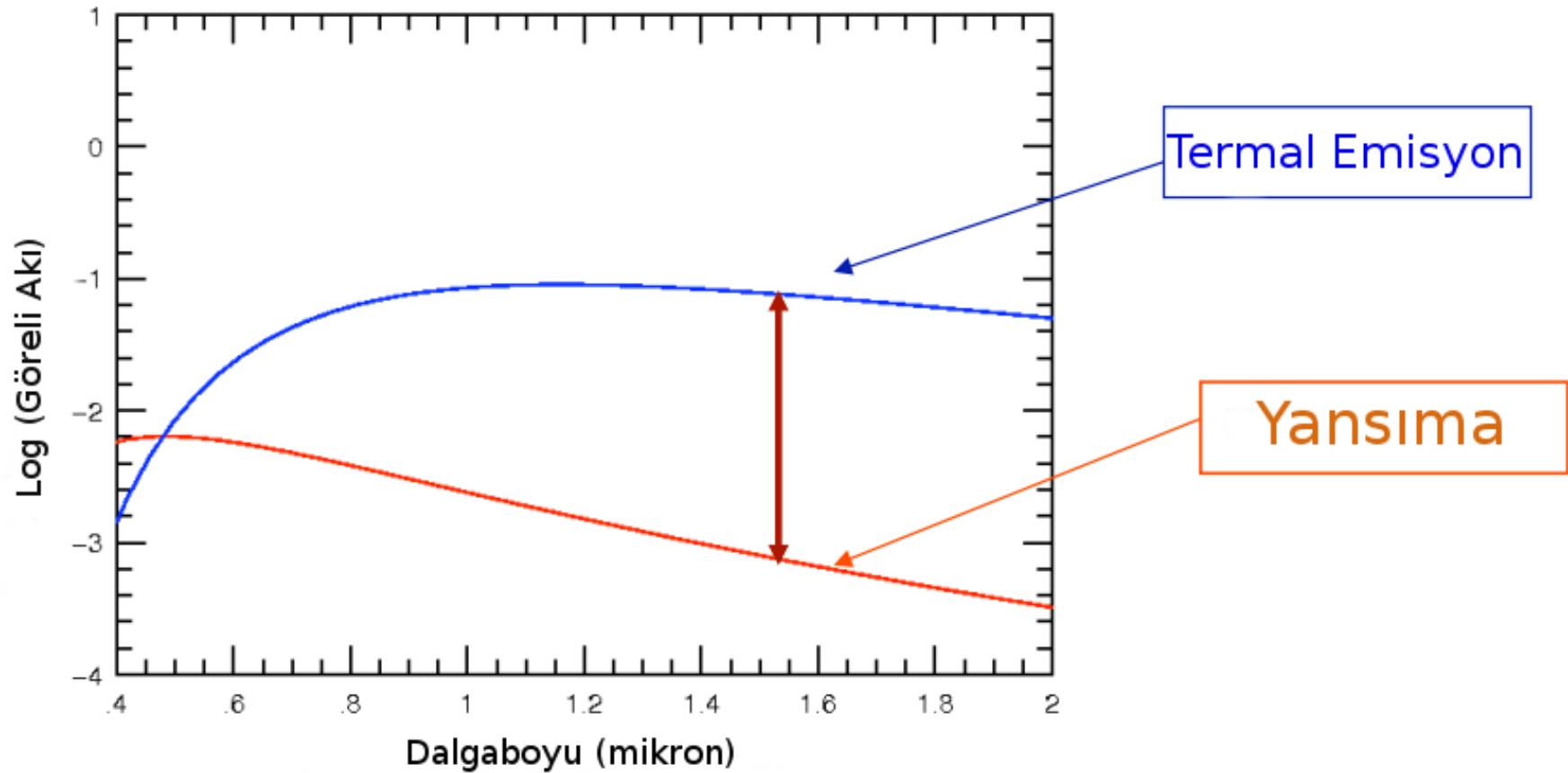
$$\text{Gezegeenin Işığ\i} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k T_g} - 1)} 2\pi R_g^2$$

$$\frac{F_g}{F_*} = \frac{e^{hc/\lambda k T_*} - 1}{e^{hc/\lambda k T_g} - 1} \frac{R_g^2}{R_*^2}$$



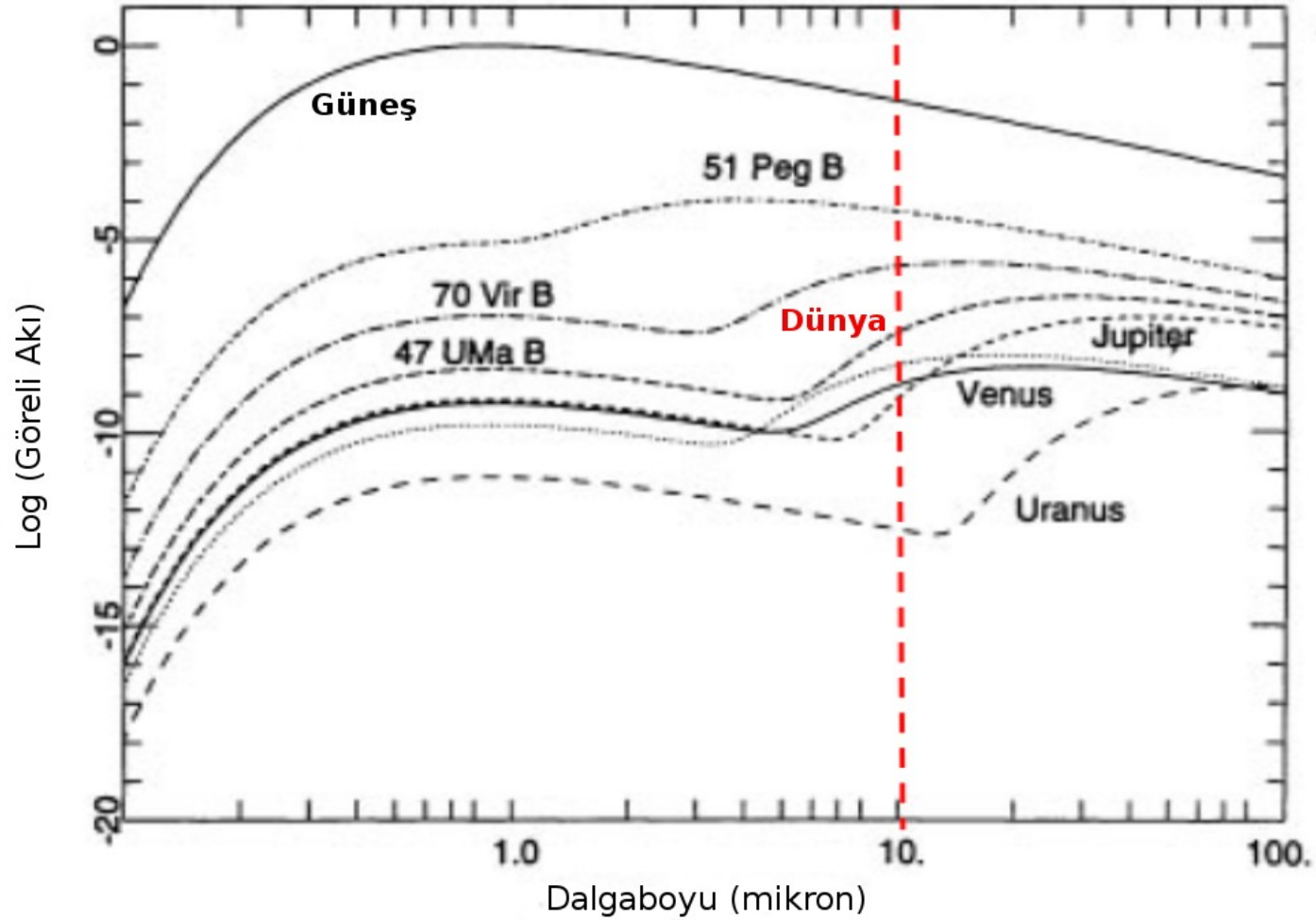
$T_* = 5800 \text{ K}$ sıcaklığında Güneş-benzeri bir yıldızın etrafındaki, $1.5 R_{\text{jüp}}$ yarıçapında $T_g = 1000 \text{ K}$ sıcaklığında bir gezegen için $\lambda = 8 \mu\text{m}$ 'de $F_g / F_* = 0.0016$

Gezegeenin Kendi Işıması (Dalgaboyu Bağımlılığı)



$R = 1.5 R_{\text{jüp}}$, $a = 0.025 \text{ AB}$ ($P = 1^{\text{gün}.5}$), $T_g = 2500 \text{ K}$, A (g. albedo) = 0.1 bir gezegen için yansımâ ile gezegenin kendi ışıması 5000 Angstrom civarında eşittir!

Gezegeenin Kendi Işıması (Dalgaboyu Bağımlılığı)



Dünya'nın 10 μm 'de Güneş Sistemi'nin en parlak gezegeni olduğuna dikkat ediniz!

Geçiş Tayf Ölçümü - I

Şu ana kadar gezegenin disk kenarını düzgün bir yay olarak ele aldık. Ancak gaz gezegenlerin bir yüzeyi bulunmadığı gibi, karasal gezegenlerin de kalın atmosferleri olabilir. R_g gezegenin tüm dalgaboylarında opak olan yarıçapını tanımlamak üzere, gezegenin optik ince atmosferi kaynaklı ekstra ışık değişimi

$$\Delta \delta = \frac{\pi (R_g + N_H H)^2}{\pi R_*^2} - \frac{\pi R_g^2}{\pi R_*^2} \approx 2 N_H \delta \left(\frac{H}{R_g} \right)$$

H : Gezegen atmosferinin ölçek yüksekliği (scale height)*
N_H : Yıldız ışığının içinden geçtiği ölçek yüksekliği sayısı
T : Gezegenin yüzey sıcaklığı (T),
M_m : Ortalama molekül ağırlığı,
g : Yüzey çekim ivmesi

$$H = \frac{k_B T}{\mu_m g}$$

İfadeler gezegen atmosferi kaynaklı değişimin yüksek ölçek yükseklikleri için büyük olacağını açıkça göstermektedir. Bu da yüksek yüzey sıcaklıklı, “hafif” atmosfere sahip sıcak-Jüpiterler için bu değişimin daha büyük olacağı anlamına gelir.

Tipik sıcak-Jüpiter

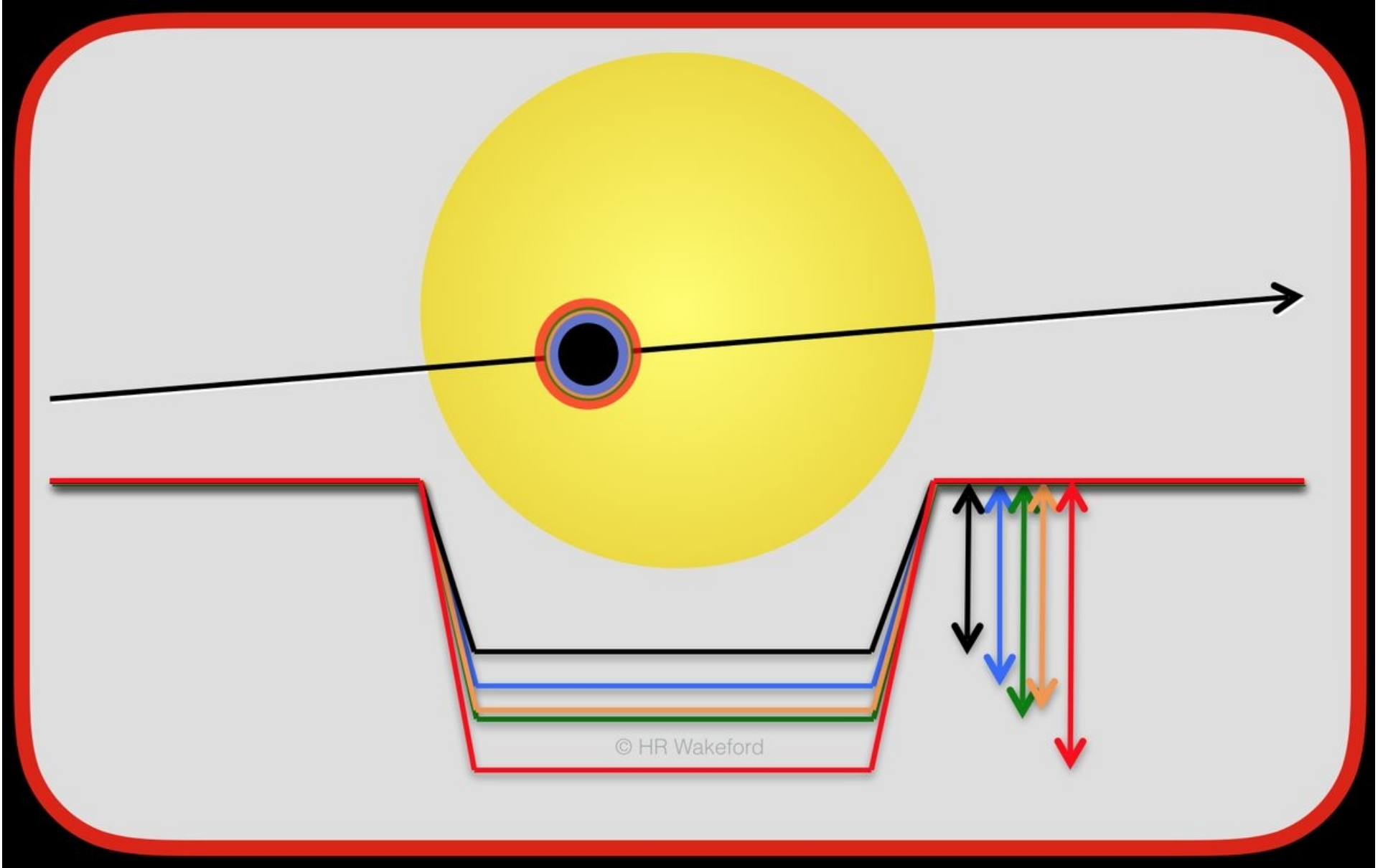
$$\begin{aligned} T_{eq} &= 1300 \text{ K} \\ g &= 25 \text{ m/s}^2 \\ \mu_m &= 2 \text{ akb} \end{aligned} \longrightarrow \Delta \delta \approx \% 1$$

Yer-benzeri

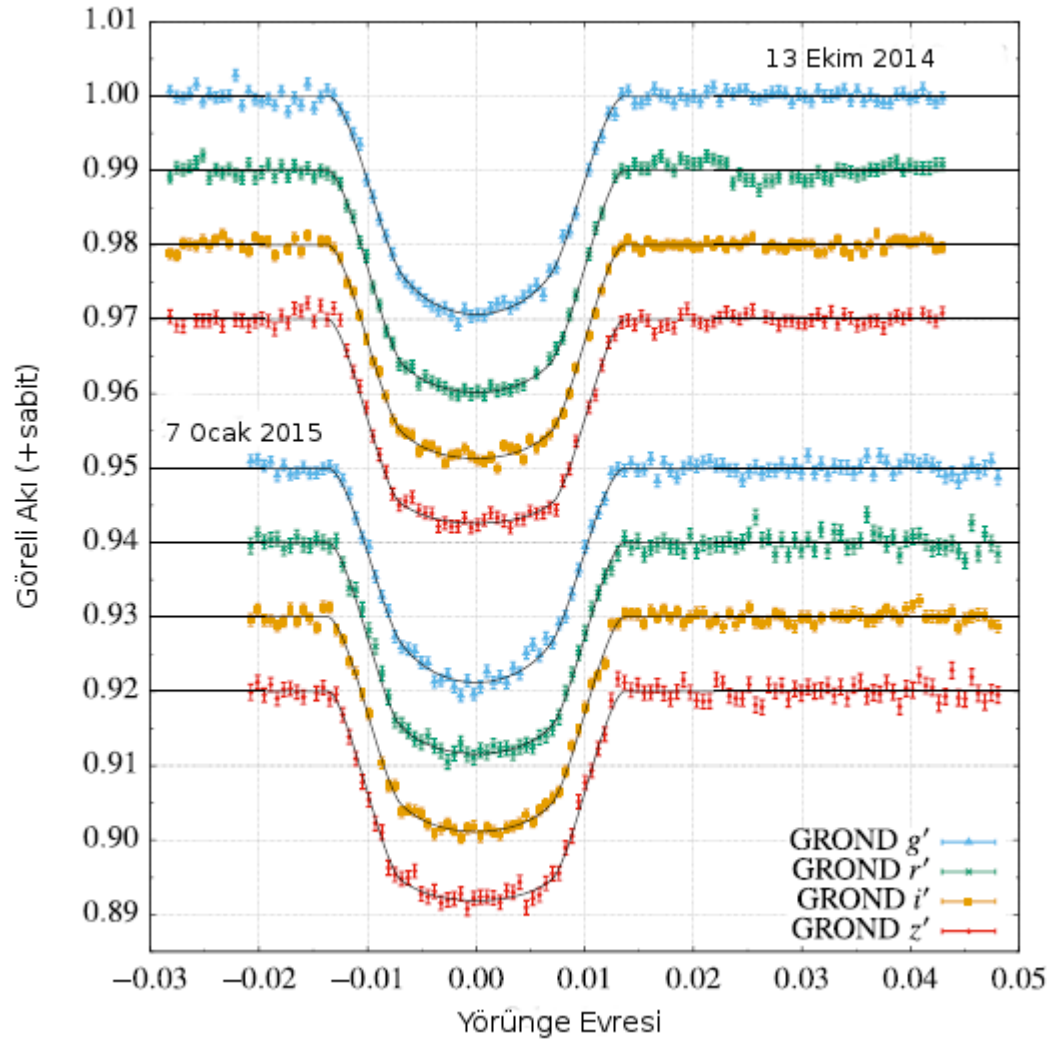
$$\begin{aligned} T_{eq} &= 273 \text{ K} \\ g &= 10 \text{ m/s}^2 \\ \mu_m &= 28 \text{ akb} \end{aligned} \longrightarrow \Delta \delta \approx 10^{-6}$$

Ölçek Yüksekliği (H): Gezegenin yüzeyinden atmosferi boyunca basıncın 1/e katına indiği yüksekliğe denir. Dünya için ölçek yüksekliği, yüzey sıcaklığının 290 K alınması durumunda 8.5 km olarak verilir.

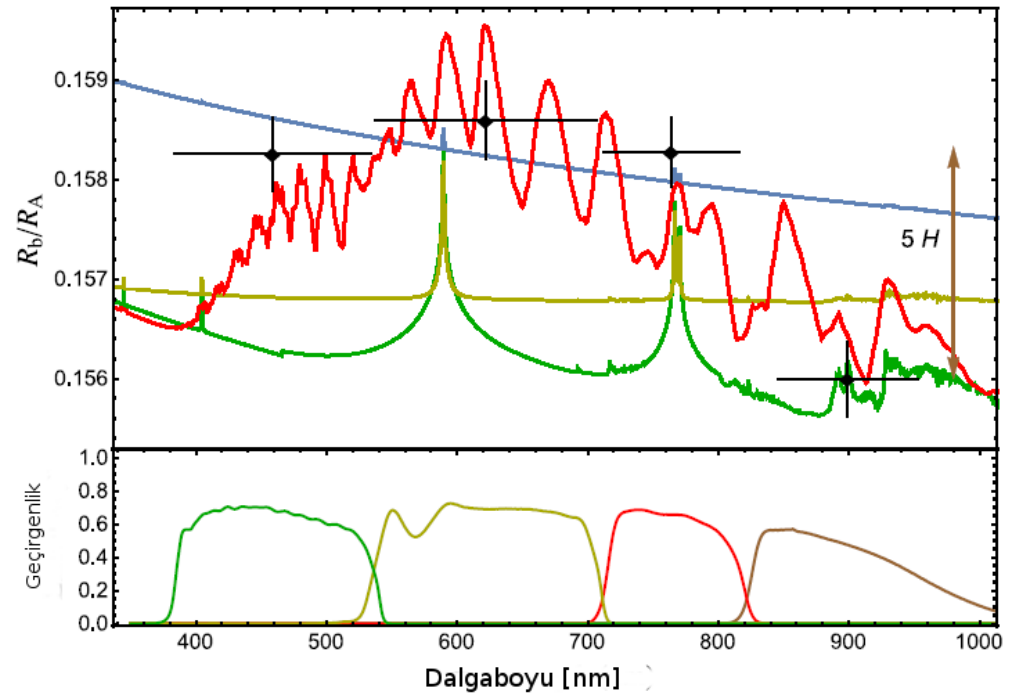
Geçiş Tayf Ölçümü



Geçiş Tayf Ölçümü - II



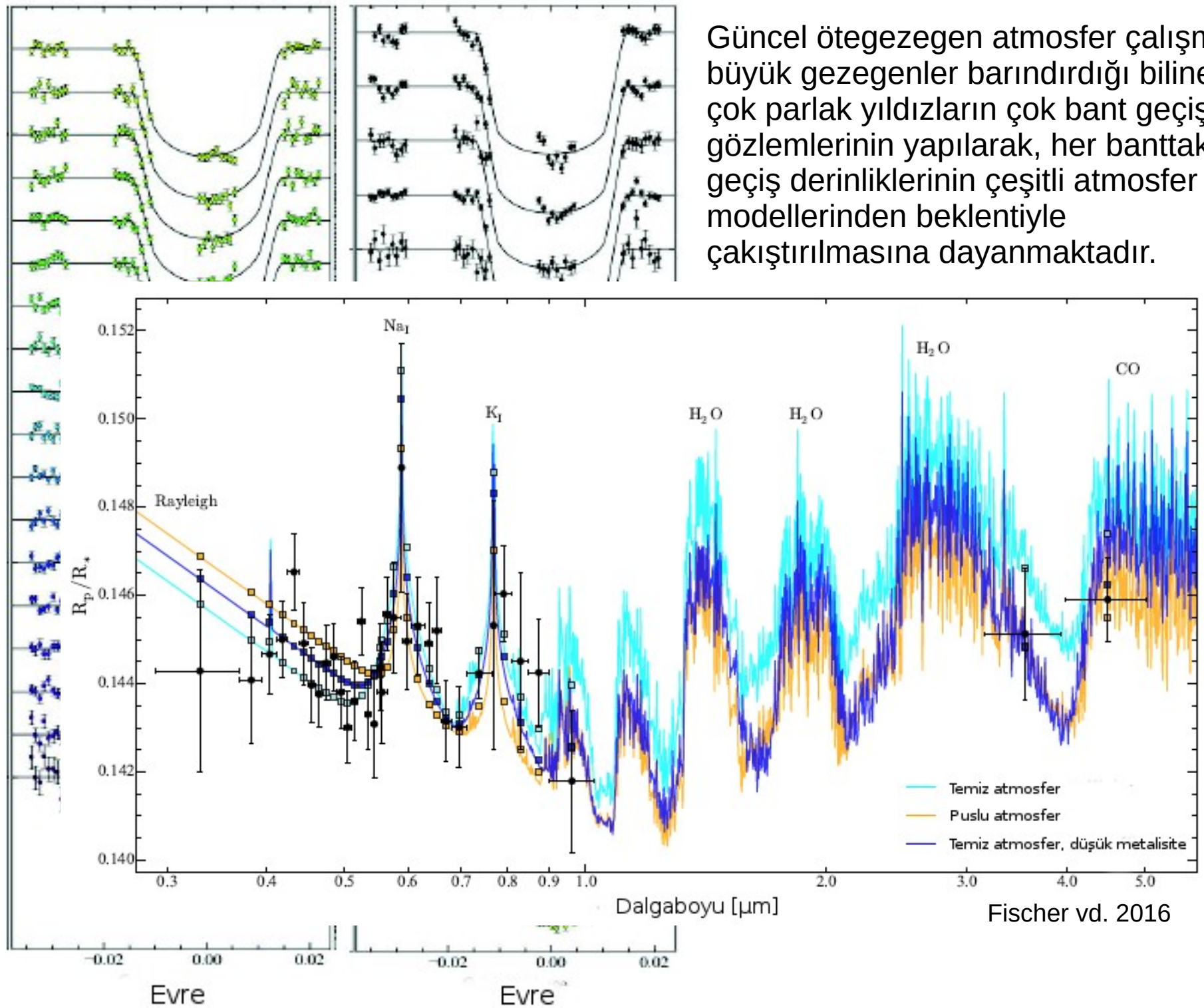
WASP-98b'nin iki farklı tarihte yapılmış çok bant GROND gözlemleri
(Mancini & Southworth 2016)



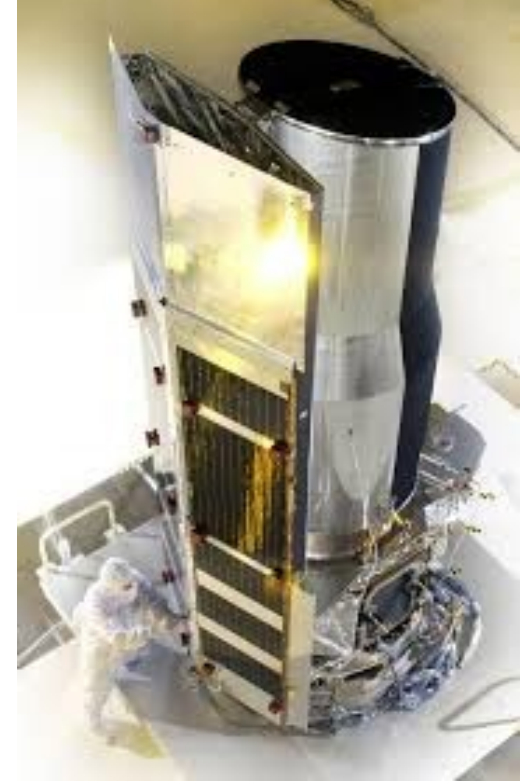
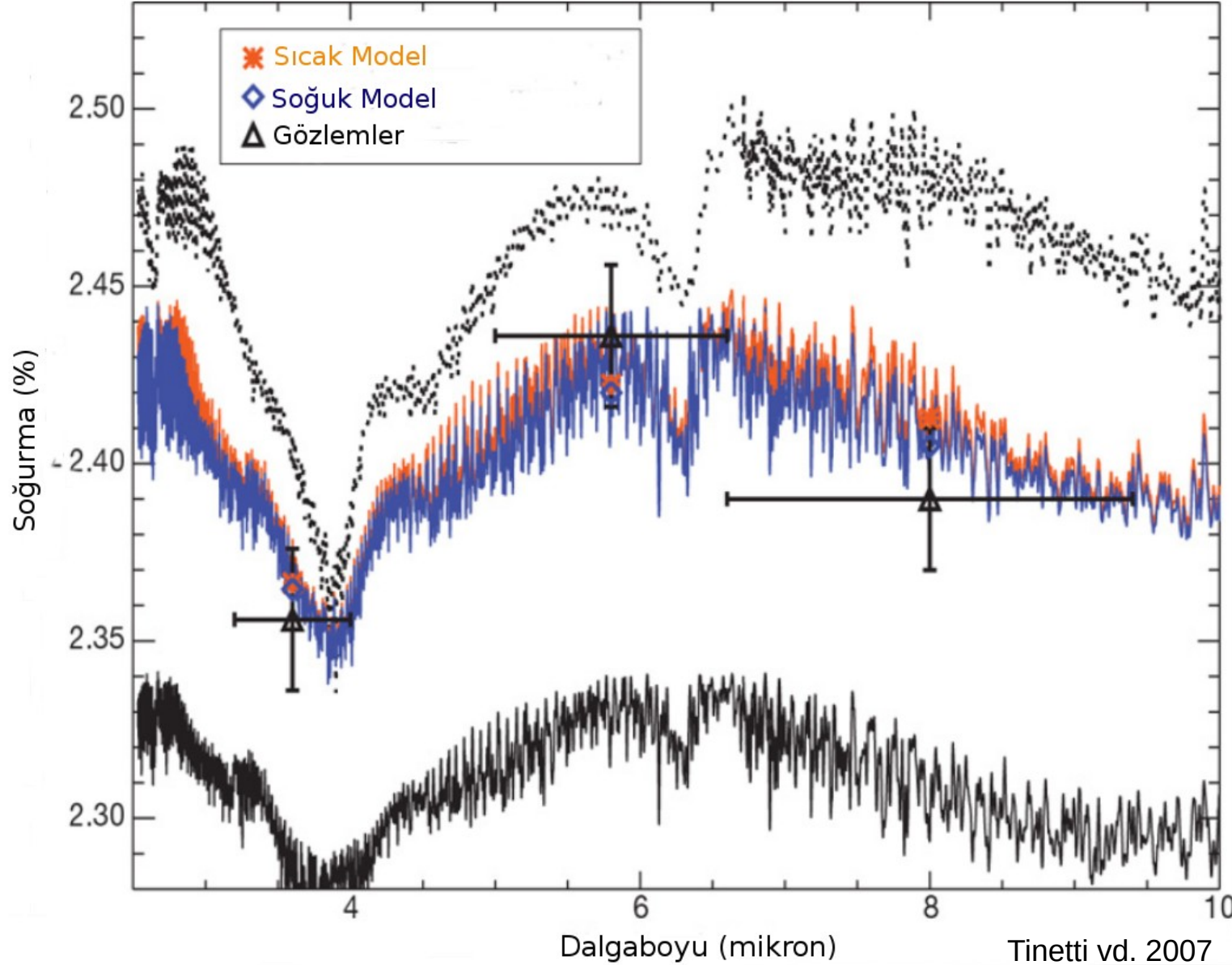
$k (R_p / R_*)$ değerleri ağırlıklı ortalama ile belirlenmiştir. Hata değerleri gözlemsel hatalardan türetilirken dalgaboyundaki hata kullanılan fotometrik bandın FWHM'sini göstermektedir. **Yeşil** “temiz bir atmosfer”, **mavi** aynı atmosferin puslu bir versiyonu için Rayleigh saçılması 1000 kat artırılmış hali, **sarı** bulutlu bir atmosfer, **kırmızı** TiO ve VO baskın atmosferi göstermektedir

Güncel ötegezegen atmosfer çalışmaları büyük gezegenler barındırdığı bilinen çok parlak yıldızların çok bant geçiş gözlemlerinin yapılarak, her banttaki geçiş derinliklerinin çeşitli atmosfer modellerinden beklentiyle karşılaştırılmasına dayanmaktadır.

Görelî Akı (+sabit)

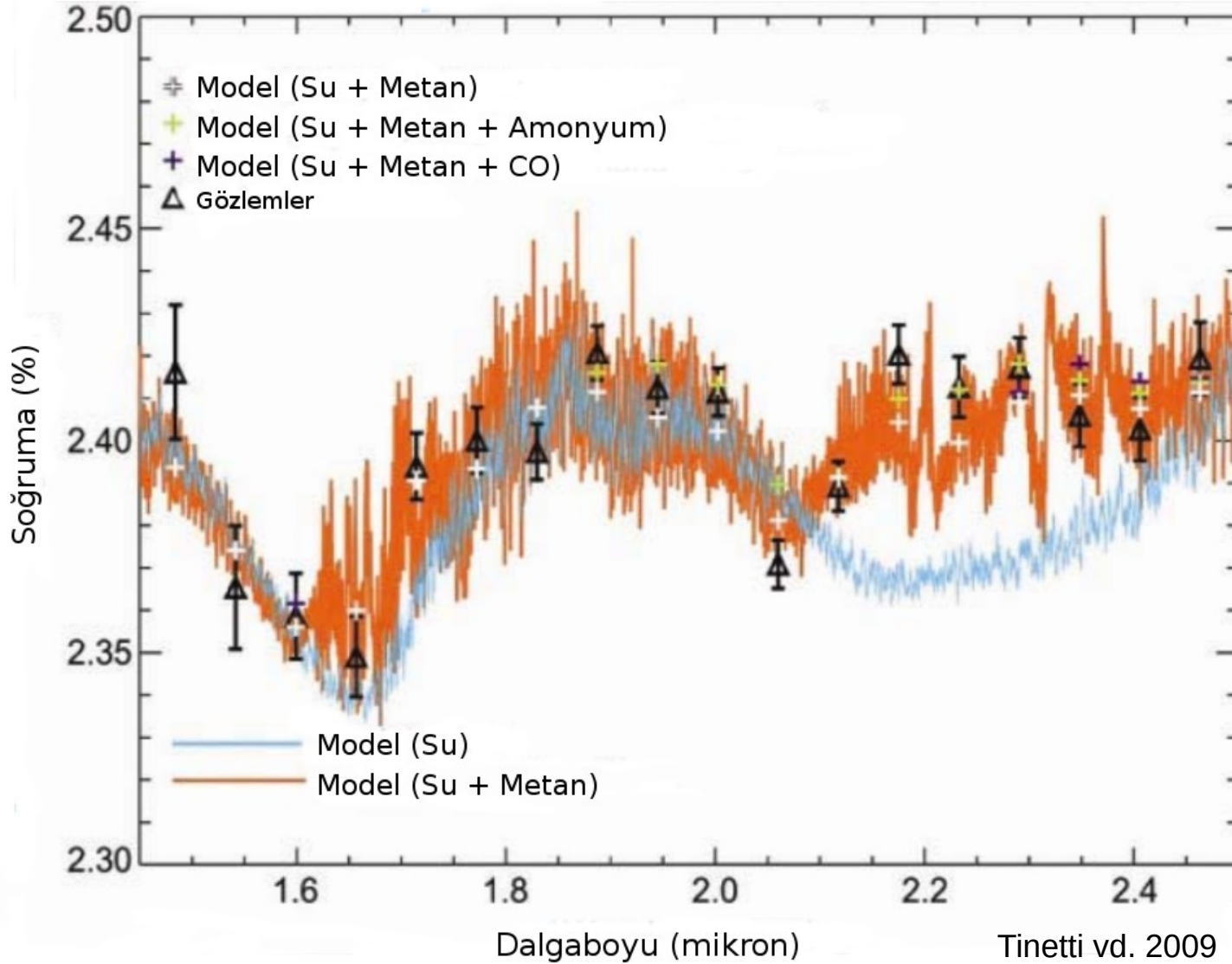


Spitzer gözlemleri model tayflardaki su (H_2O) soğurma çizgileri ile uyumlu gözükmemektedir. HD189733b'nin atmosferinde SU bulunmuştur! Ancak 2.22 gün yörünge dönemi, yıldızına ($T_* \sim 4875$ K) yakın HD189733b, yaşanabilir bölge içerisinde değildir. Yani atmosferde bulunan su yüzeyde sıvı formda olamaz!



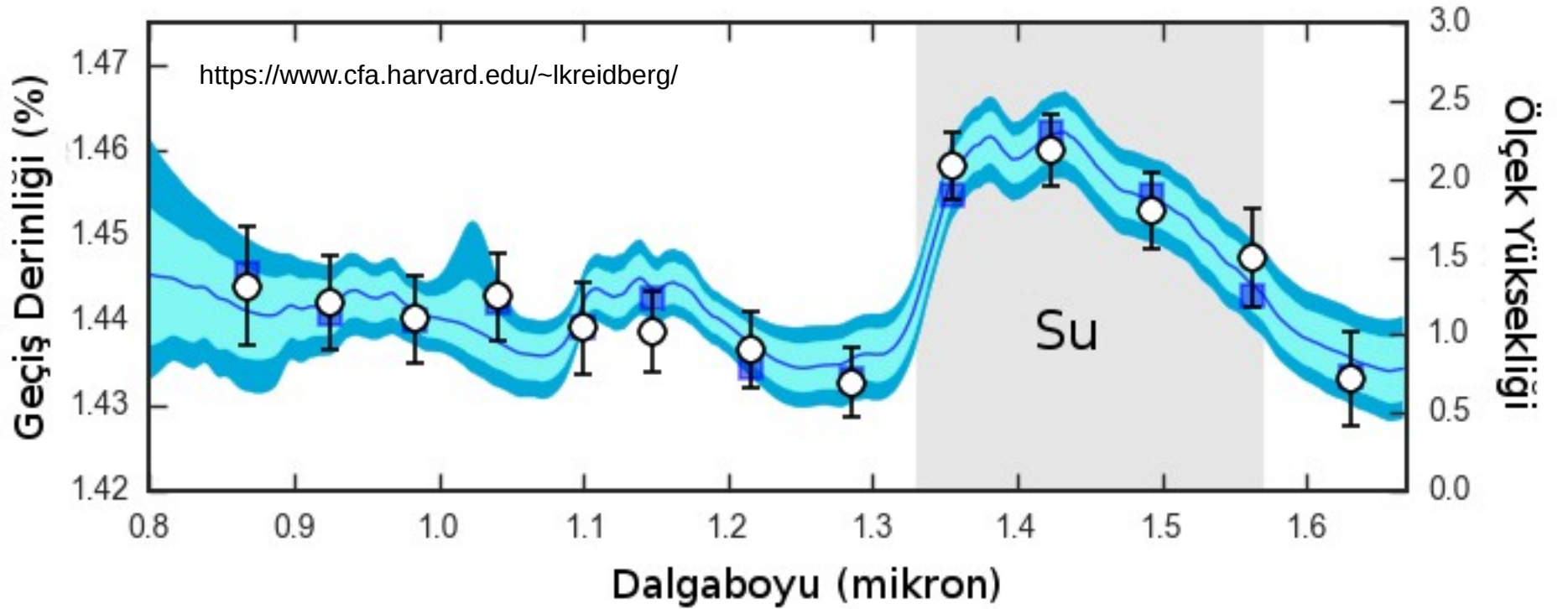
85 cm çaplı Spitzer Uzay Teleskobu 3 ile 180 μ arasında gözlem yapmayı sağlamaktadır.

Hubble Uzay Teleskobu (HST) gözlemleri de model tayflardaki su (H_2O) ve metan (CH_4) soğurma çizgileri ile uyumlu gözükmektedir. HD189733b'nin atmosferinde SU ve METAN bulunmuştur!

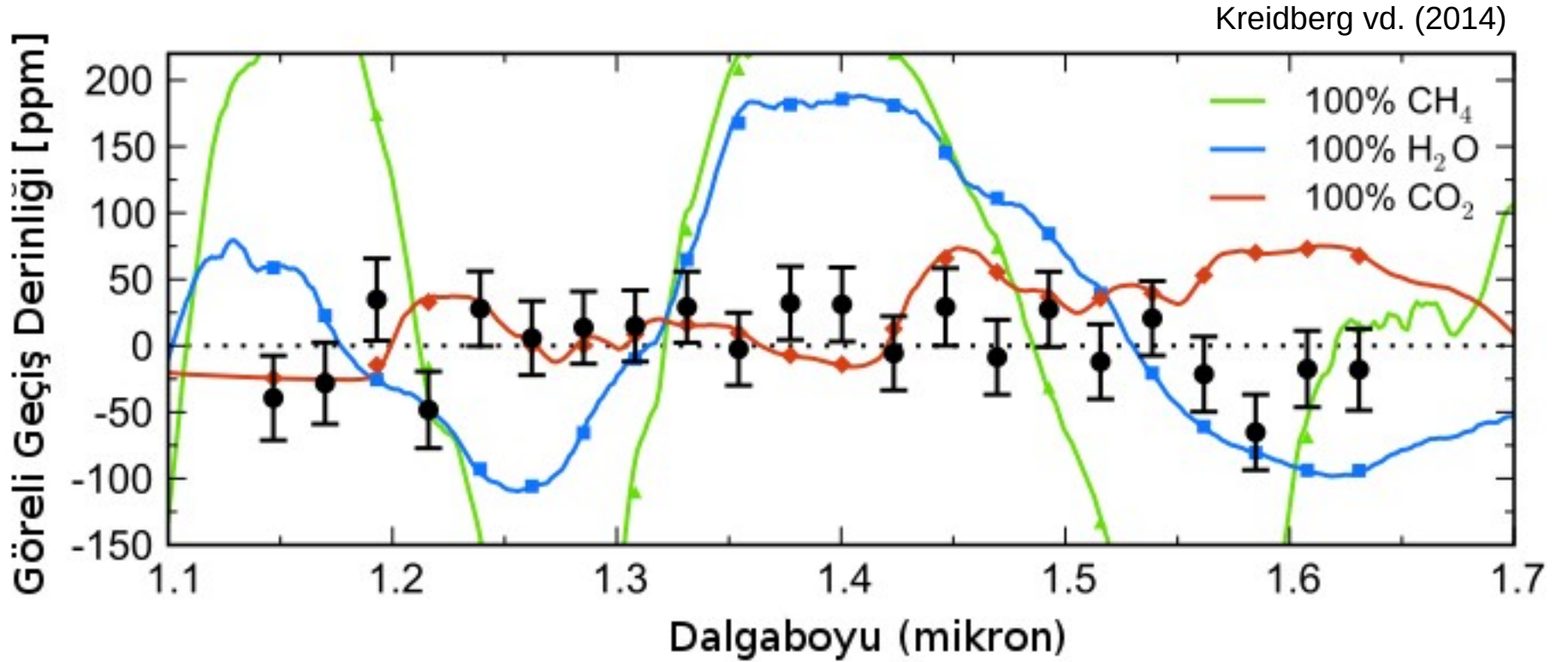


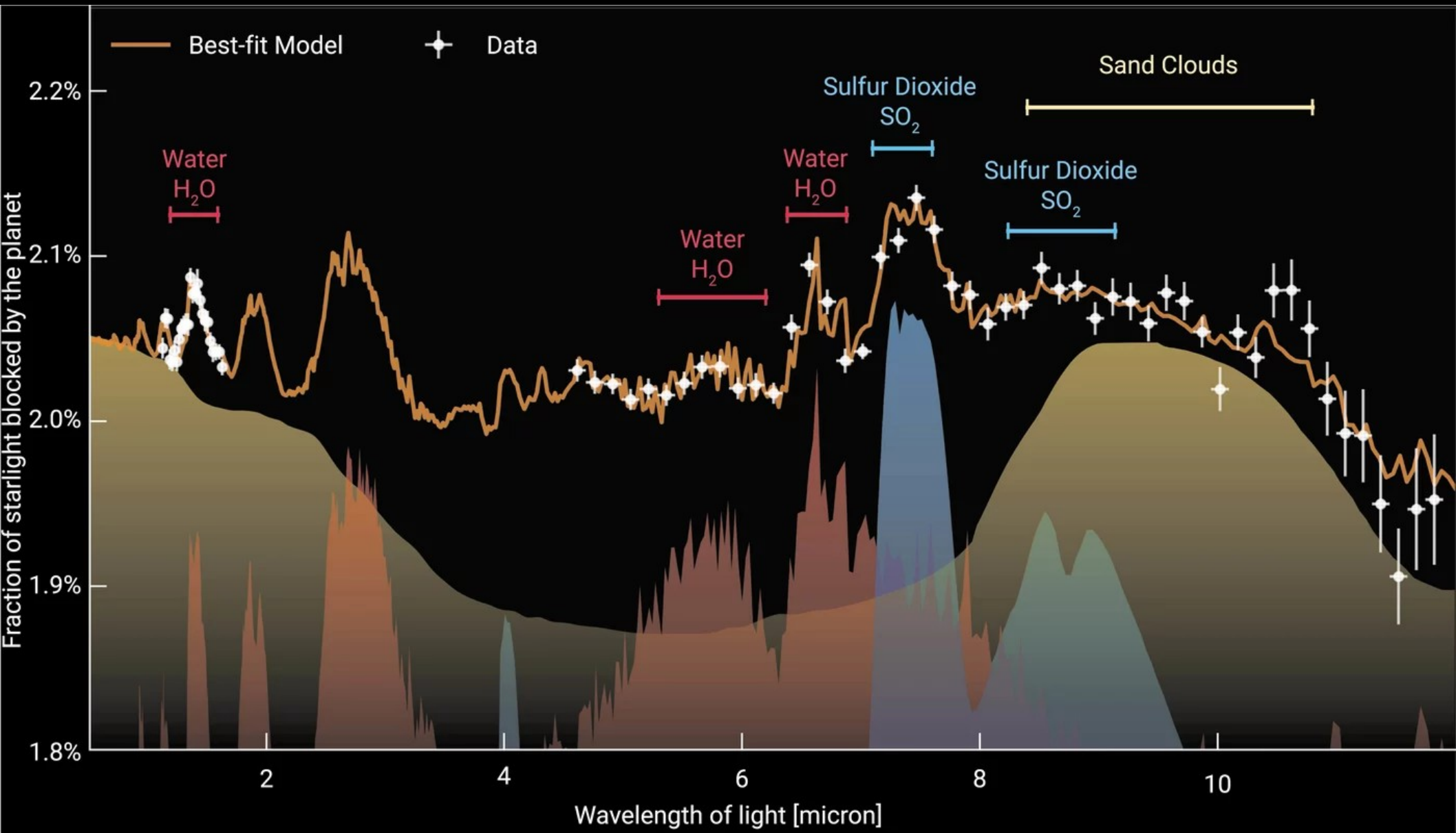
2.4 m çaplı Hubble Uzay Teleskobu yakın kızılötede gözlem yapmaya imkan sağlayan kameralara (NICMOS) sahiptir!

Sıcak Jüpiter türündeki WASP-12b ötegezegenin Hubble Uzay Teleskobu (HST) WFC3 kamerasıyla yapılan geçiş gözlemleri gezegenin atmosferinde su soğurmasına ilişkin yapıları açıkça ortaya koymuştur. Bu durum gezegenin karbonca zengin olduğu önerilen atmosferiyle tutarsız görünmekle birlikte oldukça ilginç bir atmosfer oluşumunun da olabileceğine işaret ediyor olabilir (Kreidberg vd. 2017).



Süper-Dünya türündeki GJ1214b ötegezegenin Hubble Uzay Teleskobu (HST) WFC3 kamerasıyla yapılan geçiş gözlemleri geçiş derinliğinin gözlem yapılan dalgaboyu aralığında dalgaboyuyla değişmediğini göstermiştir. Herhangi bir soğurma yapısının gözlenmediği bu düşük çözünürlüklü tayf gezegen atmosferinin üst katmanlarının kalın ve homojen bir bulut tabakasıyla kaplı olduğuna yorulmuştur (Kreidberg vd. 2014).

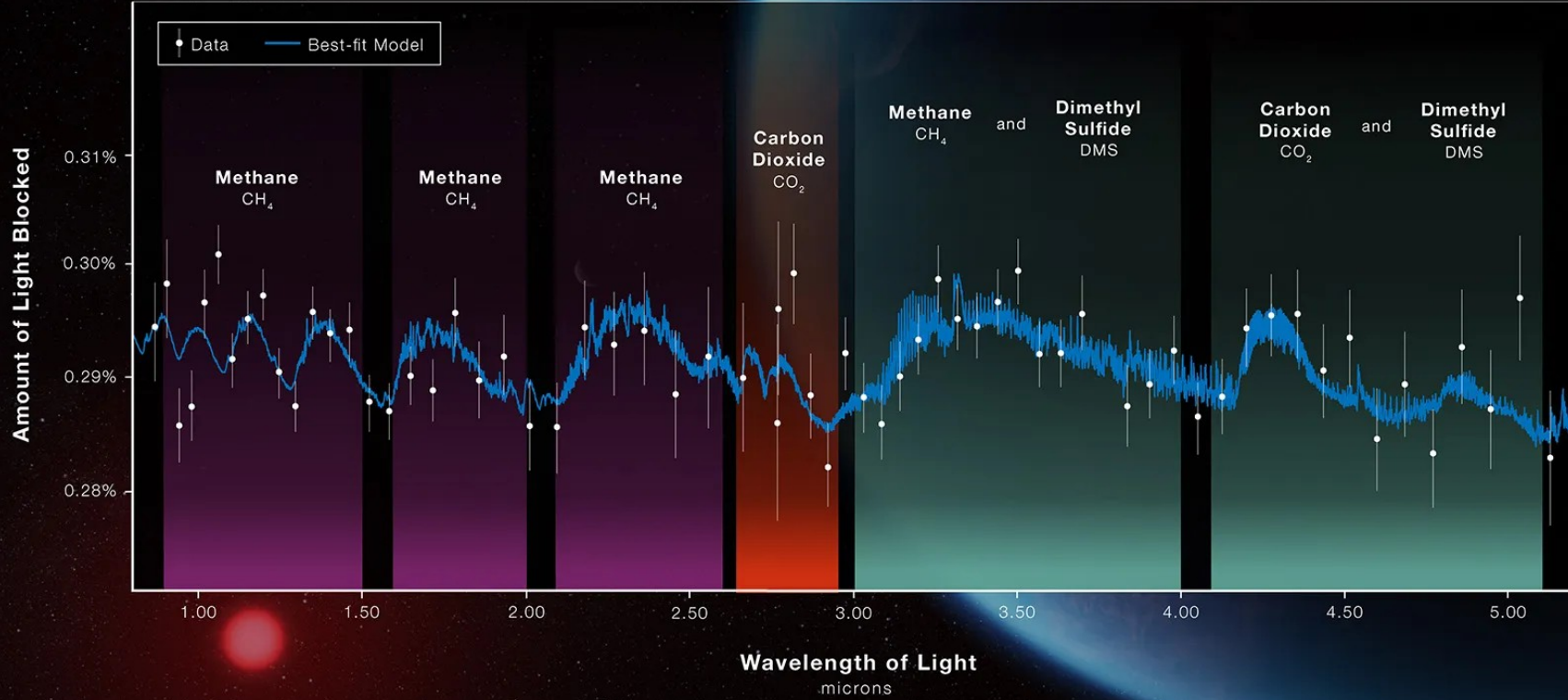




Sıcak Neptün-türü gezegen WASP-107b'nin James Webb Uzay Teleskobu (JWST) orta kızılöte bölgede gözlem yapan Mid-InfraRed Instrument (MIRI) üzerindeki Düşük Çözünürlüklü Tayfölçer (LRS) ile elde edilen geçiş tayfölçümü. Bu tayf, gezegenin atmosferinde su buharı, kükürt dioksit ve silikat (kum) bulutlarına dair yapılar barındırmaktadır. Her dalgaboyu için, gezegen atmosferi tarafından engellenen yıldız ışığının miktarı (beyaz veri noktaları) geçiş sırasında farklı dalgaboylarındaki geçiş derinliği ölçülerek hesaplanır. Tayf, 4,61 ile 11,83 mikron arasındaki dalgaboylarını kapsamaktadır. Bu verilere ek olarak 1,1 ile 1,7 mikron arasında değişen dalga boylarında gözlem yapan Hubble verileri de yer almaktadır. Sürekli turuncu eğri, JWST ve Hubble verilerine yapılan en iyi gezegen atmosferi modelini göstermektedir. Gölgele renkli bölgeler, en iyi modele su buharı (kırmızı), kükürt dioksit (mavi) ve kum bulutlarının (sarı) katkısını göstermektedir. © Michiel Min / European MIRI EXO GTO team / ESA / NASA; Science: Achrène Dyrek (CEA and Université Paris Cité, France), Michiel Min (SRON, the Netherlands), Leen Decin (KU Leuven, Belgium) / European MIRI EXO GTO team / ESA / NASA

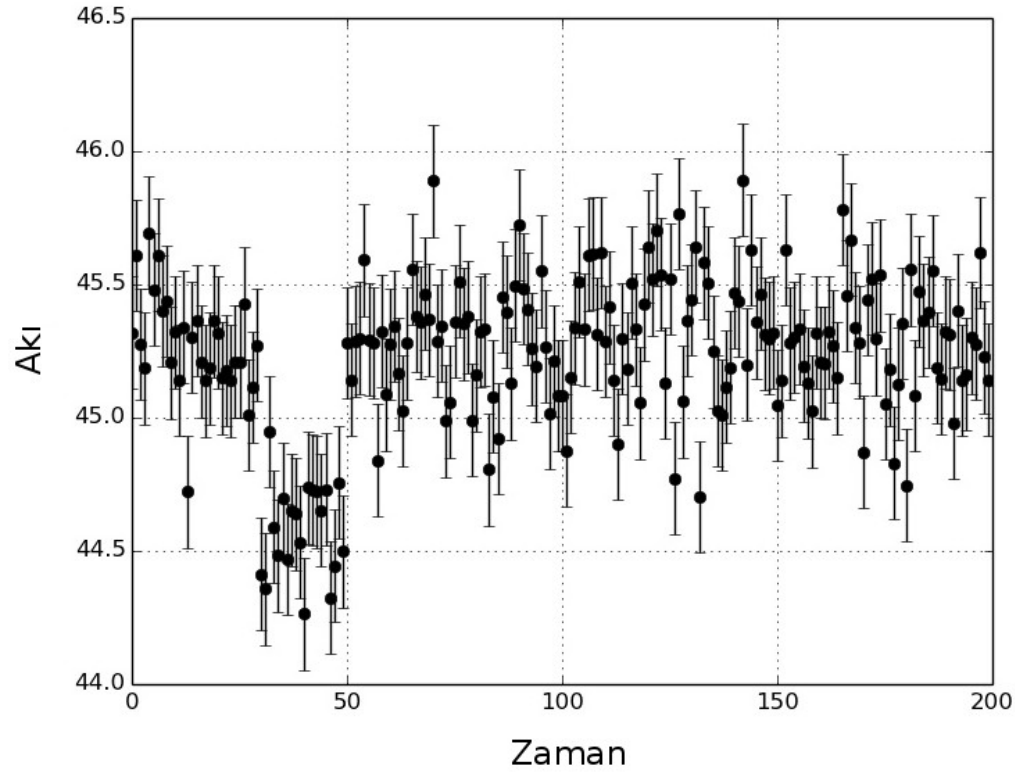
ATMOSPHERE COMPOSITION

NIRISS and NIRSpec (G395H)


WEBB
 SPACE TELESCOPE

Düşük yoğunluklu mini Neptün / süper Dünya türü gezegen K2-18b'nin James Webb Uzay Teleskobu (JWST) yakın kızılöte bölgede gözlem yapan NIRISS (Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph) ve NIRSpec (Near-Infrared Spectrograph) tayfçekerleri ile elde edilen geçiş tayfölçümü. Bu tayf, gezegenin atmosferinde metan, karbondioksit, dimetil sülfid ((CH₃)₂SO) bulutlarına dair yapılar barındırmaktadır. Her dalgaboyu için, gezegen atmosferi tarafından engellenen yıldız ışığının miktarı (beyaz veri noktaları) geçiş sırasında farklı dalgaboylarındaki geçiş derinliği ölçülerek hesaplanır. Tayf, kabaca 1-5 mikron arasındaki dalgaboylarını kapsamaktadır. Sürekli matvi eğri, JWST verilerine yapılan en iyi gezegen atmosferi modelini göstermektedir. Gölgele renkli bölgeler, en iyi modele metan (mor), karbondioksit (kırmızı) ve dimetil sülfidin olası (yeşil) katkısını göstermektedir. Dimetil sülfid, sadece 1σ'da tutarlı bulunmuş, zayıf bir tespittir; ancak yaşam belirteci (ing. biomarker) olma potansiyeli nedeniyle önemlidir.

© Illustration: NASA, CSA, ESA, R. Crawford (STScI), J. Olmsted (STScI), Science: N. Madhusudhan (Cambridge University)



Yukarıda bir gezegen geçişi dolayısı ile gerçekleştiğini düşündüğünüz bir ışık değişimi görüyorsunuz. Aşağıdaki sorular (7. soru hariç) bu geçişi yapan gezegen için verimiştir.

Soru 1. Yıldızın gezegen geçişi dışındaki parlaklığı aşağıdakilerden hangisinde doğru olarak verilmiş olabilir? (Birimler rastgele seçilmiştir!)

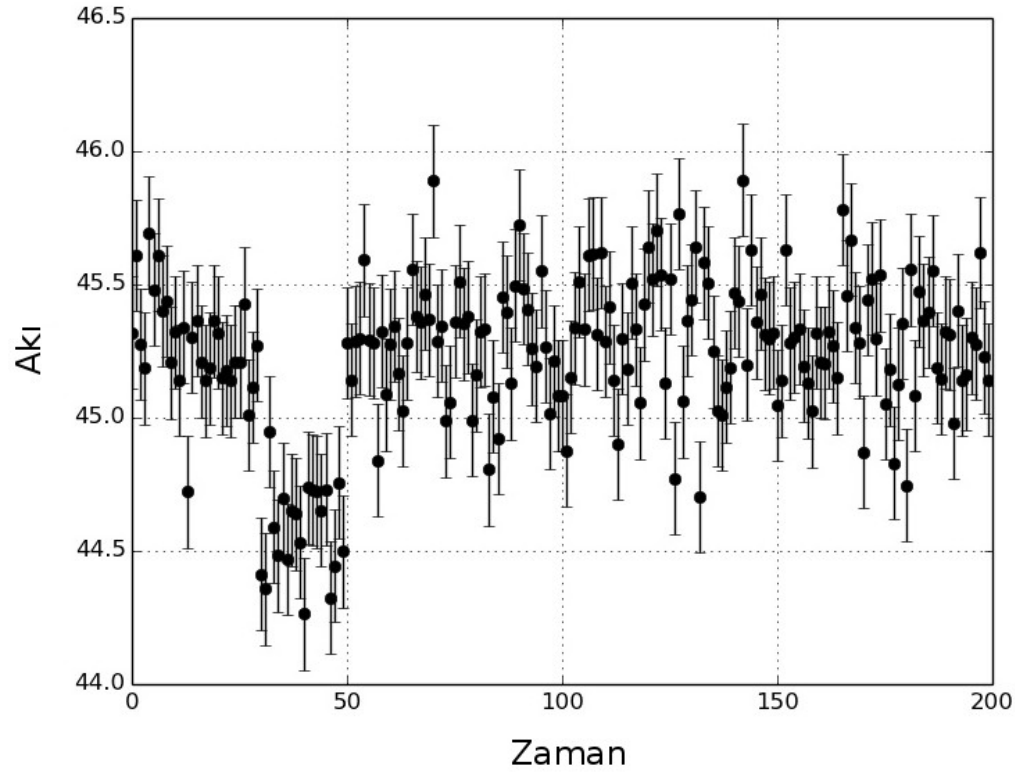
a) 44.25

b) 45.00

☒ c) 45.30

d) 45.95

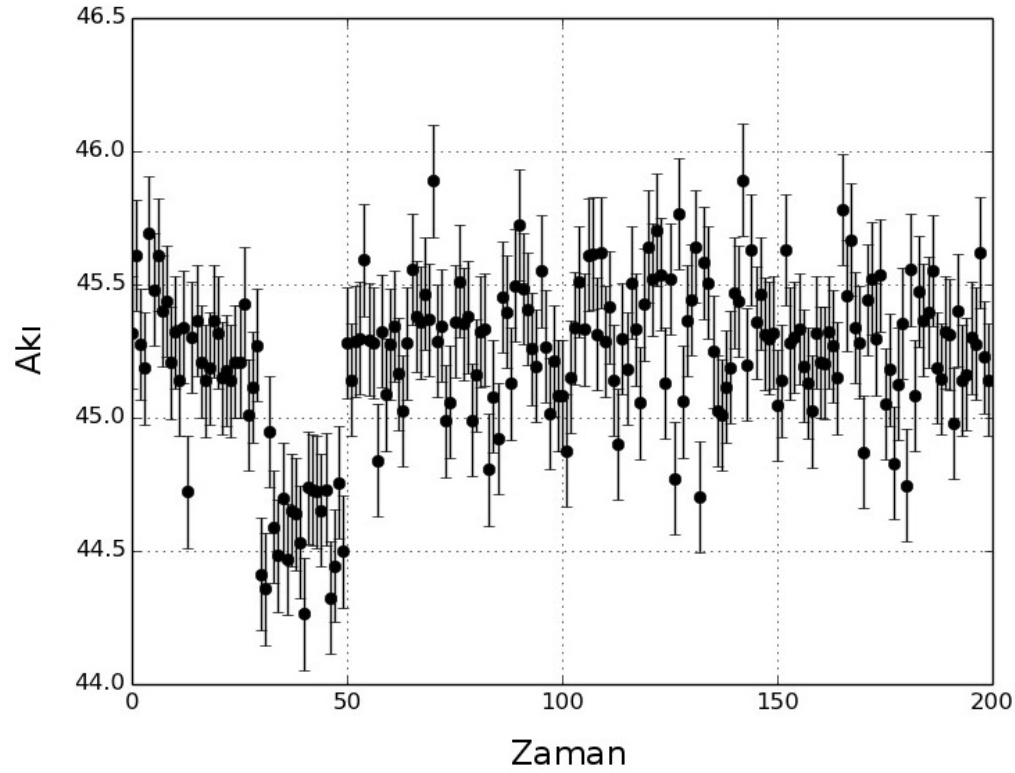
e) 46.10



Yukarıda bir gezegen geçişi dolayısı ile gerçekleştiğini düşündüğünüz bir ışık değişimi görüyorsunuz.

Soru 2. Yıldızın gezegen geçişi sırasındaki parlaklığı aşağıdaki şıklardan hangisinde doğru olarak verilmiş olabilir? (Birimler rastgele seçilmiştir!)

- a) 44.25 **b) 44.60** c) 45.00 d) 45.30 e) 45.80



Yukarıda bir gezegen geçişi dolayısı ile gerçekleştiğini düşündüğünüz bir ışık değişimi görüyorsunuz.

Soru 3. Yıldızın gezegen geçişi sırasındaki parlaklık değişimi aşağıdaki şıklardan hangisinde doğru olarak verilmiş olabilir? (Birimler rastgele seçilmiştir!)

a) 0.20

b) 0.40

c) 0.50

☒ d) 0.70

e) 0.90

Soru 4. Yıldızın yarıçapı 5×10^8 m olduğuna göre gezegenin yarıçapı $R_{jüp}$ cinsinden nedir? (Jüpiter'in ekvator yarıçapı 71500 km 'dir.)

- a) 1.20 b) 0.62 c) 0.95 d) 0.1.03 **e) 0.87**

Soru 5. Bir süre gözlem yaptıktan sonra parlaklık değişiminin 4.3 gün dönemle tekrarlandığını farkediyorsunuz. Gezegenin yörüngesi çember kabul edilecek olursa yıldızından uzaklığı kaç Astronomi Birimi'dir? ($M_* = 1.3 \times 10^{30}$ kg, 1 AB = 149.6 milyon km, $G = 6.67 \times 10^{-11}$ m³ / (kg s²))

- a) 0.450 b) 1.000 **c) 0.045** d) 0.090 e) 0.135

Soru 6. İki cismin ısı dengesinde ve gezegenin sadece yıldızı tarafından “ısıtılan” bir karacisim olduğu varsayılırsa gezegenin denge sıcaklığı Kelvin cinsinden aşağıdaki şıklardan hangisinde doğru verimiştir? ($A = 0.34$, $T_* = 5000$ K, $\epsilon = 1$).

- a) 273 b) 1023 c) 710 **d) 868** e) 1256

Soru 7. Dünya için denge sıcaklığı ($A_{Dünya} = 0.367$) aşağıdaki şıklardan hangisinde doğru olarak verimiştir?

- a) 249** b) 298 c) 210 d) 273 e) 300

Kaynaklar

- ✓ Charbonneau, David; Brown, Timothy M.; Latham, David W.; Mayor, Michel, 2000, *"Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star"*, The Astrophysical Journal, 529, L45-L48
- ✓ Knutson, Heather A., 2007, *"Extrasolar planets: Water on distant worlds"*, Nature, 448, 143
- ✓ Madhusudhan, N.; Knutson, H.; Fortney, J. J.; Barman, T., 2014, *"Exoplanetary Atmospheres"*, Protostars and Planets VI, University of Arizona Press, Tucson, 914 pp., p.739-762
- ✓ Mazeh, Tsevi, 2000, *"The Spectroscopic Orbit of the Planetary Companion Transiting HD 209458"*, The Astrophysical Journal, 532, 55
- ✓ Winn, Joshua N, 2010, *"Transits and Occultations"*, arXiv1001.2010W