

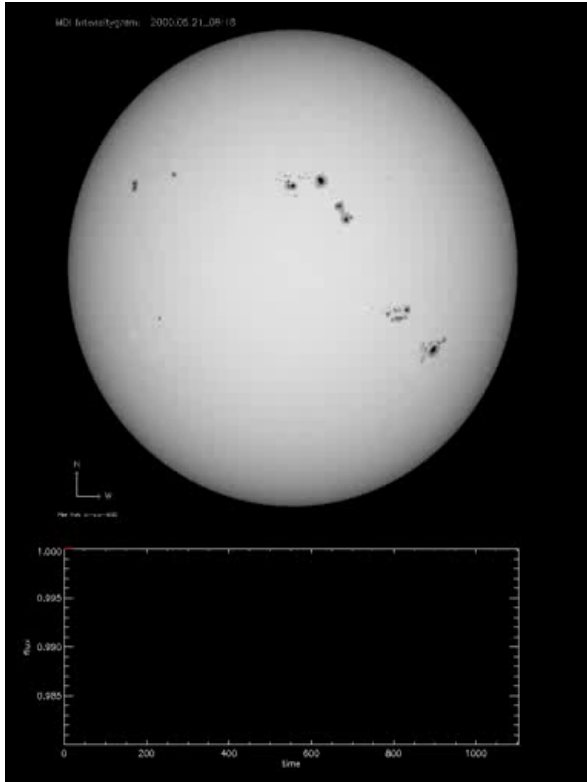
# Ötegezegenlerin Geçiş Işık Ölçümü



Özgür Baştürk  
Ankara Üniversitesi

UAK – 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum

# Gezegen Geçişleri



1990'lara kadar geçiş gözlemleriyle

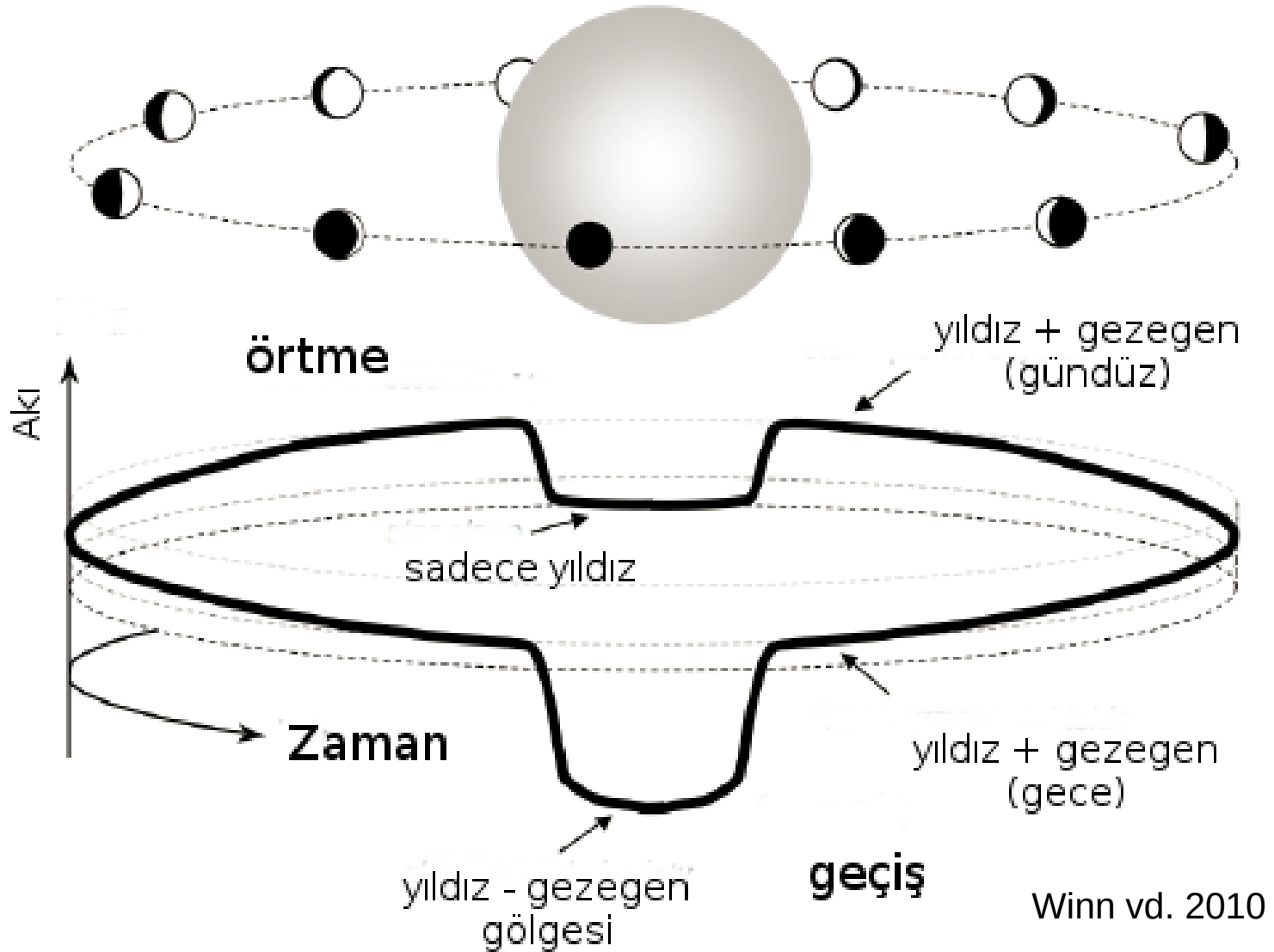
- ✓ Jüpiter uydularının geçiş gözlemlerinden ışık hızının doğruya en yakın değerine,
- ✓ Venüs'ün geçiş gözlemlerinden Astronomi Birimi'nin hassas deęerine,,
- ✓ Güneş tutulması gözlemlerinden Helyum'un keşfine, Dünya'nın dönüş hızındaki yavaşlamaya, Einstein'in görelilik kuramına ilişkin ilk gözlemsel delillere,
- ✓ Çift yıldız gözlemlerinden elde ettiğimiz temel parametrelerle yıldız yapısı ve evrimi üzerine bilgilere

ulařtık...



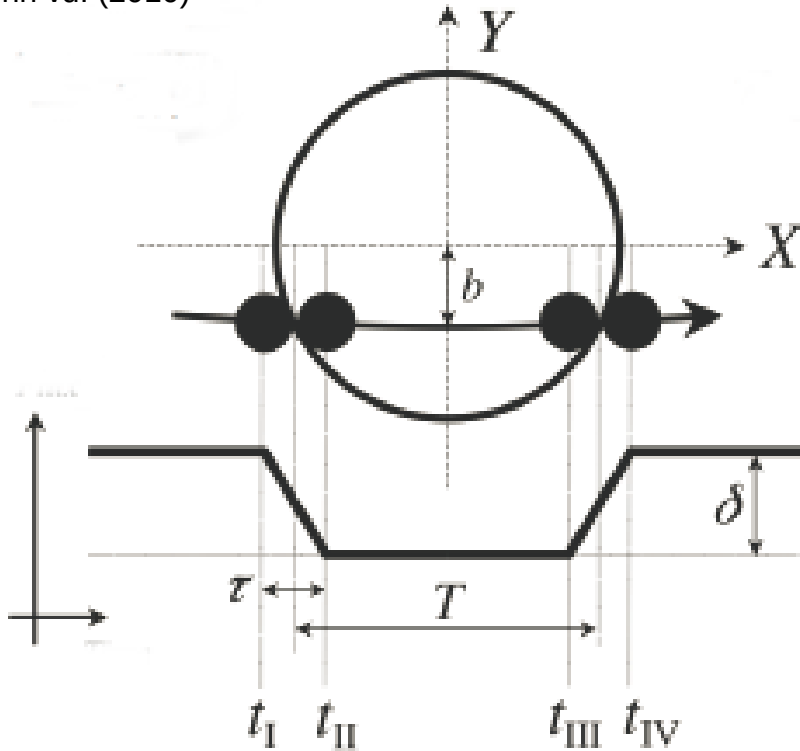
# Geçiş Geometrisi

# Geçiş Geometrisi



# Geçiş Geometrisinin Parametreleri

Winn vd. (2010)



$b$  : etki parametresi

$\delta$ : Geçiş ışık eğrisi derinliği ya da kontrast

$t_{I, II, III, IV}$ : Geçiş zamanları

$\tau_{ing} = t_{II} - t_I$ : Geçiş başlangıcı zaman ölçüğü

$\tau_{eg} = t_{IV} - t_{III}$ : Geçiş sonu zaman ölçüğü

$T$ : Geçiş süresi,  $T = T_{Top} - \tau$

$R_p, M_p, R_*, M_*$ : Gezegen (p) ve yıldızın (\*) yarıçap ve kütleleri

$k = R_p / R_*$

# İki Cisim Problemi

İki cisim probleminde hareket denklemini hatırlayalım:

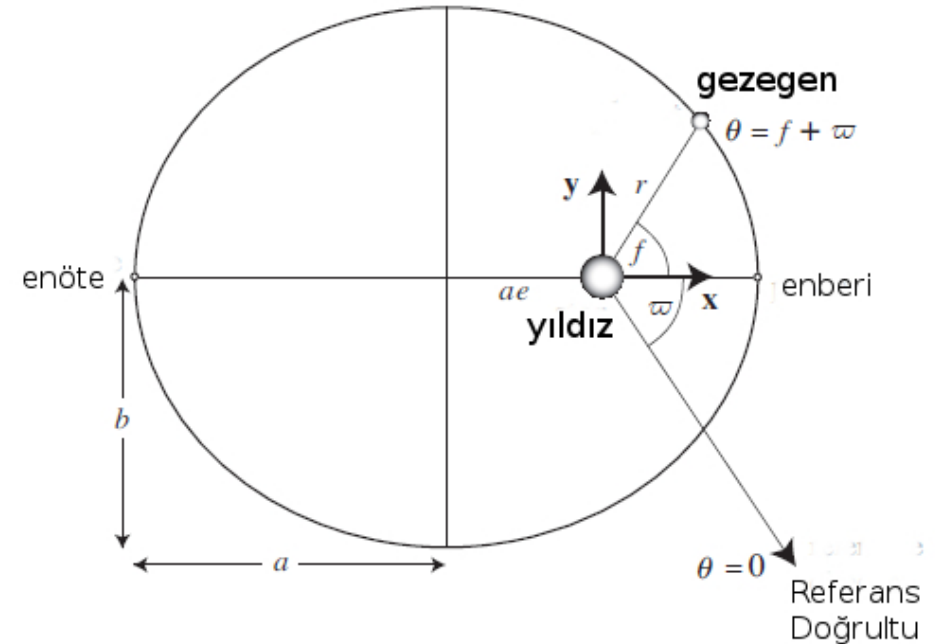
$$\ddot{\mathbf{r}} + G(m_1 + m_2) \frac{\mathbf{r}}{r^3} = 0$$

Kepler'in 1. yasası gereği elips üzerinde gerçekleşecek bu hareket denkleminin çözümü (Murray & Correia 2010) yıldız ile gezegen arasındaki uzaklığı verir.

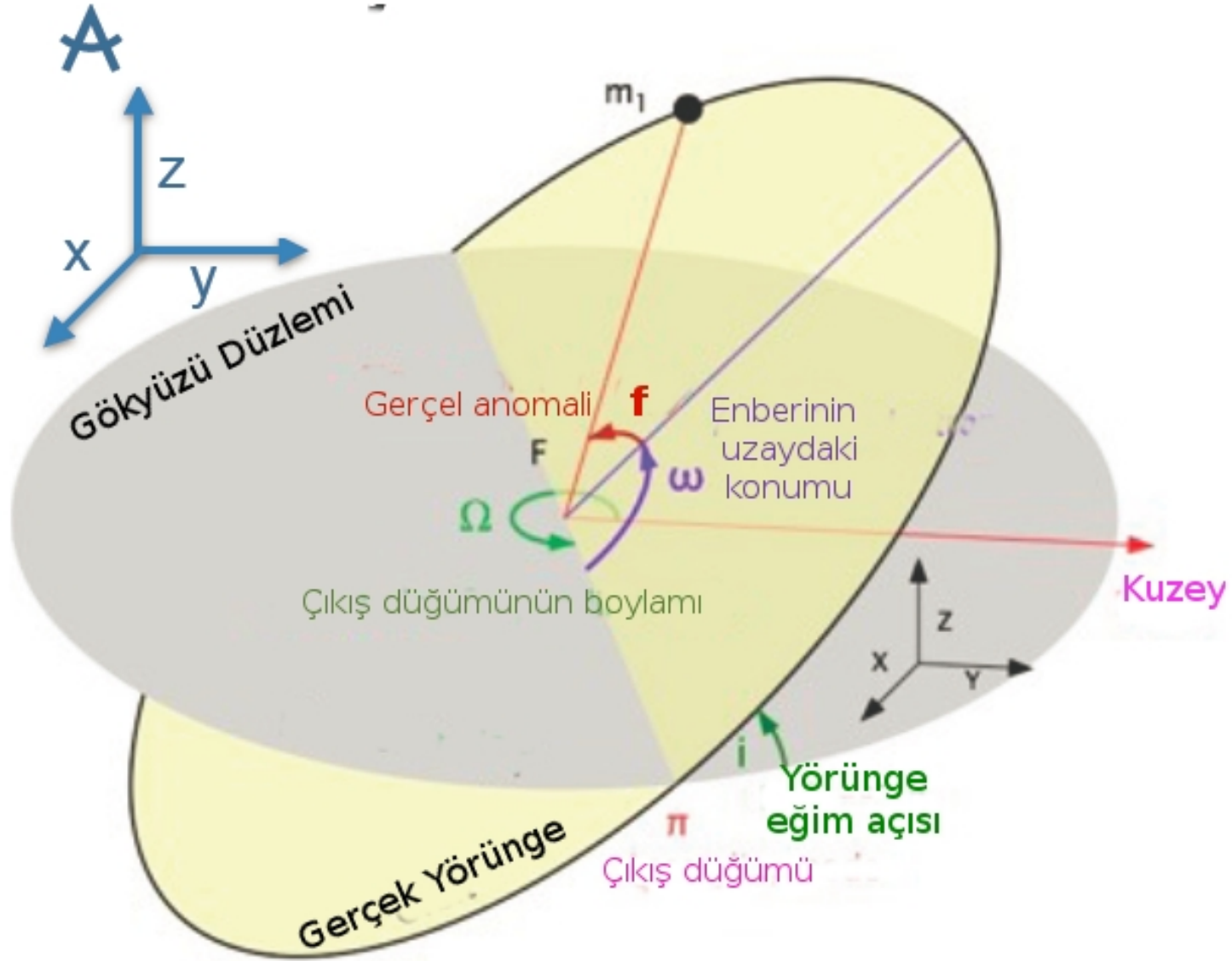
$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f}$$

Diferansiyel denklemin çözümünden gelen katsayıların geometrik karşılıkları:

$a$  : Elipsin yarı-büyük eksen uzunluğu,  
 $e$  : Elipsin dış merkezliliği,  
 $f$  : Gezegenin yörüngesinin enberi noktasından açısal uzaklığı (gerçek anomali)



# Yörünge Parametreleri



# Gökyüzünde Yıldız ile Gezegen Arası Uzaklık

3 boyutlu kartezyen koordinat sistemine (düğümler doğrultusunun +X eksenine ile çakışık olduğu varsayımıyla;  $\Omega = 180^\circ$ ) geçecek olursak

$$\begin{aligned} X &= r (\cos \Omega \cos(\omega + f) - \sin \Omega \sin(\omega + f) \cos I) & X &= -r \cos(\omega + f), \\ Y &= r (\sin \Omega \cos(\omega + f) + \cos \Omega \sin(\omega + f) \cos I) & Y &= -r \sin(\omega + f) \cos i, \\ Z &= r \sin(\omega + f) \sin I. & Z &= r \sin(\omega + f) \sin i. \end{aligned} \quad \xrightarrow{\Omega = \pi}$$

Geçiş gökyüzü düzleminde (X-Y) gerçekleştiği için cisimler arası görünen uzaklık  $r_{\text{gök}}$

$$r_{\text{gök}} \equiv \sqrt{X^2 + Y^2} \quad \longrightarrow \quad r_{\text{gök}} = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f} \sqrt{1 - \sin^2(\omega + f) \sin^2 i}$$

Geçiş  $r_{\text{gök}}$ 'ün minimumunda gerçekleşir, dolayısıyla bu ifadeyi minimize etmek gerekir. Ancak bu da çözümü oldukça uzun bir lineer cebir problemidir (Kipping 2008).



# Gezegenin Yıldızın Önünden Geçerken İzlediği Yol

İyi bir yaklaşım geçişin (gezegen önde) ve örtülmenin (yıldız önde) düğüm noktalarında gerçekleştiğini varsaymaktır ( $X = 0$ ).

$$f_{\text{geçiş}} = +\frac{\pi}{2} - \omega, \quad f_{\text{örtme}} = -\frac{\pi}{2} - \omega$$

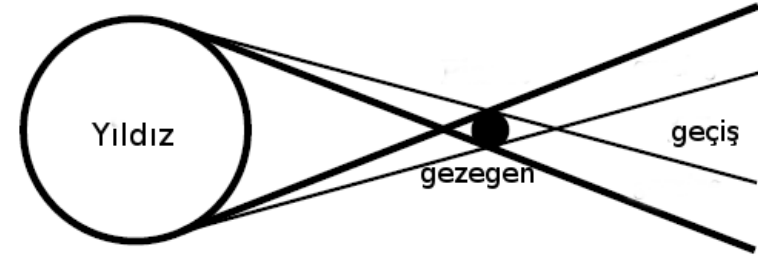
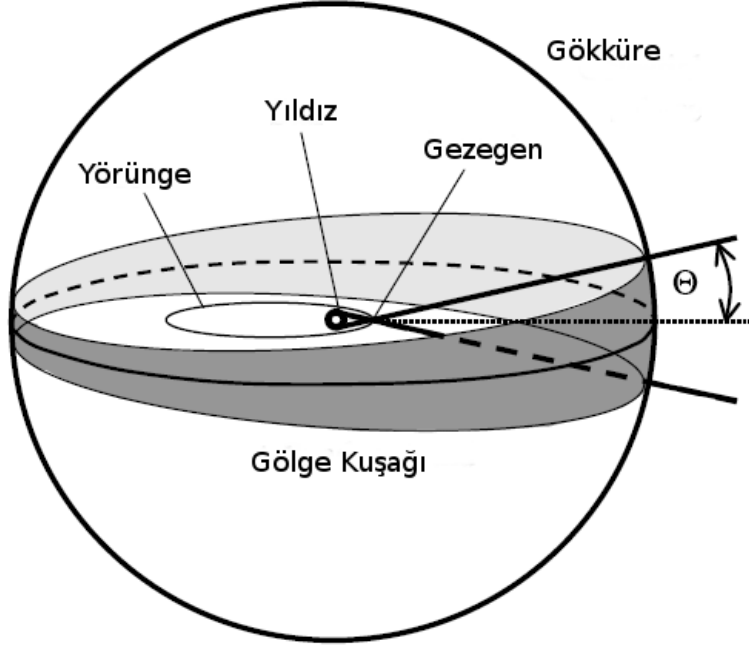
Etki parametresinin ( $b$ ) her iki durum için değeri,  $b = r_{\text{gök}} / R_{\star}$  'de  $r_{\text{gök}}$  yerine konup geçiş için  $f = \pi/2 + \omega$ , örtme için  $f = -\pi/2 - \omega$  yerine konduğunda

$$b_{\text{geçiş}} = \frac{a \cos i}{R_{\star}} \left( \frac{1 - e^2}{1 + e \sin \omega} \right)$$
$$b_{\text{örtme}} = \frac{a \cos i}{R_{\star}} \left( \frac{1 - e^2}{1 - e \sin \omega} \right)$$

$R_{\star} \ll a$  olduğu genel durum için gezegenin yıldız önünden (ya da arkasından) geçerken izlediği yol aşağıdaki şekilde bulunmuş olur.

$$X = \pm R_{\star} \sqrt{1 - b^2} \quad \text{ve} \quad Y = b R_{\star}$$

# Geçiş Olasılığı



Bir geçişin gözlenmesi için gözlemcinin tepe açısı  $\Theta$  olan koninin (penumbra) içinde olması gerekir. Dolayısı ile geçiş için  $\sin \Theta = (R_p + R_*) / r$  koşulunun sağlanması gerek.

Bu koşulun bir başka ifadesi  $|b| < 1 + k$  ile verilebilir. Bu ifade  $b = r / R_* < 1 + R_p / R_* \Rightarrow r < R_p + R_*$  ile ifade edilebilir. Geçiş ve örtme için etki parametreleri bu eşitsizlikte yerine konduğunda

$$\begin{aligned} p_{\text{geçiş}} &= \left( \frac{R_* \pm R_p}{a} \right) \left( \frac{1 + e \sin \omega}{1 - e^2} \right) \\ p_{\text{örtme}} &= \left( \frac{R_* \pm R_p}{a} \right) \left( \frac{1 - e \sin \omega}{1 - e^2} \right) \end{aligned} \quad \begin{array}{l} e = 0, R_p \ll R_* \\ \text{varsayılırsa} \end{array} \quad \longrightarrow \quad p_{\text{geçiş}} = p_{\text{örtme}} = \frac{R_*}{a} \approx 0.005 \left( \frac{R_*}{R_{\odot}} \right) \left( \frac{a}{1 \text{ AB}} \right)^{-1}$$

# Geçiş Süreleri

İki cisim probleminde hareket denklemini çözerek yıldız ve gezegen diskleri arasında gökyüzü düzlemi üzerindeki uzaklığı ( $r_{\text{gök}}$ ) gerçel anomalinin bir fonksiyonu olarak türettik. Diskler arası uzaklığı zamanın fonksiyonu olarak ifade edebilmek üzere

$$r_{\text{gök}} = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f} \sqrt{1 - \sin^2(\omega + f) \sin^2 i}$$

Ifadesini gezegen ve yıldız disklerinin içten kontakt noktaları olan II ve III noktaları için ( $r = R_* - R_p$ ) düzenlediğimizde kontakt anları için gerçel anomali değerini hesaplayabiliriz. Gerçel anomali ifadesinin II ve III. kontakt noktaları arasında integre edilmesiyle geçiş süresi ( $T_{\text{düzlük}} = t_{\text{III}} - t_{\text{II}}$ ) hesaplanır.

$$t_{\text{III}} - t_{\text{II}} = \frac{P}{2\pi\sqrt{1 - e^2}} \int_{f_{\text{II}}}^{f_{\text{III}}} \left[ \frac{r(f)}{a} \right]^2 df.$$

$r(f)$  yerine konularak yapılacak integrasyonun sonucunda

$$T_{\text{düzlük}} \equiv t_{\text{III}} - t_{\text{II}} = \frac{P}{\pi} \sin^{-1} \left[ \frac{R_*}{a} \frac{\sqrt{(1 - k)^2 - b^2}}{\sin i} \right]$$

Aynı prosedür dıştan kontakt noktaları olan I ve IV için de (bu kez ( $r = R_* + R_p$ )) takip edilirse, toplam geçiş süresi ( $T_{\text{toplam}}$ )

$$T_{\text{toplam}} \equiv t_{\text{IV}} - t_{\text{I}} = \frac{P}{\pi} \sin^{-1} \left[ \frac{R_*}{a} \frac{\sqrt{(1 + k)^2 - b^2}}{\sin i} \right]$$

Dış merkezliliği yüksek bir yörünge için geçiş başlangıcında ( $\tau_i = t_{II} - t_I$ ) ve geçiş sonunda ( $\tau_e = t_{IV} - t_{III}$ ) içten ve dıştan kontaktlar arasındaki süre, eliptik yörünge üzerinde hızın sabit olmaması nedeniyle eşit olmaz.

$$\frac{\tau_e - \tau_i}{\tau_e + \tau_i} \sim e \cos \omega \left( \frac{R_\star}{a} \right)^3 (1 - b^2)^{3/2}$$

$R_\star / a = 0.2$  olan bir sıcak Jüpiter için bu oran 0.01 e 'den daha küçüktür. Daha uzak bir gezegen için daha da küçük olacağı açıktır. Geçiş gözlemlerindeki fotometrik duyarlılık ve zaman çözünürlüğü genellikle bu düzeyde bir farkı belirlemek için yeterli olmaz.

Sonuç olarak  $e \rightarrow 0$ ,  $R_p \ll R_\star \ll a$  varsayılır ve sıyrarak geçen (grazing) geçişler ( $b \ll 1 - k$ ) hariç tutulursa;  $T_0$  karakteristik zaman ölçeğini göstermek üzere,

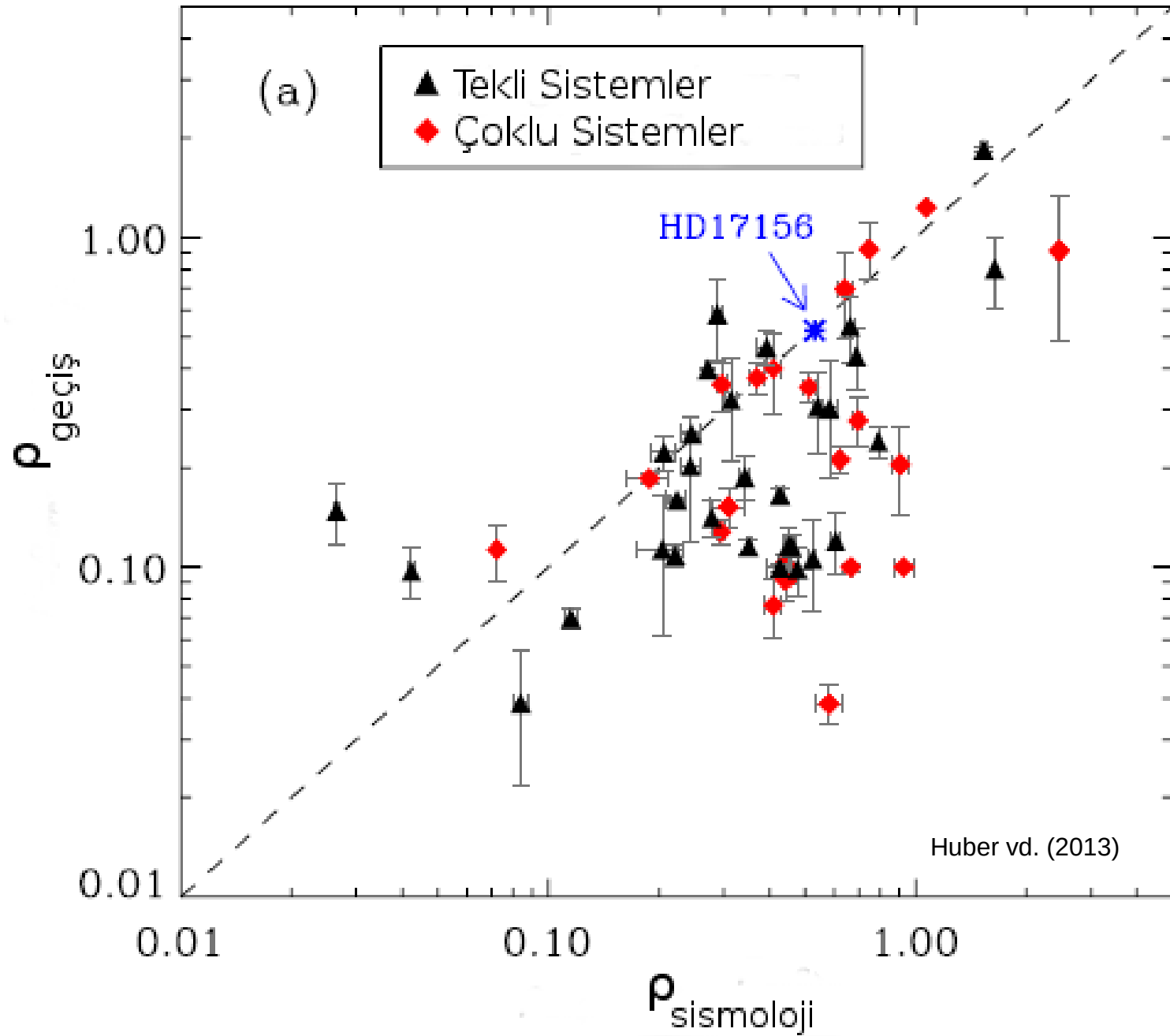
$$T \approx T_0 \sqrt{1 - b^2}, \quad \tau \approx \frac{T_0 k}{\sqrt{1 - b^2}}$$

Güneş birimlerinde ifade edilir ve Kepler'in III. yasası kullanılarak ifade yeniden düzenlenirse karakteristik zaman ölçeği

$$T_0 \equiv \frac{R_\star P}{\pi a} \approx 13 \text{ saat} \left( \frac{P}{1 \text{ yıl}} \right)^{1/3} \left( \frac{\rho_\star}{\rho_\odot} \right)^{-1/3} \quad \text{ya da} \quad \langle \rho_\star \rangle \approx \frac{3\pi}{GP^2} \left( \frac{a}{R_\star} \right)^3 \quad \text{Seager \& Mallen-Ornelas 2003}$$

Dış merkezliliği yüksek bir yörünge için bu ifadeyi  $\frac{\sqrt{1 - e^2}}{1 \pm e \sin \omega}$  ile çarpmak gerekir!

Geçiş gözlemleriyle elde edilecek ilk temel parametre barınak (host) **yıldızın yoğunluğu ( $\rho_\star$ )** olarak görünmektedir! “





# **Geçiş Gözlemlerinden Gezegen Parametrelerine...**

# Işık Kaybı

Sistemden alınan akının zamana göre değişim  $F(t) = F_{\star}(t) + F_p(t) - \begin{cases} k^2 \alpha_{\text{geçiş}}(t) F_{\star}(t) & \text{geçiş sırasında} \\ 0 & \text{tutulmalar dışında} \\ \alpha_{\text{örtme}}(t) F_p(t) & \text{örtme sırasında} \end{cases}$

$I_p$  ve  $I_{\star}$  sırasıyla gezegen ve yıldızın diskin tümü üzerinden entegre akıları,  $f(t) = F(t) / F_{\star}$  ve  $F_p / F_{\star} = k^2 I_p / I_{\star}$  olmak üzere,

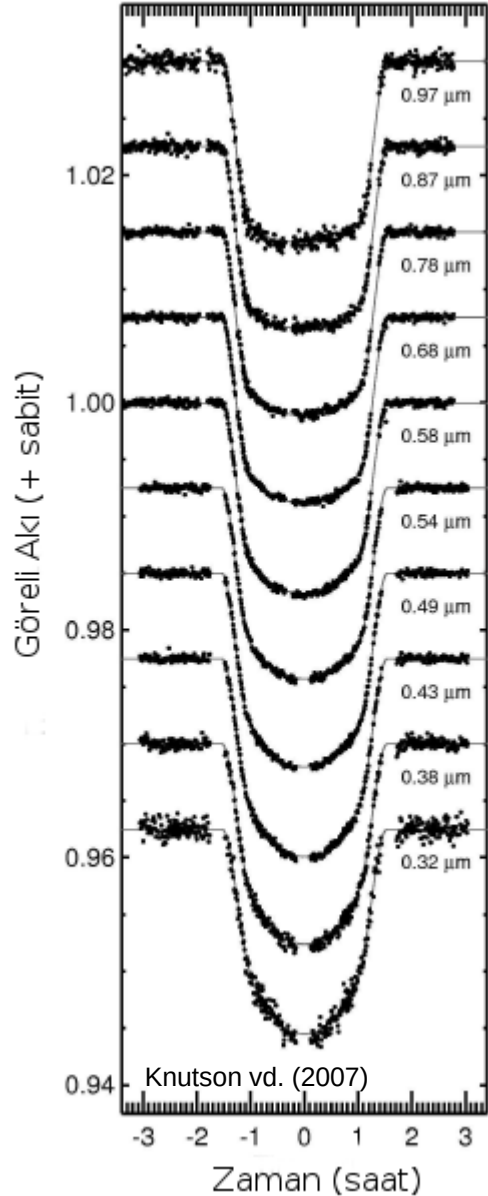
$$f(t) = 1 + k^2 \frac{I_p(t)}{I_{\star}} - \begin{cases} k^2 \alpha_{\text{geçiş}}(t) & \text{geçiş sırasında} \\ 0 & \text{tutulmalar dışında} \\ k^2 \frac{I_p(t)}{I_{\star}} \alpha_{\text{örtme}}(t) & \text{örtme sırasında} \end{cases}$$

$I_p$ 'nin zamanla değişmesinin nedeni gezegen diskinin Dünya'daki gözlemciye ışık yansıtan yüzeyinin yörünge boyunca evreyle değişimi ve gezegen atmosferindeki değişimlerdir. Bir geçiş süresi boyunca  $I_p$ 'nin değişmediği (ya da değişiminin gözlenemeyeceği) varsayılırsa ışık kaybı tamamen  $\alpha$  fonksiyonlarına bağlı hale gelir.

$\alpha$  bir yamuk fonksiyonu (trapezoid) olarak kabul edilir,  $f(t)$  de  $\delta$  (derinlik ya da kontrast) parametresi ile ifade edilecek olursa,

$$\delta_{\text{geçiş}} \approx k^2 \left[ 1 - \frac{I_p(t_{\text{geçiş}})}{I_{\star}} \right] \xrightarrow{I_p \rightarrow 0} \delta_{\text{geçiş}} \approx k^2 \quad \text{Örtme için: } \delta_{\text{örtme}} \approx k^2 \frac{I_p(t_{\text{örtme}})}{I_{\star}}$$

# Kenar Kararması



Kenar kararması geçiş derinliğinin yıldız diskinin merkez doğrultusunda  $k^2$  'den büyük, diskin kenarında ise  $k^2$ 'den küçük olarak gözlenmesine neden olur.

Kenar kararması kaynaklı yeğînlîk profili

- ✓  $I_\mu = I_0 [1 - u(1 - \mu)]$  Lineer (Russell 1912)
- ✓  $I_\mu = I_0 [1 - u_q(1 - \mu) - u_q(1 - \mu)^2]$  Kuadratik (Kopal 1950)
- ✓  $I_\mu = I_0 [1 - u_c(1 - \mu) - u_c(1 - \mu)^3]$  Kübik (van't Veer 1960)
- ✓  $I_\mu = I_0 [1 - u_s(1 - \mu) - u_s(1 - \sqrt{\mu})]$  Karekök (Diaz-Cordoves, Gimenez 1992)
- ✓  $I_\mu = I_0 [1 - u_l(1 - \mu) - u_l \mu \ln \mu]$  Logaritmik (Kinglesmith & Sobieski 1970)
- ✓  $I_\mu = I_0 [1 - \sum u_{d,k} (1 - \mu^{k/2}), k=1,2,3,4]$  Dört sabitli (Claret 2000)

Burada  $u_1$  ve  $v$  yıldız atmosferi modellerinden teorik (hassas olmayan fotometrik veri için) ya da hassas geçiş gözlemlerinden empirik olarak türetilebilecek sabitlerdir.



# Mutlak Parametreler - I

1. Yarıçap ( $R_p$ ): Geçiş derinliğinden (kontrast) görelî ( $k = \sqrt{\delta} = R_p / R_*$ ) büyüklüğe geçilir.
2. Kütle ( $M_p$ ): Kütleye geçebilmek için ise dikine hız yarı genliğine ( $K$ ) ihtiyaç duyulur.

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

Bir geçiş için  $\sin i \sim 1$  olduğundan dikine hızdaki  $M_p \sin i$  problemi ortadan kalkar. Ancak  $M_p \ll M_*$  alınsa dahi elde edilen  $M_p / M_*^{2/3}$  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 kullanılabilir.

3. Etki Parametresi ( $b$ ): Sadece gözlenebilir nicelikler cinsinden hesap edilebilir ( $R_p \ll R_*$  kabul edilerek)

$$b^2 = \frac{(1 - \sqrt{\delta})^2 - (T_{\text{düzük}}/T_{\text{toplâm}})^2(1 + \sqrt{\delta})^2}{1 - (T_{\text{düzük}}/T_{\text{toplâm}})^2}$$

# Mutlak Parametreler - II

4. Yörünge Büyüklüğüne Ölçeklendirilmiş Yıldız Yarıçapı ( $R_*/a$ ): Dikine hız gözlemlerinden gelen  $e$  ve  $w$  da kullanılarak elde edilebilir.

$$\frac{R_*}{a} = \frac{\pi}{2\delta^{1/4}} \frac{\sqrt{T_{\text{düzük}}^2 - T_{\text{toplam}}^2}}{P} \left( \frac{1 + e \sin \omega}{\sqrt{1 - e^2}} \right)$$

## $R_*/a$ (ve $R_p/a$ ) Oranını Belirlemenin Önemi:

1. Bu oranlar yıldızla gezegen arasındaki tedirginlik kuvvetlerinin ne derece etkili olabileceğini gösterir.
2.  $R_p/a$  oranı yıldızın ışığının hangi oranda gezegenin yüzeyine ulaştığını da belirler.

5. Ortalama Yıldız Yoğunluğu ( $\rho_*$ ):  $R_*/a$  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).

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

# Mutlak Parametreler - III

**Basitleştirme:**  $\tau \ll T$  olduğu varsayılırsa (ki bu gezegenin çok büyük olmadığı ya da sıyrarak geçtiği zamanların dışında iyi bir varsayımdır) ifadeler daha da sadeleşir.

$$b^2 = 1 - \sqrt{\delta} \frac{T}{\tau},$$
$$\frac{R_{\star}}{a} = \frac{\pi}{\delta^{1/4}} \frac{\sqrt{T\tau}}{P} \left( \frac{1 + e \sin \omega}{\sqrt{1 - e^2}} \right)$$

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

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

# Mutlak Parametreler - IV

7. **Gezegenin Yüzey Çekim İvmesi ( $g_p$ ):** 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.

$$K = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \frac{na \sin I}{\sqrt{1 - e^2}} \longrightarrow g_p = \frac{2\pi \sqrt{1 - e^2} K_\star}{P (R_p/a)^2 \sin i}$$

7. **Gezegenin Denge Sıcaklığı ( $T_{eq}$ ):** Gezegen yüzeyi boyunca sıcaklığın izotropik dağıldığı varsayılarak belirlenen yüzey sıcaklığıdır.  $A_B$ : Bond albedosu,  $f$ : Isı dağılım parametresi (Sheets ve Deming 2014),  $T_{eff}$ : Yıldızın etkin sıcaklığı olmak üzere aşağıdaki ifadeyle verilir.

$$T_{eq} = T_{eff} \left( \frac{R_A}{a} \right)^{1/2} \left( f(1 - A_B) \right)^{1/4}$$

Pratik bir yaklaşım  $f(1 - A_B) = 1$  varsaymaktır. Bu durumda aşağıdaki basit ifade elde edilir.

$$T_{eq} = r_A^{1/2} T_{eff}$$

# Geçiş Zamanları

Geçiş periyodu, genellikle geçiş yöntemiyle gezegen “avlayan” araştırmalar tarafından 3 geçiş sounda duyarlı olarak belirlenir. Duyarlılık her bir geçiş (ya da örtme) gözlemi sonrası daha da artar. Zira bu zamanlar  $n$ , gözlem sayısını göstermek üzere lineer olarak artar.

$$t_c[n] = t_c[0] + nP,$$

Bu ilişki sonucu hesaplanan geçiş zamanları Güneş Sistemi'nin kütle merkezine indirgenerek Dünya'nın hareketinden, dinamik zaman kullanılarak ışık-zaman etkilerinden arındırılmalıdır (BJD-TDB).

**Geçiş Zamanları Değişimi (GZD) (Transit Timing Variations (TTV)):** Yörünge başka etkiler (ek cisimlerin varlığı, dönme ya da tedirginlik etkileri kaynaklı küresel simtetrinden uzaklaşmalar, genel görelilik etkileri gibi) nedeniyle aynı elipsi sürekli olarak izlemediği takdirde geçiş ve örtme zamanlarında, bu zamanların arasında ve geçiş ışık eğrisinin şeklinde değişim () gözlenir.

Bu değişimler presesyon durumunda parametrelerin yavaş bir şekilde değişimi (Miralda-Escude 2002), ek cisimlerin varlığında kısa dönemli değişimler (Holman & Murray 2005, Agol vd. 2005) olarak gözlenir. İkinci türden etkiler özellikle geçişi gözlenen gezegenin yörüngesiyle rezonans durumunda bir yörüngeye sahip ek bir bileşen için büyük olabilmektedir. (bkz. Ekrem Murat Esmer'in bildirisi).

# Geçiş Tayfölcümü

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.  $R_p$  gezegenin tüm dalgaboylarında opak olan yarıçapını tanımlamak üzere, gezegenin optik ince atmosferi kaynaklı ekstra donukluk yarıçapı aşağıdaki şekilde değişir.

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

- H : Gezegen atmosferindeki ölçek yüksekliği (scale height),  
N<sub>H</sub> : Yıldız ışığının içinden geçtiği ölçek yüksekliği sayısı  
T : Gezegenin yüzey sıcaklığı (T),  
M<sub>m</sub> : 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.

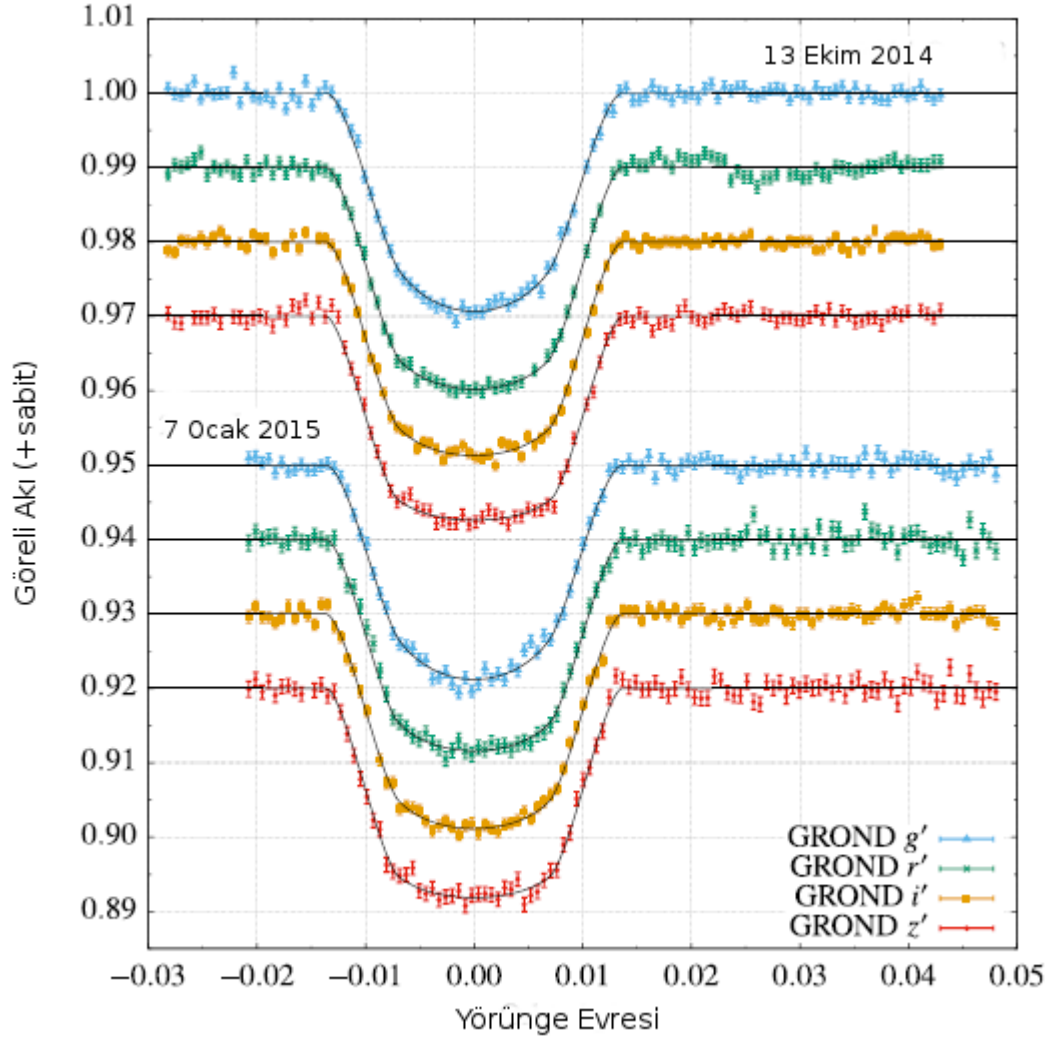
## Tipik sıcak-Jüpiter

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

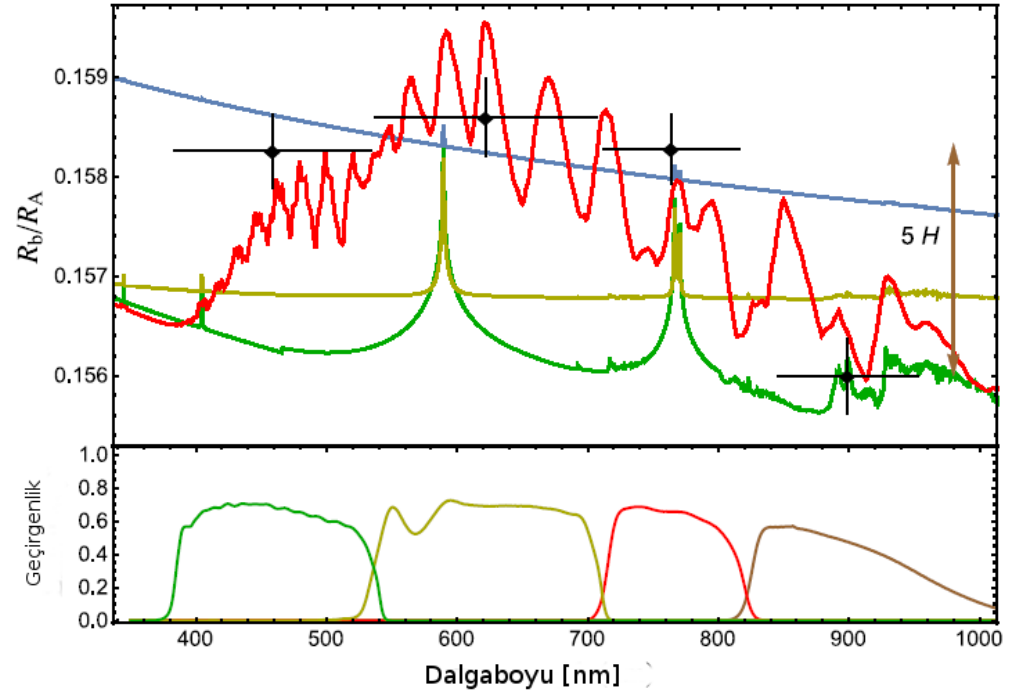
## Yer-benzeri

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

# Geçiş Tayfölcümü

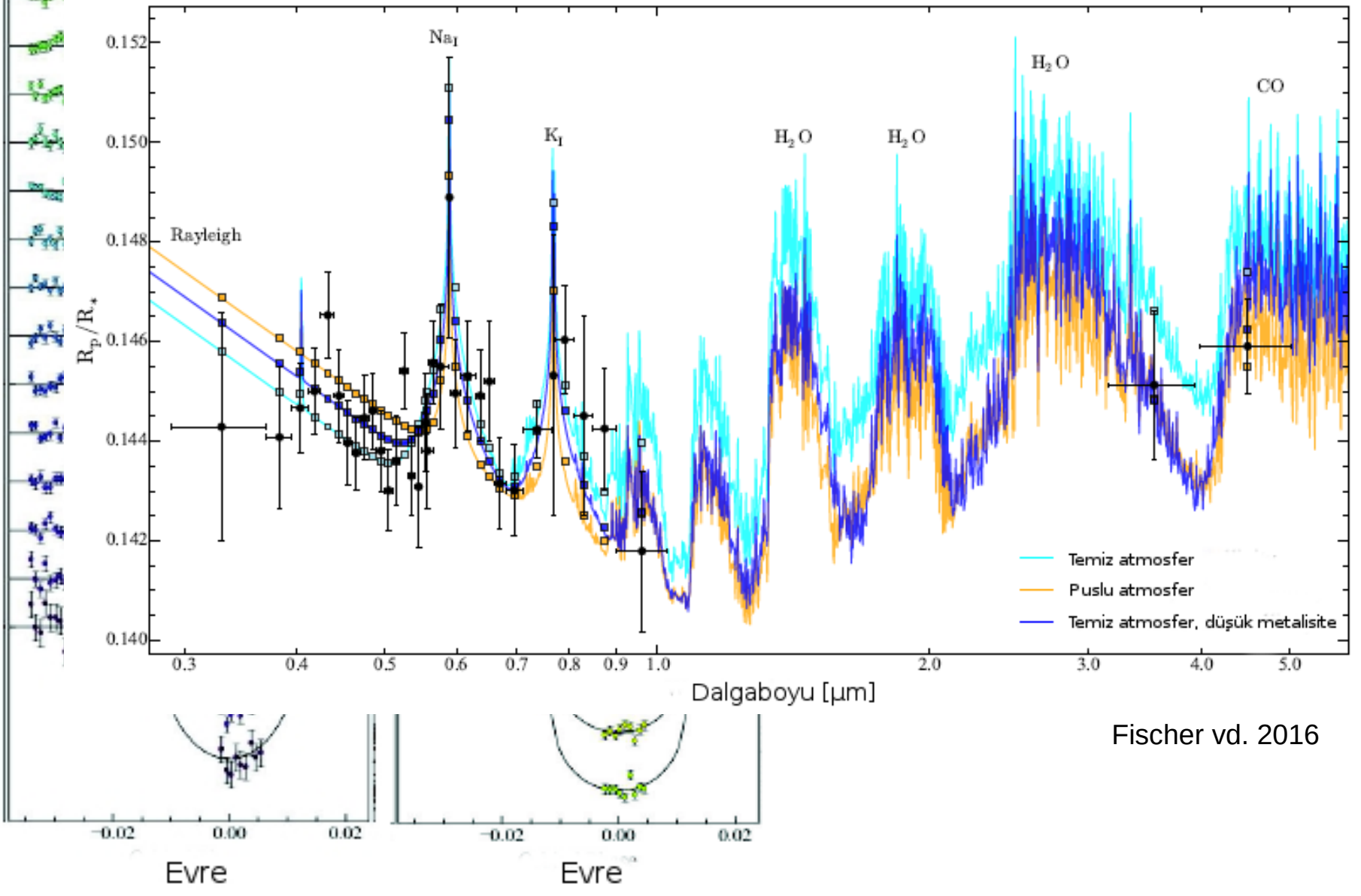
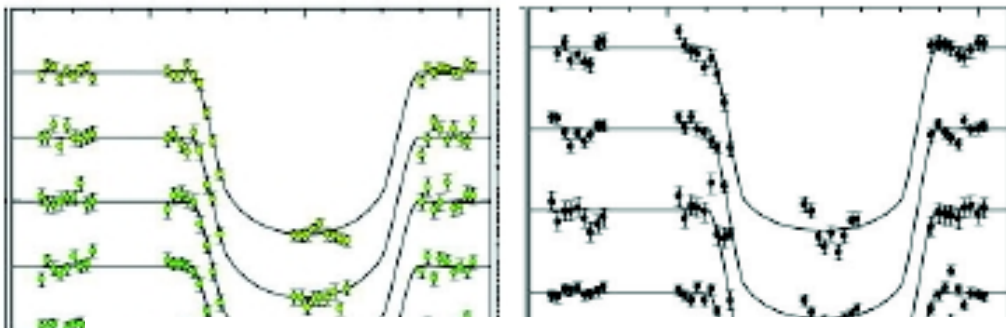


Solda. WASP-98b'nin İki farklı tarihte yapılmış çok bant GROND gözlemleri (Mancini & Southworth 2016)



Sağda.  $k$  ( $R_b / R_A$ ) 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

Görel Akı (+sabit)



Fischer vd. 2016



# Gezegen Geçişleri ve Yörünge Eğimleri

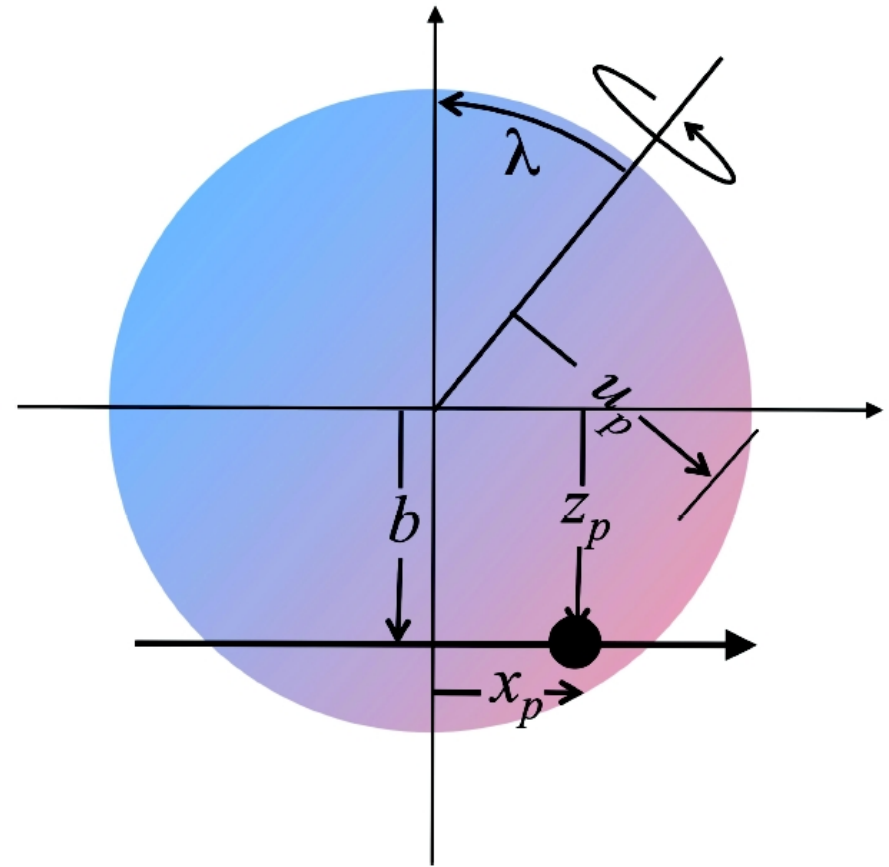
sıcak-Jüpiterler ( $M_p > 0.3 M_{jüp}$ ,  $P_{yör.} < 10^{gün}$ )

1. "buz çizgisinin" ötesinde oluşmalı
2. Peki buldukları yere nasıl geldiler?
  - Öngezegen diskleri içinde içe doğru düzenli göç (Goldreich ve Tremaine 1980),
  - 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 ( $\Psi$ ) bu parametrelerden en önemlisidir. Dolaysıyla bu açıyı (ya da gökyüzündeki izdüşümünü,  $\lambda$ ) belirlemek, gezegen oluşum senaryolarının testi açısından önem taşır (Mancini ve Southworth (2016)).

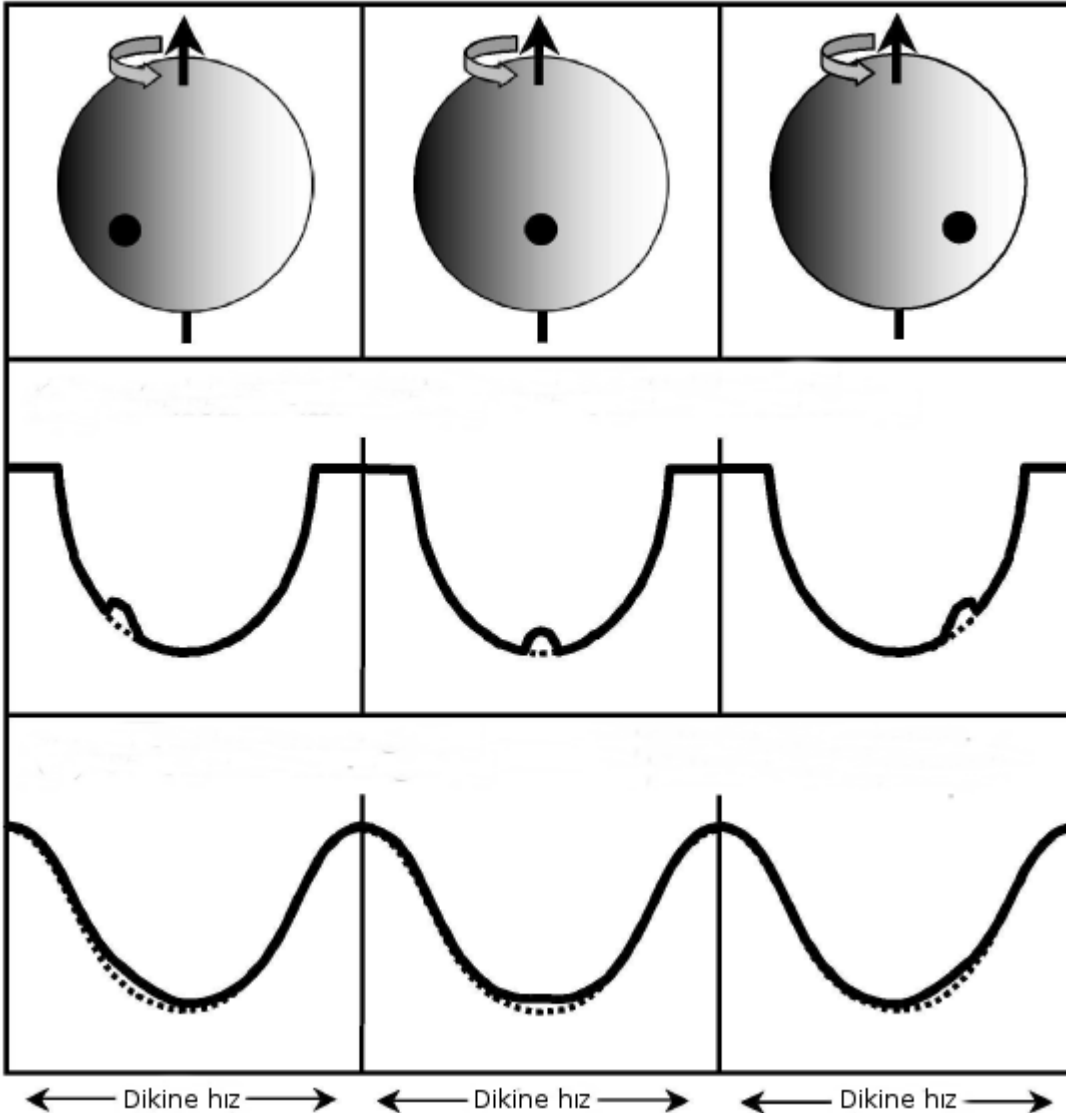
Bu açıyı gezegen geçişleri sırasında

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



# Geçiş Tayf Ölçümü Gözlemleri:

## Rossiter-McLaughlin Etkisi ve Doppler Tomografi



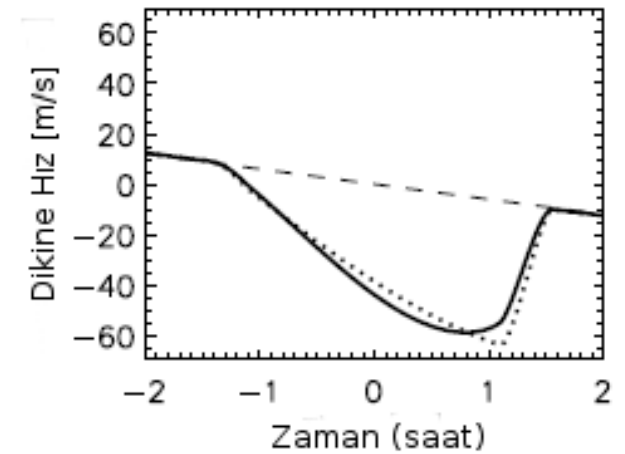
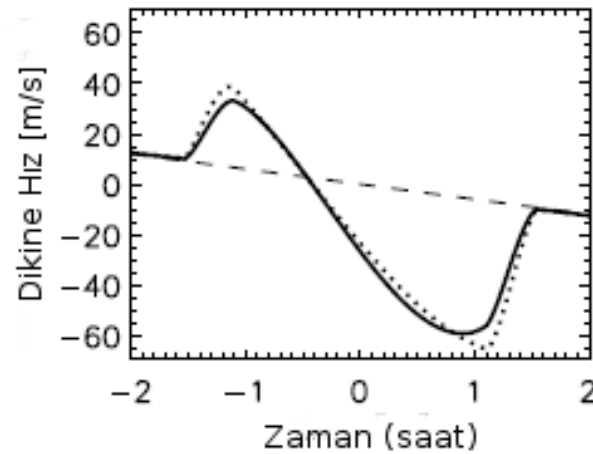
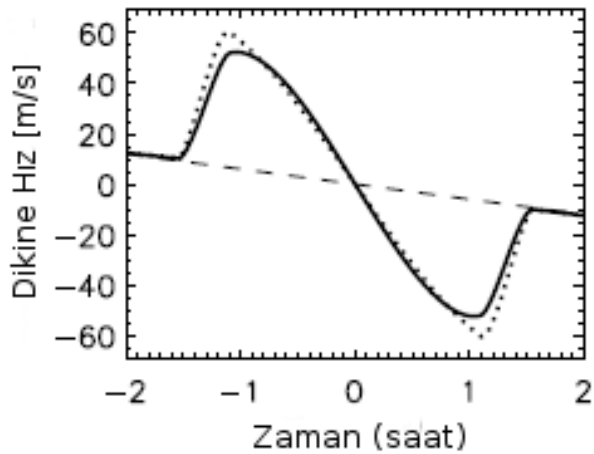
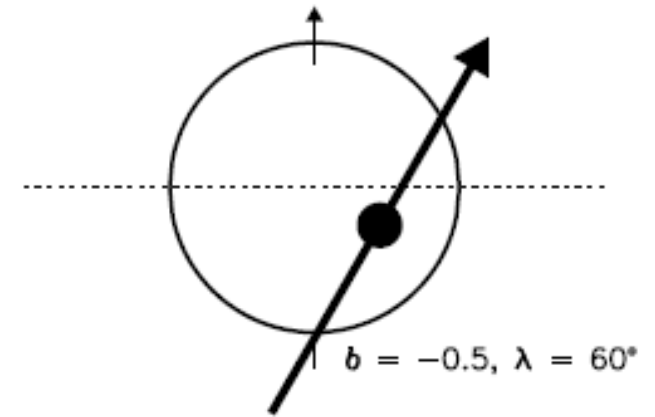
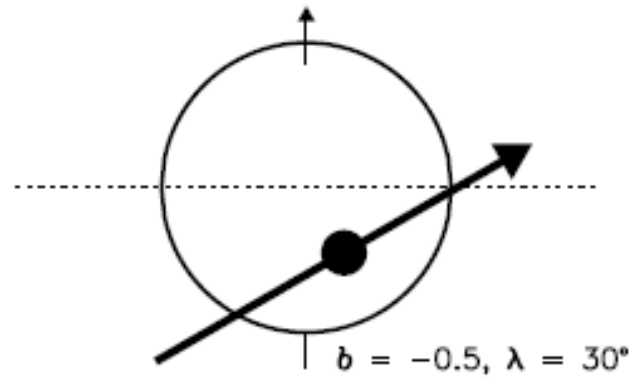
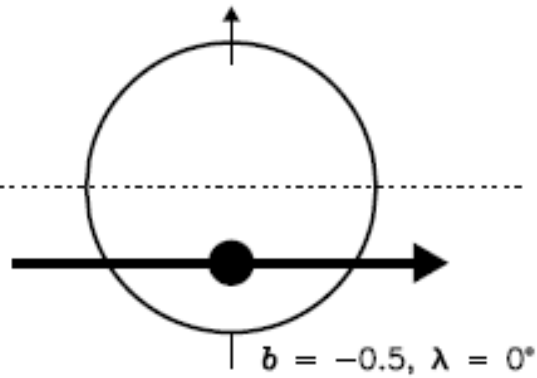
Her iki etki de gezegen diskinin dönen yıldız diski üzerinde kapattığı alanın neden olduğu tayfsal çizgi profil bozulmalarının sonuçlarını belirlemeye dayanır.

$v_* \sin i_*$ , yıldızın dönme hızının radyal doğrultudaki bileşenini göstermek üzere; Rossiter-McLaughlin etkisinin düzeyi,

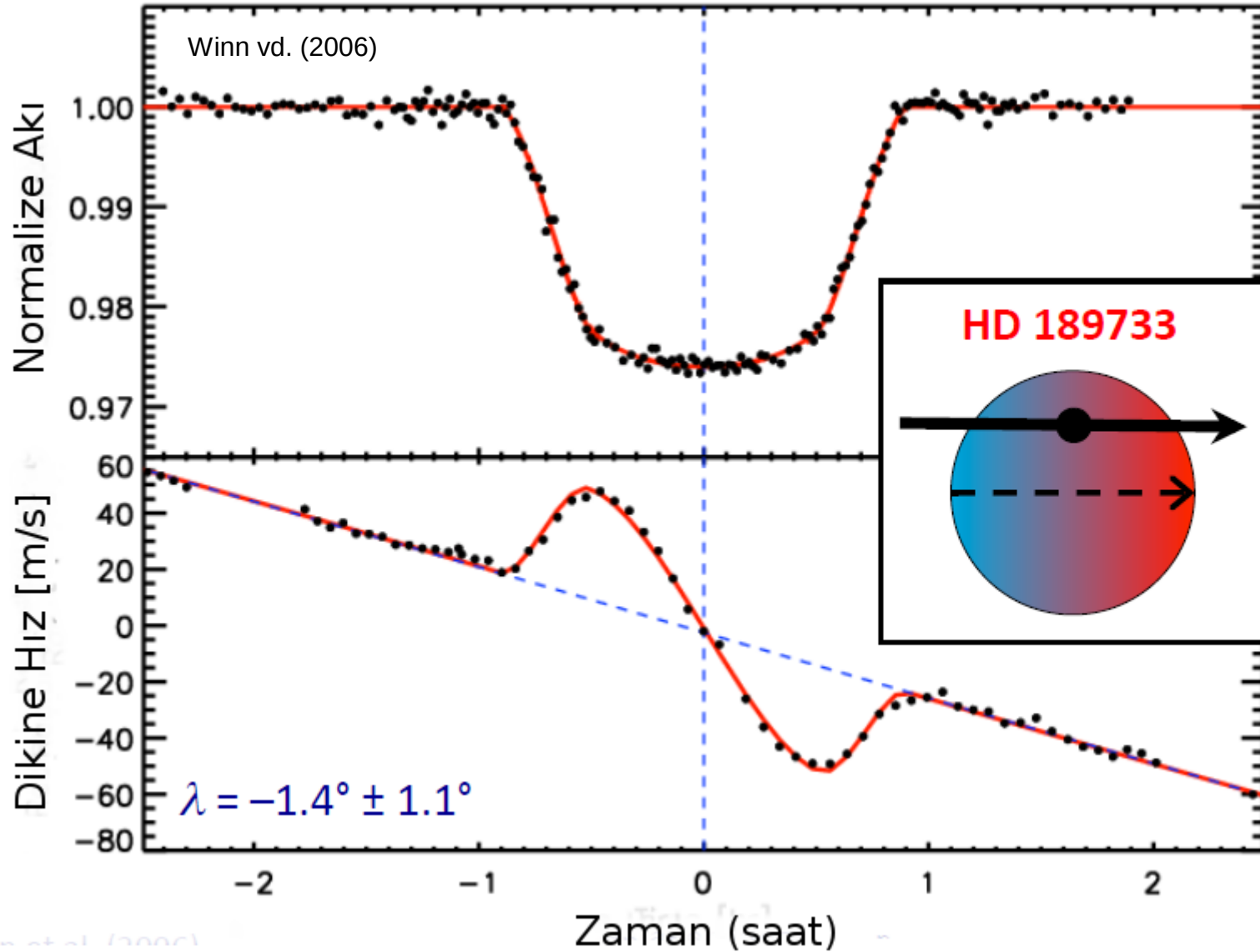
$$\Delta V_{RM} \approx k^2 \sqrt{1 - b^2} (v_* \sin i_*)$$

Güneş-benzeri bir yıldızı için ( $v_* \sin i_* \approx 2$  km/s) Jüpiter büyüklüğünde bir gezegenin neden olacağı RM-etkisinin maksimum büyüklüğü 20 m/s civarında iken, Dünya büyüklüğünde bir gezegen için bu etki 0.2 m/s kadardır.

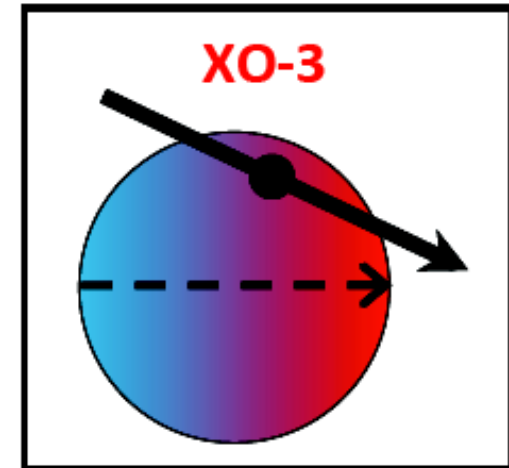
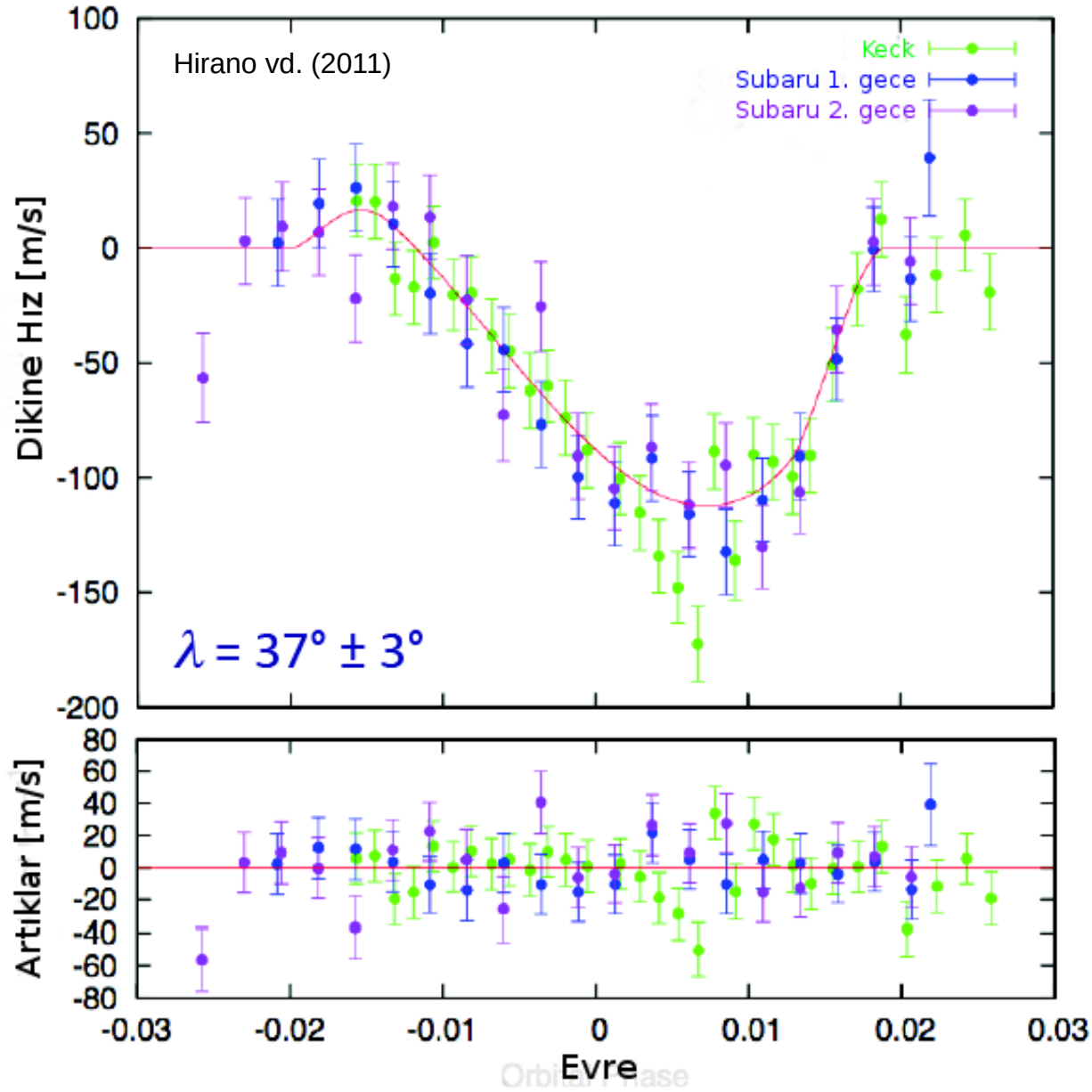
# Rossiter – McLaughlin Etkisi



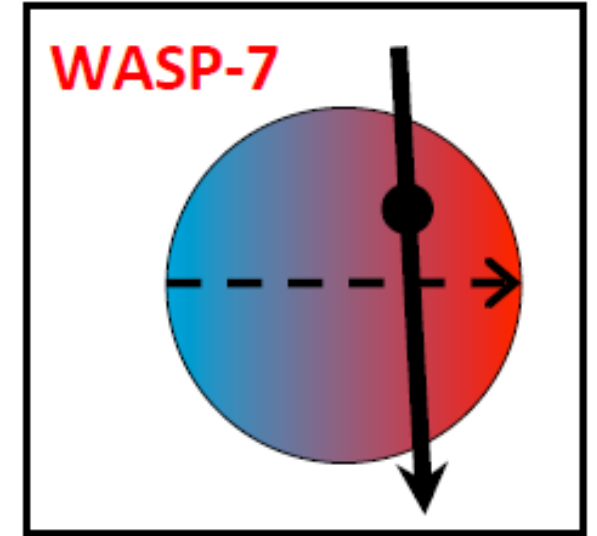
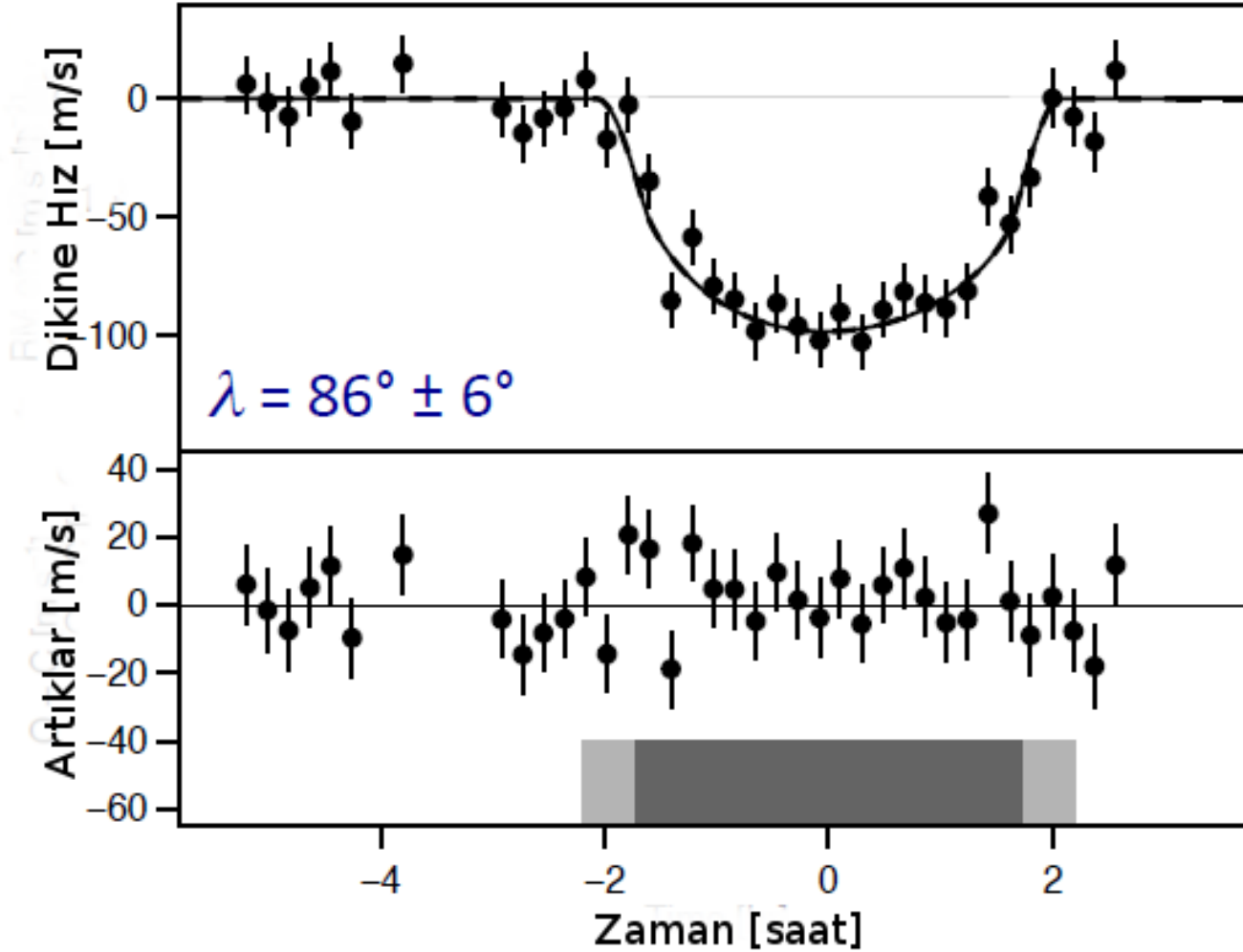
# Yıldızın Dönme Ekseniniyle Hizalı Yörünge



# Yıldızın Dönme Eksenine Eğik Yörünge

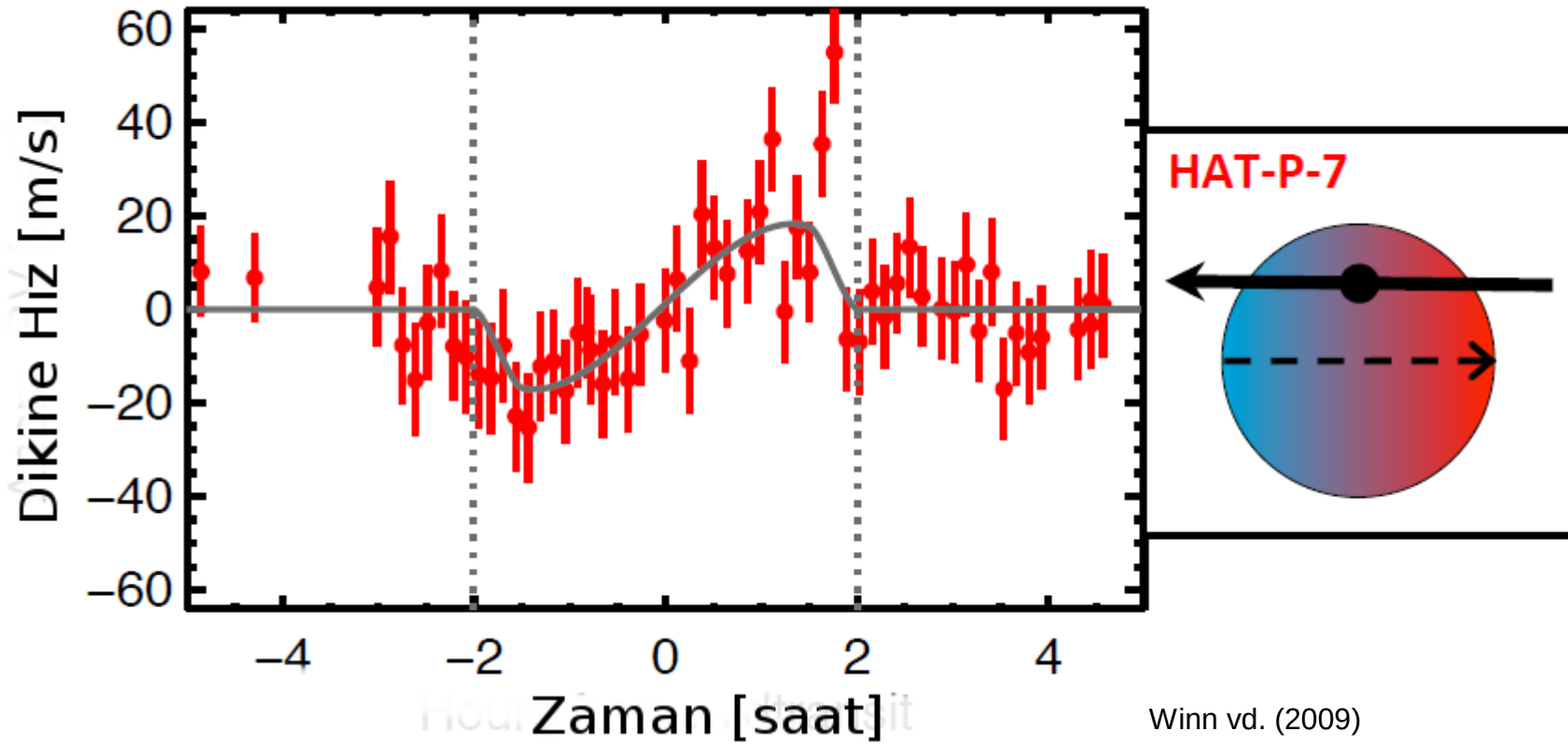


# Yıldızın Dönme Eksenine Dik Yörünge



Albrecht vd. (2011)

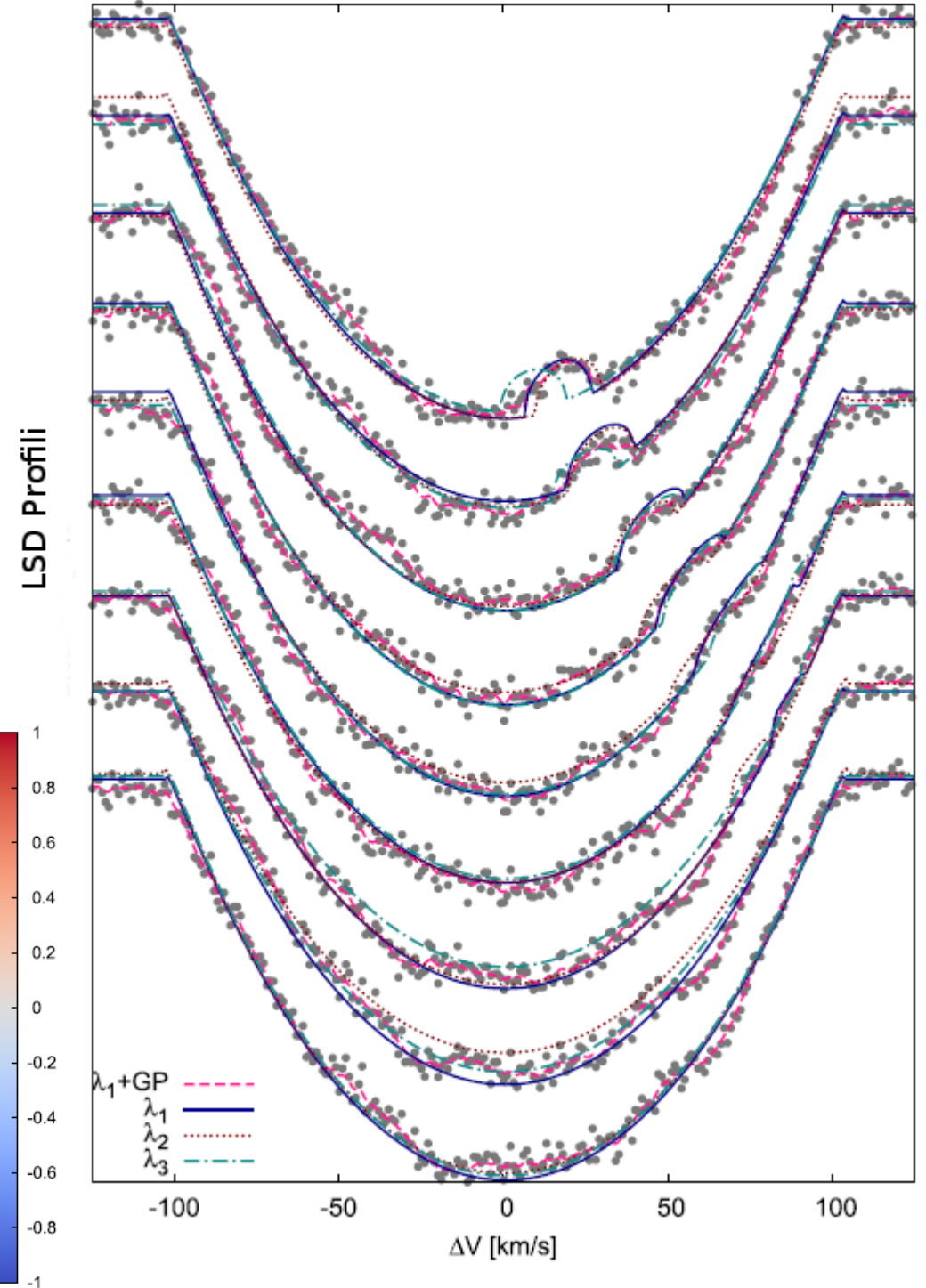
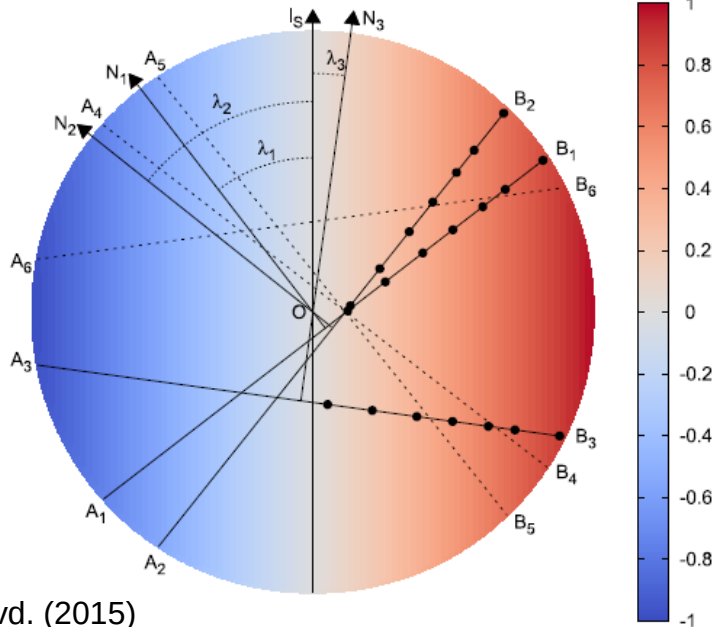
# Retrograd Yörünge



# Doppler Tomografi

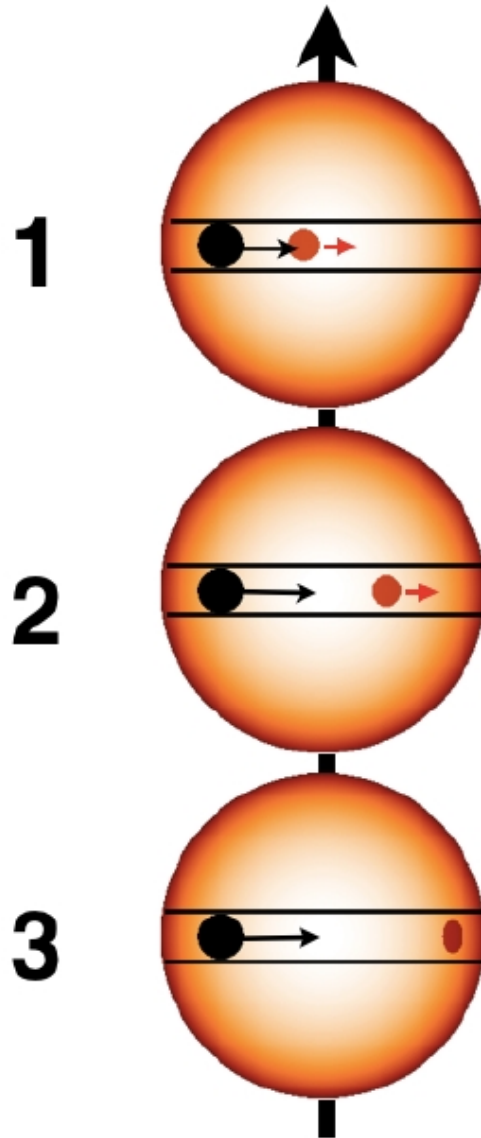
LSD (En Küçük Kareler Tersevrışim) yöntemiyle gezegenin neden olduğu profil bozulmasının doğrudan belirlenmesine dayanır. Yöntemin güçlüğü gezegen geçişi sırasında çok sayıda yüksek tayfsal çözünürlüklü tayfının alınmasının gerekliliğine dayanır.

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



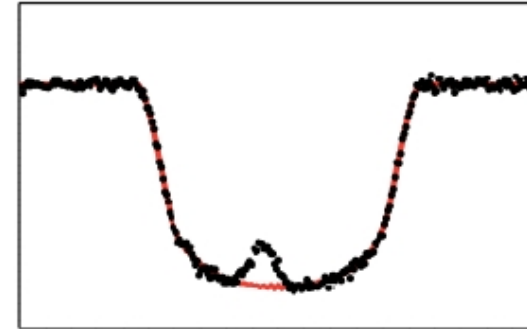


# Gezegen Geçişlerinde Leke Bölgesi Gözlemleri - I

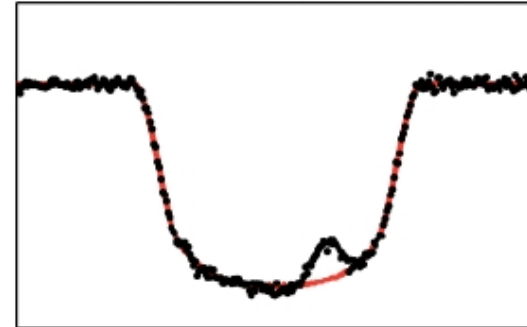


$$P_{\text{yör.}} / P_{\text{dön.}} = 0.1$$

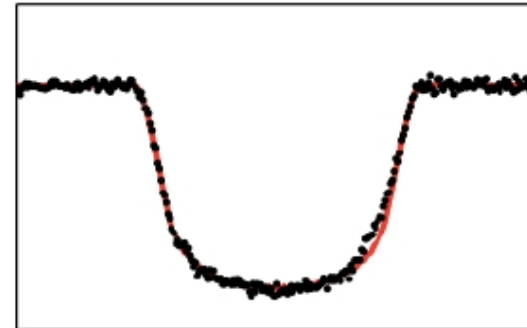
Görelî Akı



Görelî Akı

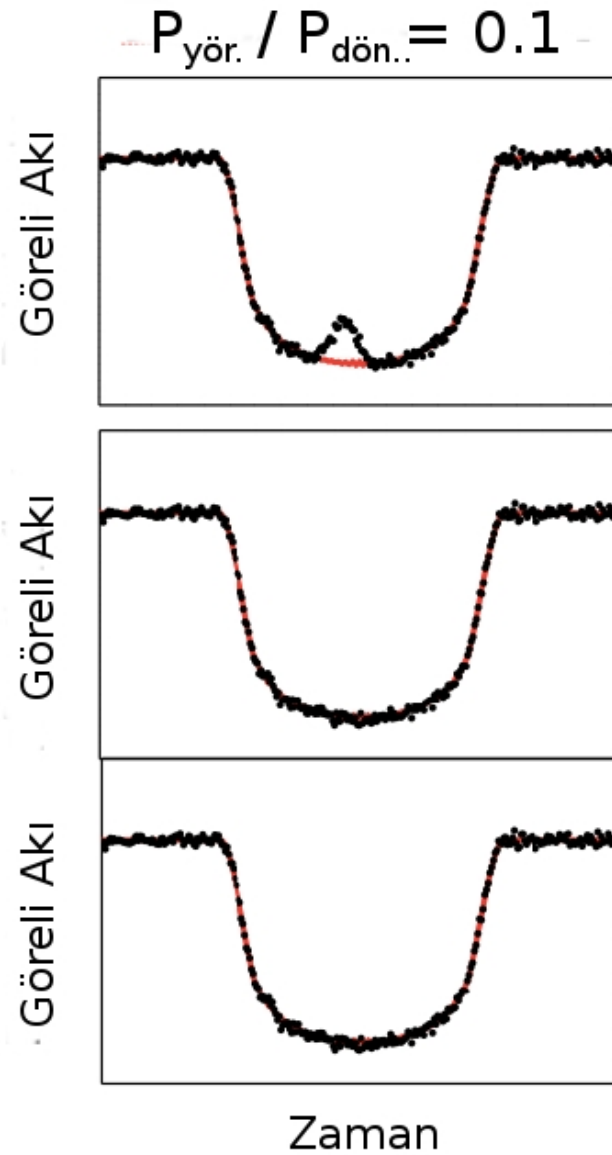
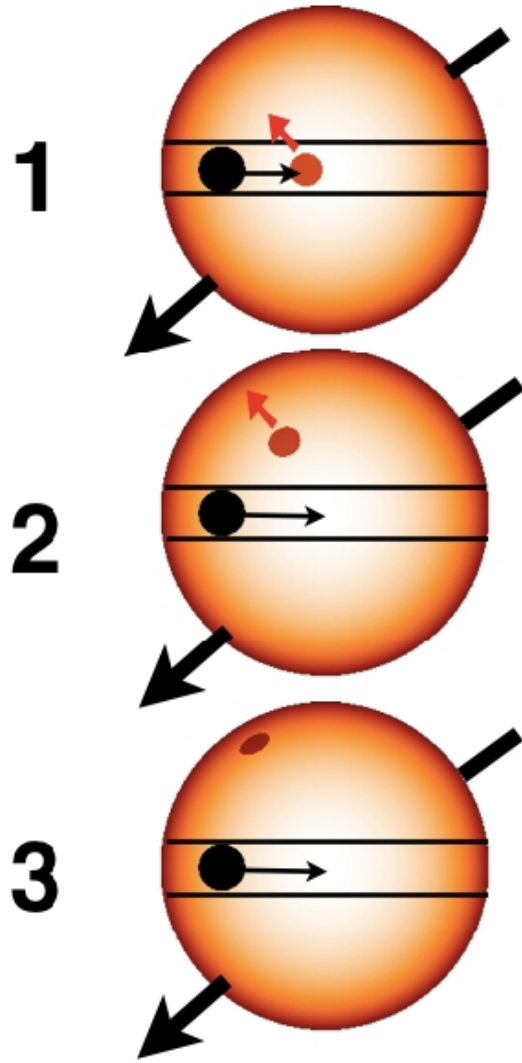


Görelî Akı

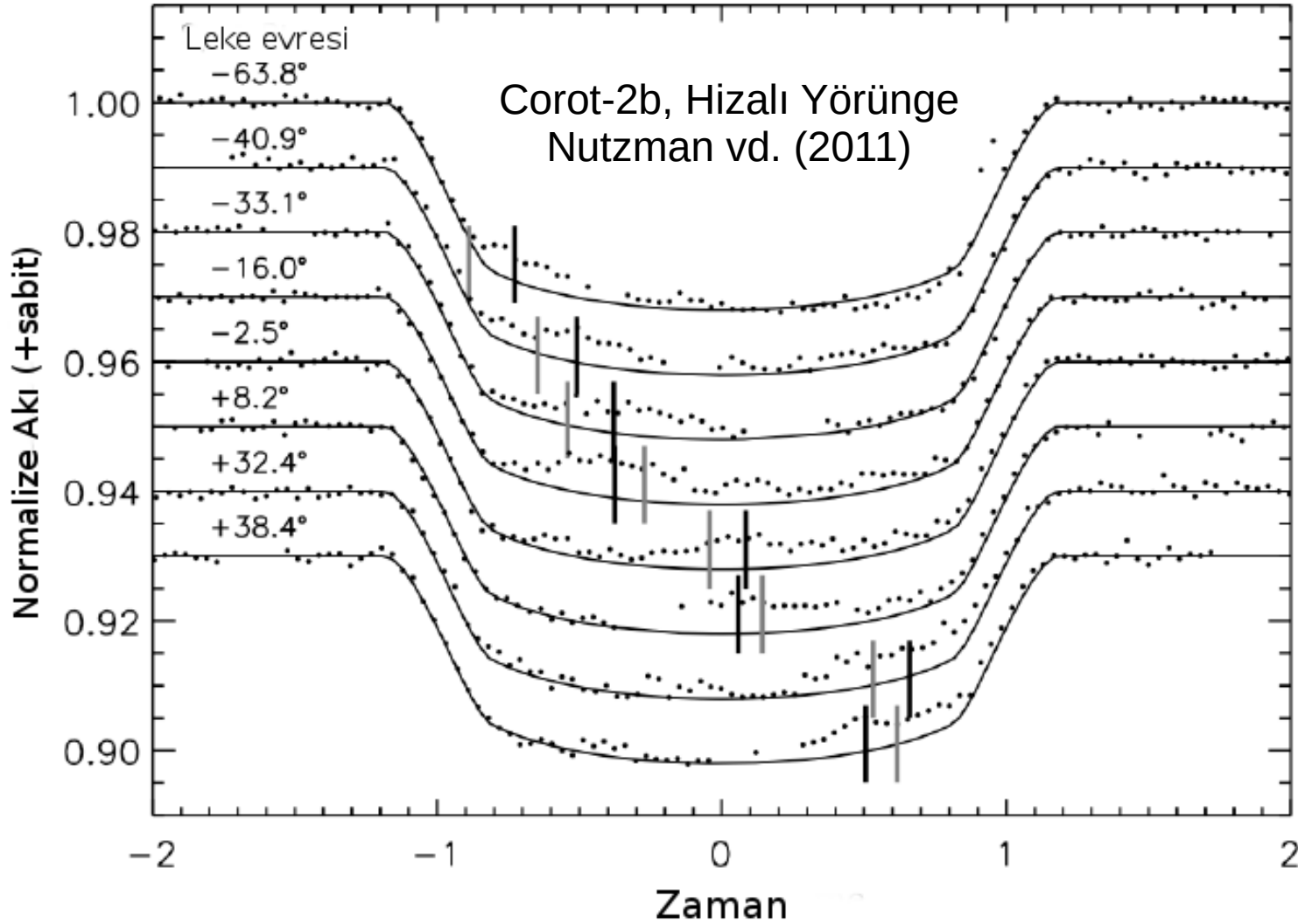


Zaman

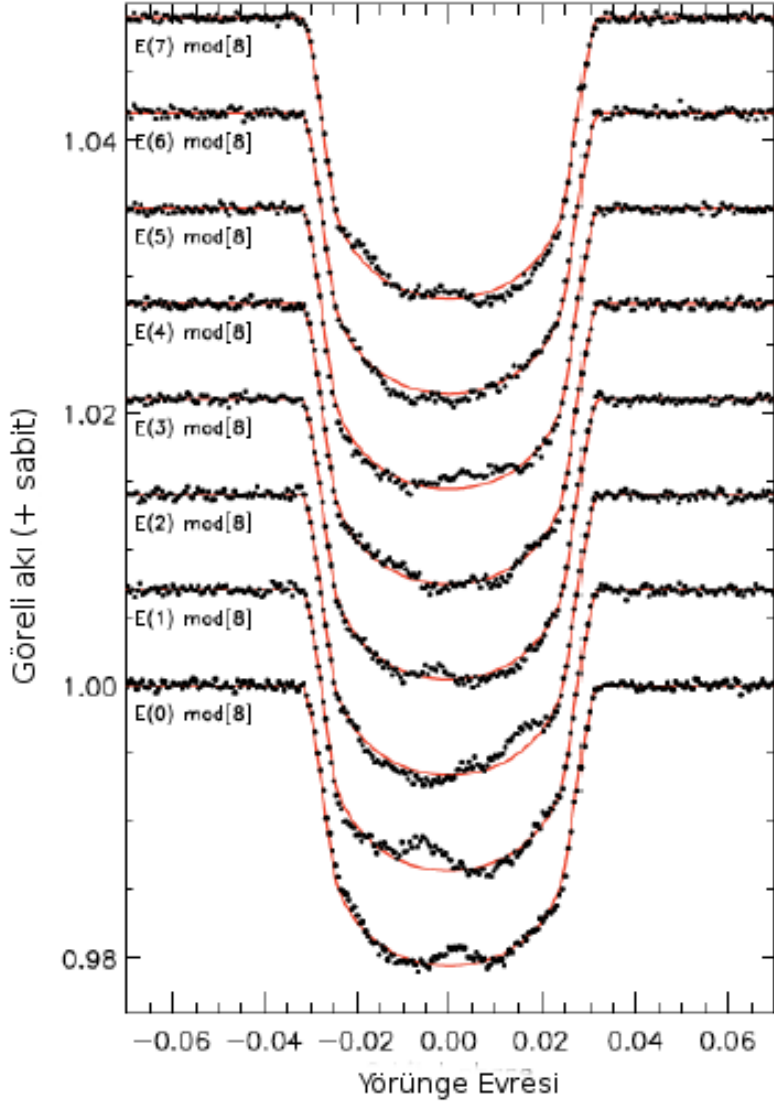
# Gezegen Geçişlerinde Leke Bölgesi Gözlemleri - II



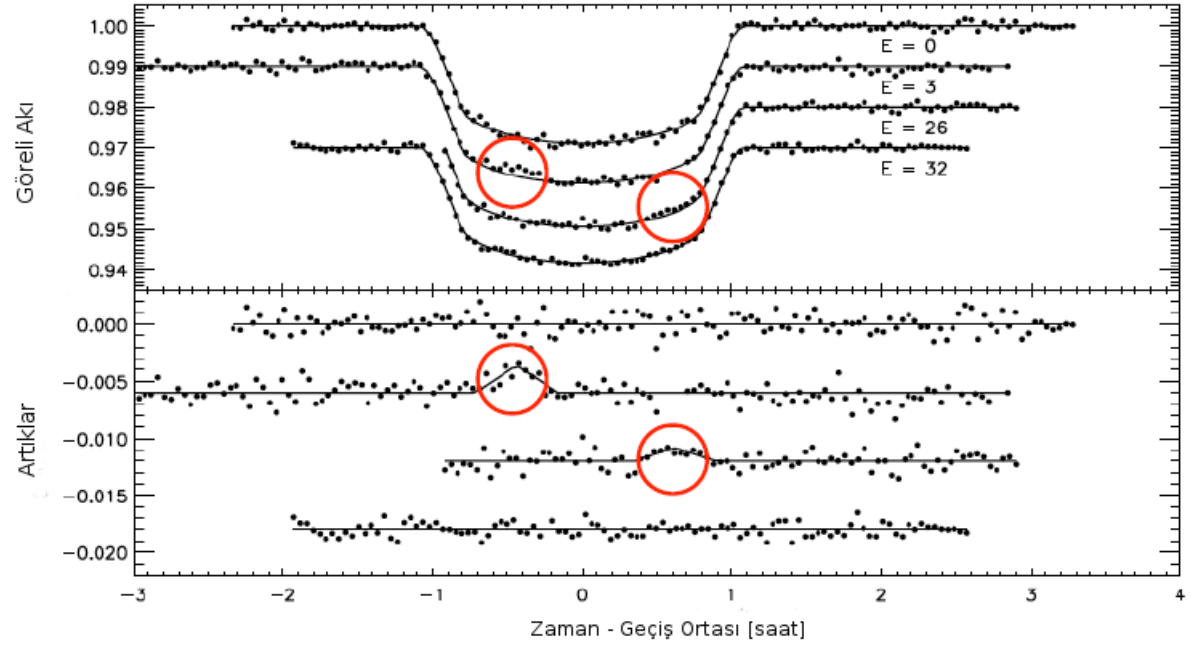
# Gezegen Geçişlerinde Leke Bölgesi Gözlemleri - III



# Gezegen Geçişlerinde Leke Bölgesi Gözlemleri - IV



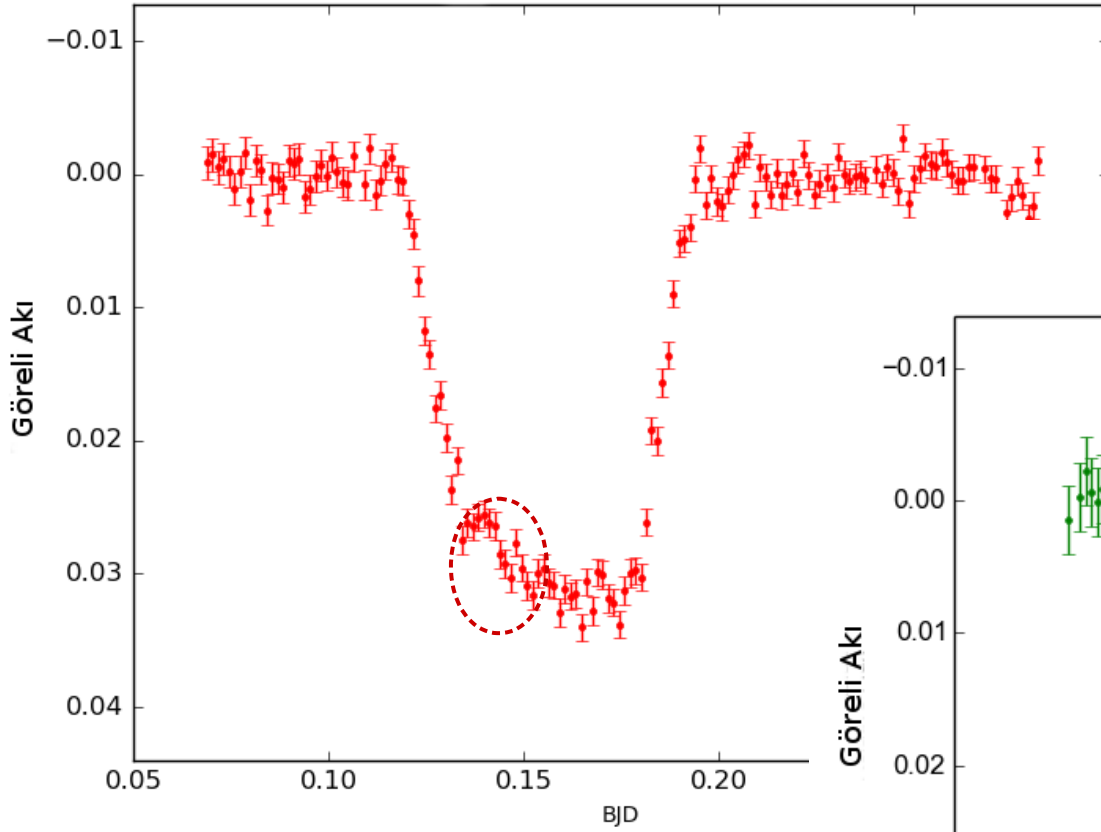
Kepler-17b, Hizalı Yörünge  
Desert vd. (2011)



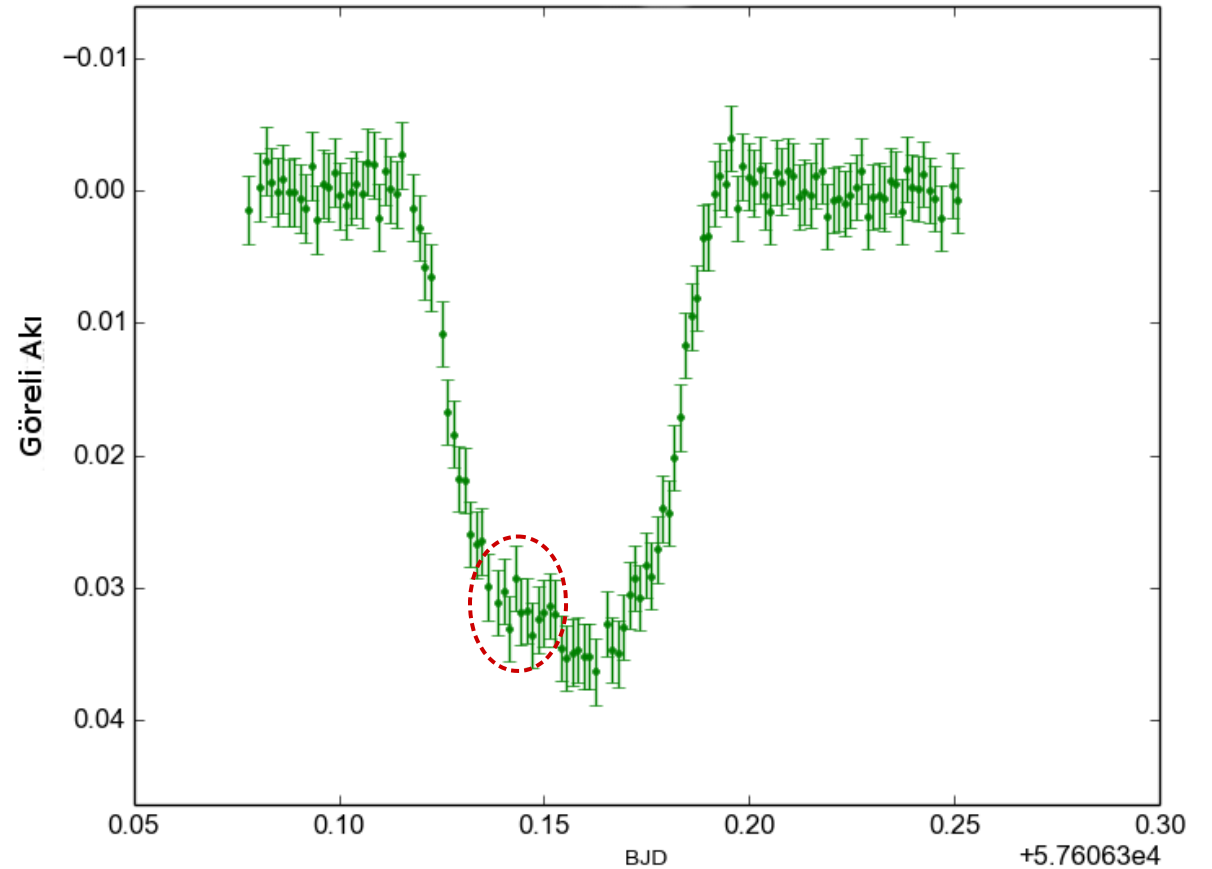
WASP-4b, Hizalanmamış Yörünge  
Sanchis Ojeda ve Winn (2011)

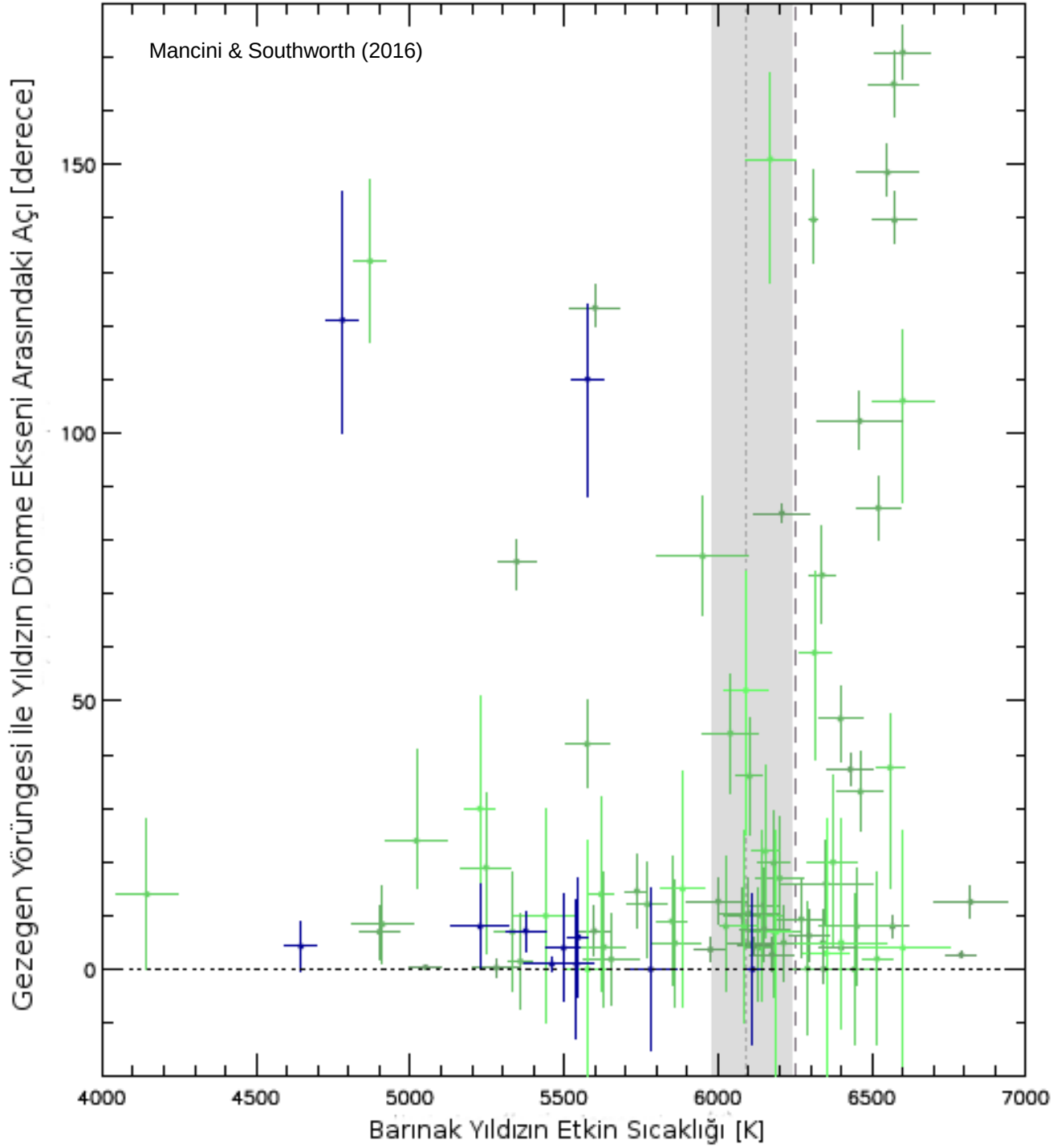
# Gezegen Geçişlerinde Leke Bölgesi Gözlemleri - V

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

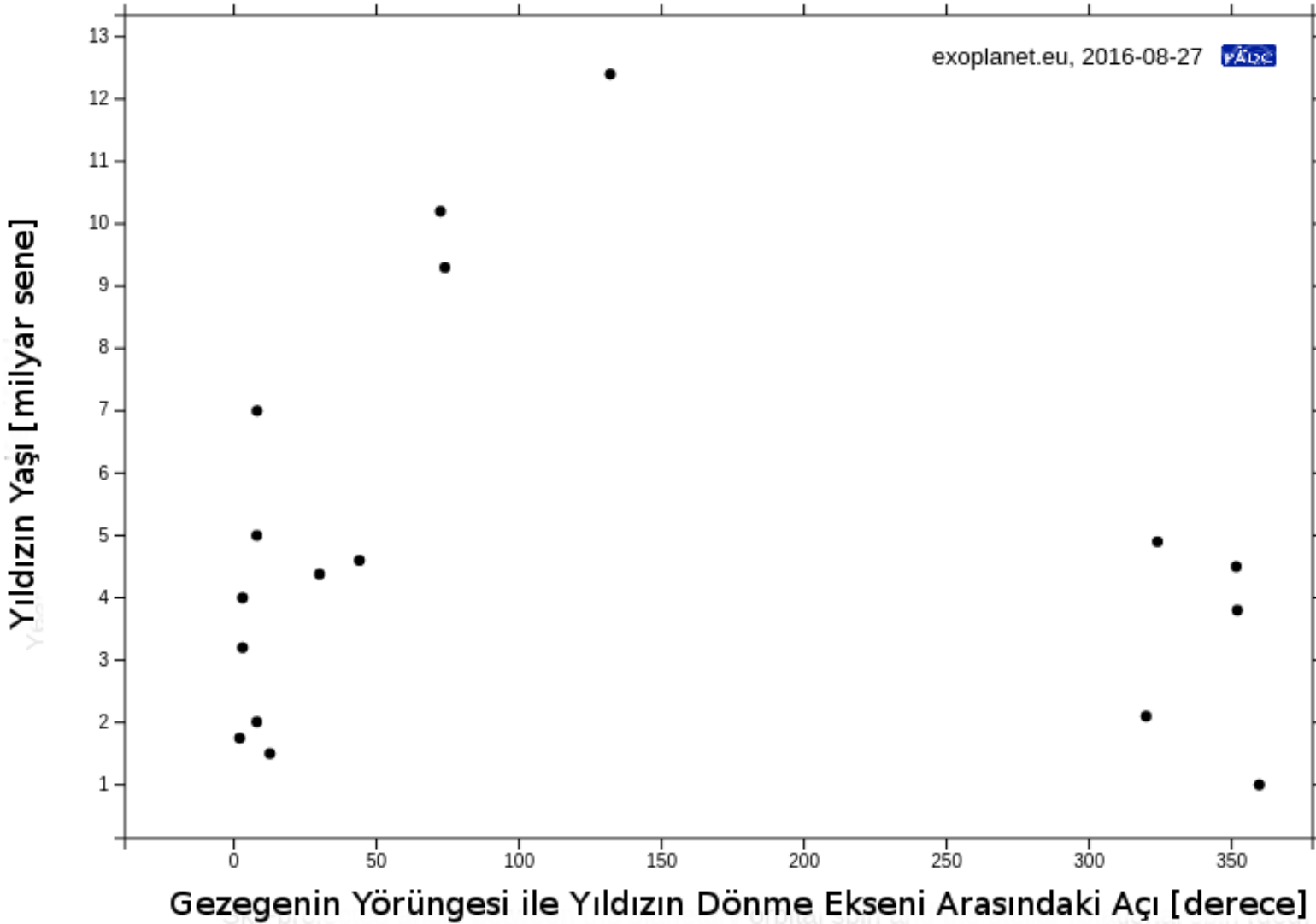


WASP-52b V Bandı Işık Eğrisi  
TUG-T100, 2016-08-05,  $\mu = 2.50$  mmag





# Dağılım - II (Yıldızın Yaşına Bağlılık?)





# Geçiş Gözlemleri



# Takip Gözlemlerinde Kullanılan Teleskoplar

Yüksek fotometrik duyarlılık → Doğru ve duyarlı  $\delta$ , T → Duyarlı  $\sqrt{\delta} = k = (R_p / R_*)$ , b

Kepler Uzay Teleskobu →  $\delta \approx 10^{-6}$ , m  $\sim 15^m - 16^m$ , tayfsal takip gözlemlerinde zorluk

20-50 cm çapında teleskoplarla %2-3 civarındaki geçiş derinlikleri → Yüksek hassasiyet için daha büyük teleskop (yoğun gözlem programları ve çeşitli odak düzlem aletlerinin getirdiği zorluk)

1-1.5 m sınıfında teleskoplar için önemli bir “oyun sahası”. Ayrıca gezegen avlamak üzere kurulan yer tabanlı ağların duyarlı olduğu parlaklık aralığı  $8^m - 13^m$  civarındadır.

1 metre sınıfından bir teleskop → %1 civarında bir derinlik → rms  $\approx 1$  mmag düzeyinde duyarlılık

Kısa poz süreleri (2-15 saniye) → Foton gürültüsü

Sinyal / Gürültü oranını arttırmak üzere teleskobun odak dışına alınıp, noktanın dağılım fonksiyonunu (PSF) çok sayıda piksele dağıtarak poz süresinin uzatılmasına dayanan **odak-dışı gözlem (defocusing technique) tekniği** adı verilmektedir.

# Gözlem Yöntemi

**Açıklık ışıkölçümü (aperture photometry):** Detayları için bkz. Howell (1999), Gilliland & Brown (1988), Kjeldsen & Frandsen (1992).

**Fark ışıkölçümü (differential photometry):** Atmosferin kısa süreli geçirgenlik değişimlerinin yanı sıra yıldız ışının atmosferde katettiği yolda (X: hava kütlesi) düzenli olarak değişiminden kaçınma yöntemi.

**Toplu ışıkölçüm (ensemble photometry):** Mukayese yıldızlarının düşük genlikli değişimlerinden, renk ve parlaklık farklılıklarından kaçınabilmenin iyi bir yolu, seçilmiş bir grup mukayese yıldızının gözlenen bantta parlaklıkları ile ağırlıklandırılmış ortalamalarının alınarak sentetik bir mukayese yıldızının oluşturulması ve fark ışık ölçüm yönteminin bu sentetik referans yıldızına göre uygulanmasıdır. (Honeycutt 1992).

# Gürültü Kaynakları - I

1. Foton Gürültüsü: Poisson Gürültüsü...

2. Sintilasyon: Yıldız ışığının geçtiği hava kütesindeki kırılma indeksi değişimlerinden kaynaklanan gürültü,

$$\sigma_{\text{sint.}} = \sigma_0 \frac{(\text{Hava Kütlesi})^{7/4}}{D^{2/3}(\Delta t)^{1/2}} \exp\left(-\frac{h}{8000 \text{ m}}\right) \quad \text{Young (1963)}$$

$\sigma_{\text{sint.}} (\lambda^{-1} - \lambda^{-4}) \rightarrow$  Uzun dalgaboylarında gözlem (R, l, r', l')

Kenar Kararması ( $\lambda^{-k}$ )  $\rightarrow$  Karacisimlerin enerji dağılımları arasındaki farkın uzun dalgaboyuna gidildikçe azalması.

(Kızılötede bu iki gürültü azalır ancak bu kez arka alan gürültüsü artar ve bu gürültü değişkendir)

## Gözlemler,

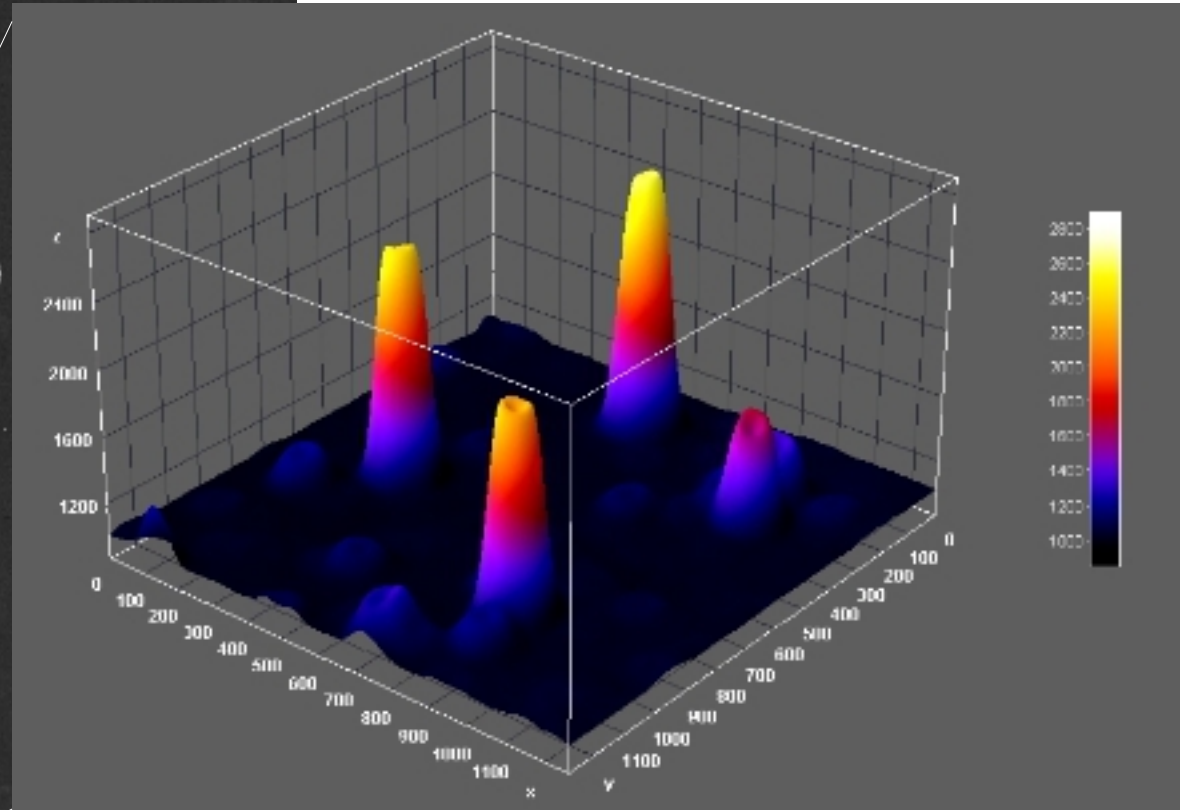
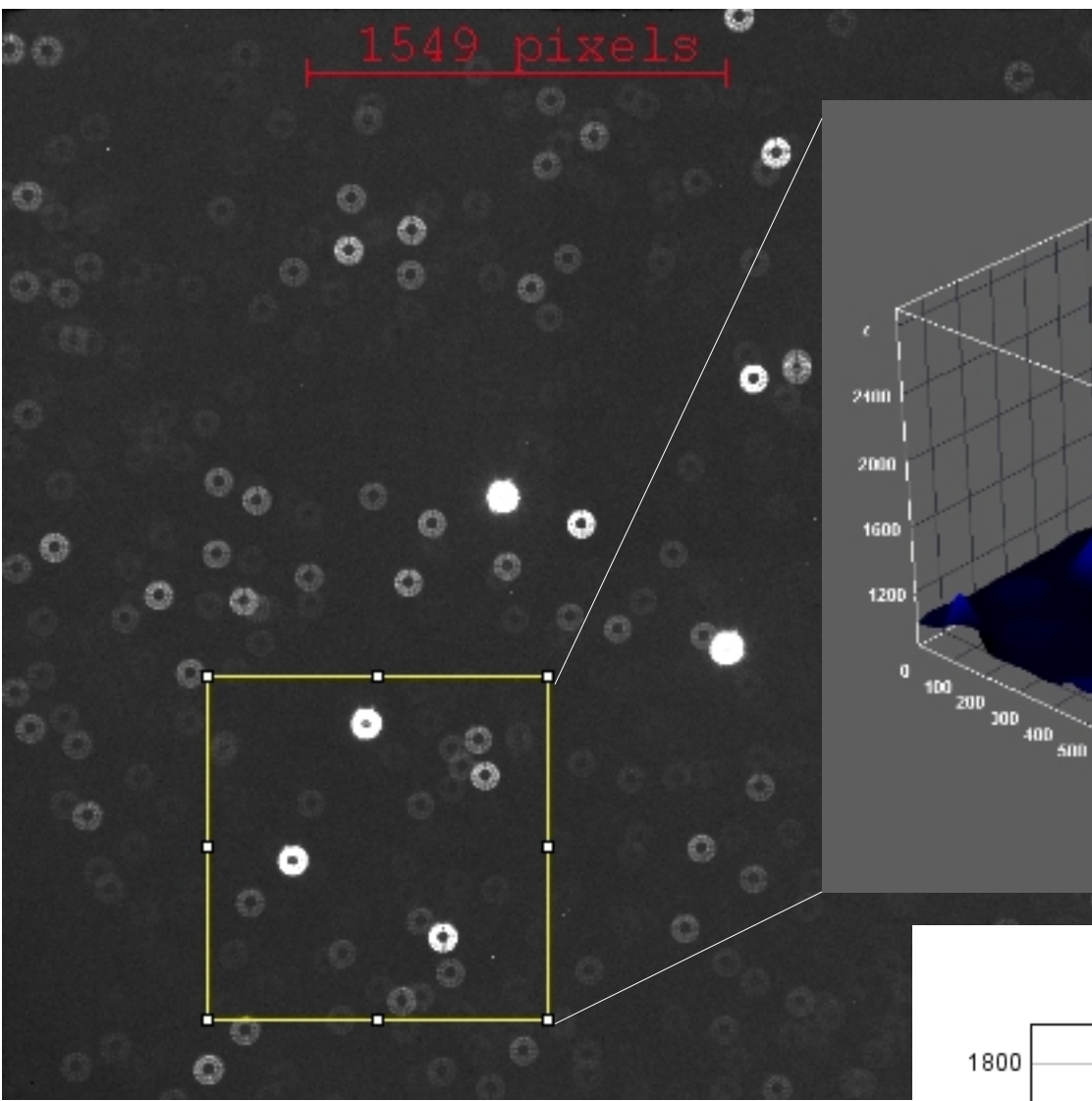
1. Yüksek irtifada
2. Yıldızların yüksek ufuk yüksekliklerinde,
3. Mümkün olduğunca büyük teleskoplarla,
4. Uzun poz süreleriyle,
5. uzun dalgaboylarında yapılmalıdır.

# Gürültü Kaynakları - II

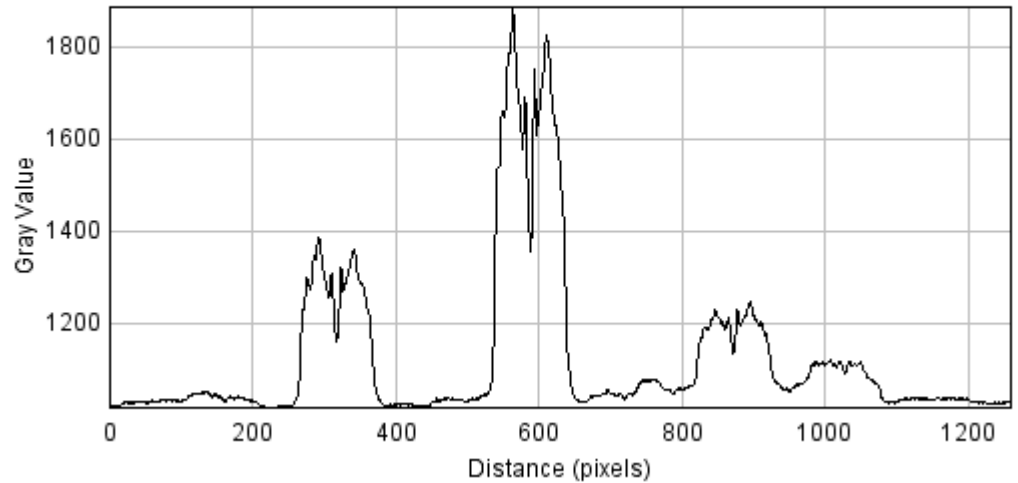
**3. Renk-bağımlı sönümlenme:** Birinci mertebede gerek hedef gerekse de mukayese yıldızları aynı miktarda sönümlenir ve akı oranı bu şekilde sabit kalır. Ancak sönümlenme miktarı dalgaboyu ile değiştiği için (gerek saçılma gerekse de atmosferik soğurma kısa dalga boylarında daha baskın olduğu için daha mavi yıldızların ışığı daha çok sönümlendiğinden) akı oranı hava kütlesi ve kısa süreli geçirgenlik değişimlerinden etkilenir. Fark ışıkölçüm için ortalama bir sentetik yıldız oluşturulurken, hedef yıldızın renginin her iki tarafında (ondan daha mavi ve daha kırmızı) mukayese yıldızlarının seçilmesi bu etkinin azaltılmasında yardımcı olur.

**4. Düz alan düzeltmesi kaynaklı gürültü:** Dedektör homojen olmayan bir şekilde aydınlatılmasından ve her bir pikselinin aynı miktarda ışığa aynı tepkiyi vermemesinden kaynaklanır ve çoğu zaman görüntülerin dedektörün her tarafı eşit aydınlatılarak alınmış düz alan görüntülerine bölünerek giderilmesine çalışılır. Bu gürültüyü daha da azaltmak için iyi çözümler yıldız ışığını sürekli olarak aynı piksellere düşürmek üzere iyi bir takip sistemi kullanmak, otomatik takip sistemlerinden faydalanmak (auto-guider) ya da yıldızın ışığını mümkün olduğunca geniş bir alana yayacak şekilde teleskobu odak dışına alarak kullanılan açıklık içerisindeki pikselden piksele değişimlerin ortalaması etrafındaki standart sapmayı küçültmektir.

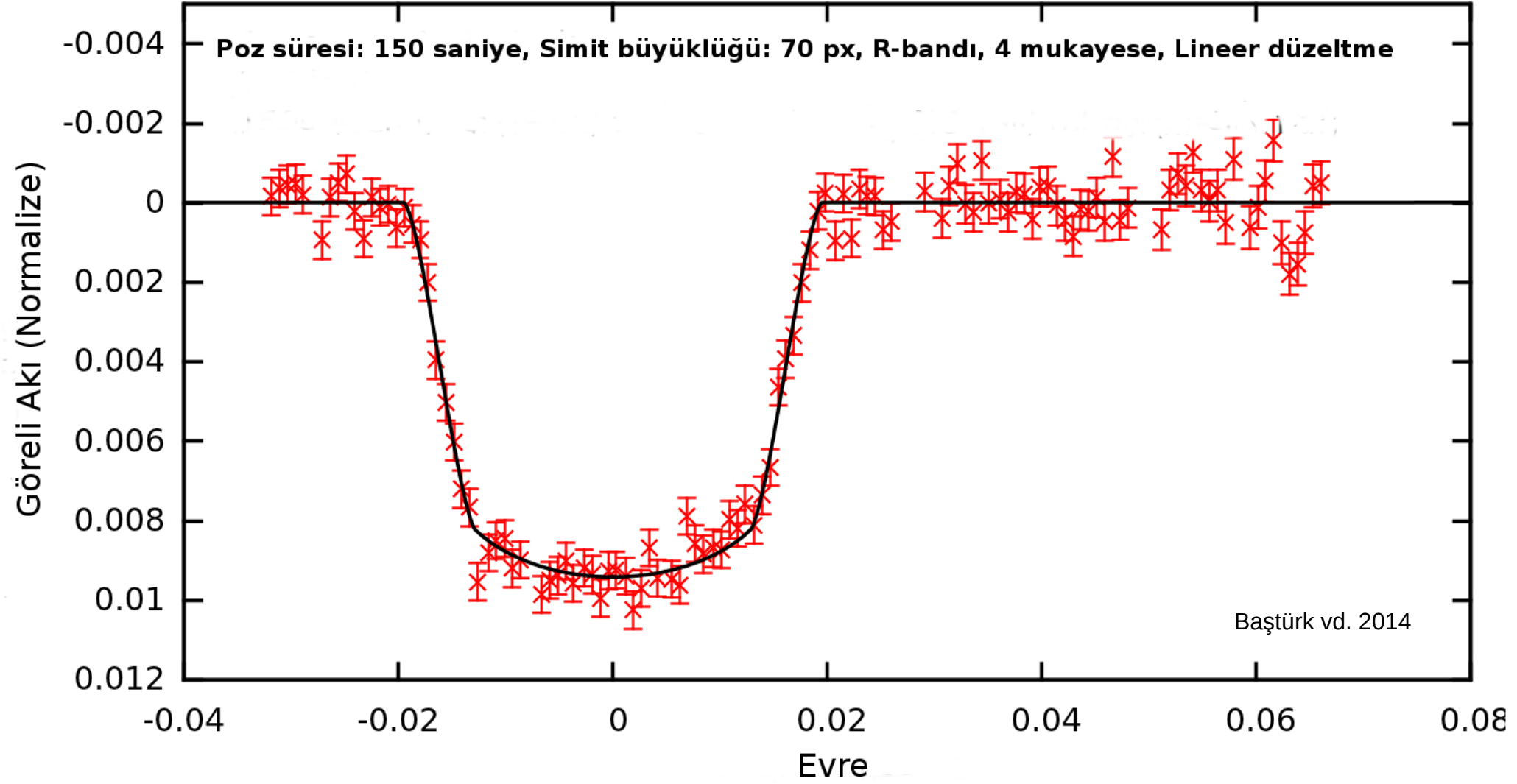
**Diğer Gürültüler:** Gürültü kaynaklarını dört başlık altında listelemek yeterli görülmez. Ancak bu anlamda yapılacak hiçbir liste tam olmaz. Zira dedektör cevabı sıcaklıkla değişir, saçılan ay ışığı (ve bunun dalgaboyu bağımlılığı), ışık kirliliği (ve bunun dalgaboyu bağımlılığı), gökyüzündeki konumları birbirine yakın ya da sönüklükleri nedeniyle seçilemeyen yıldızların gökyüzünden gelen fotonların sayımında neden oldukları ek gürültüler akla gelebilecek diğer gürültü kaynaklarıdır.



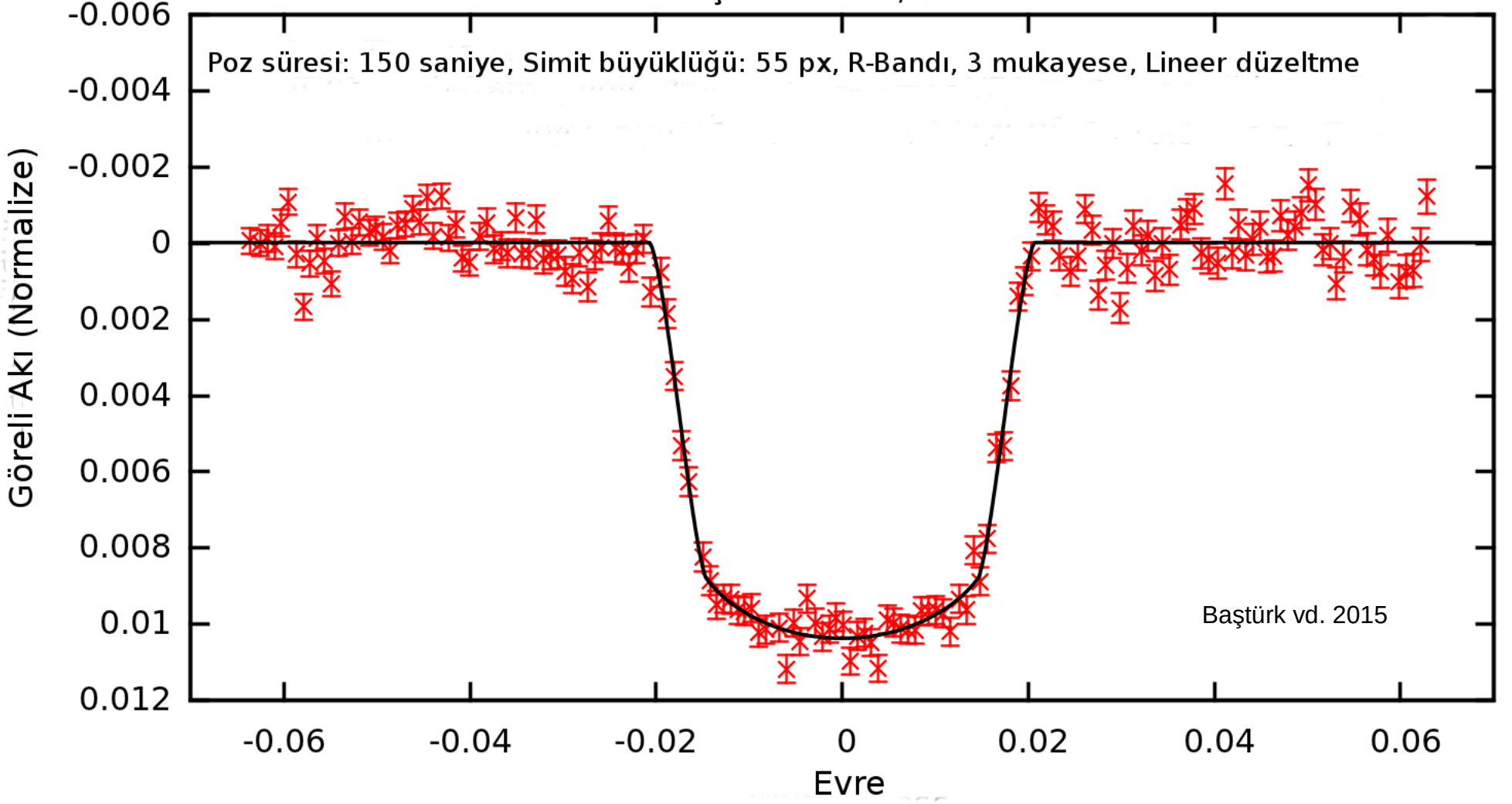
Teleskobun odak-dışı çalıştırılması foton gürültüsünün azaltılarak S/G oranının yükseltilmesinin yanı sıra, düz alan düzeltmesinden gelen gürültünün ve görüş kaynaklı etkilerin de azaltılmasına yardımcı olur.



XO-3b, rms = 0.56 mmag  
14 Ocak 2013, TUG-T100



KELT-3b, rms = 0.58 mmag  
18 Şubat 2014, TUG-T100

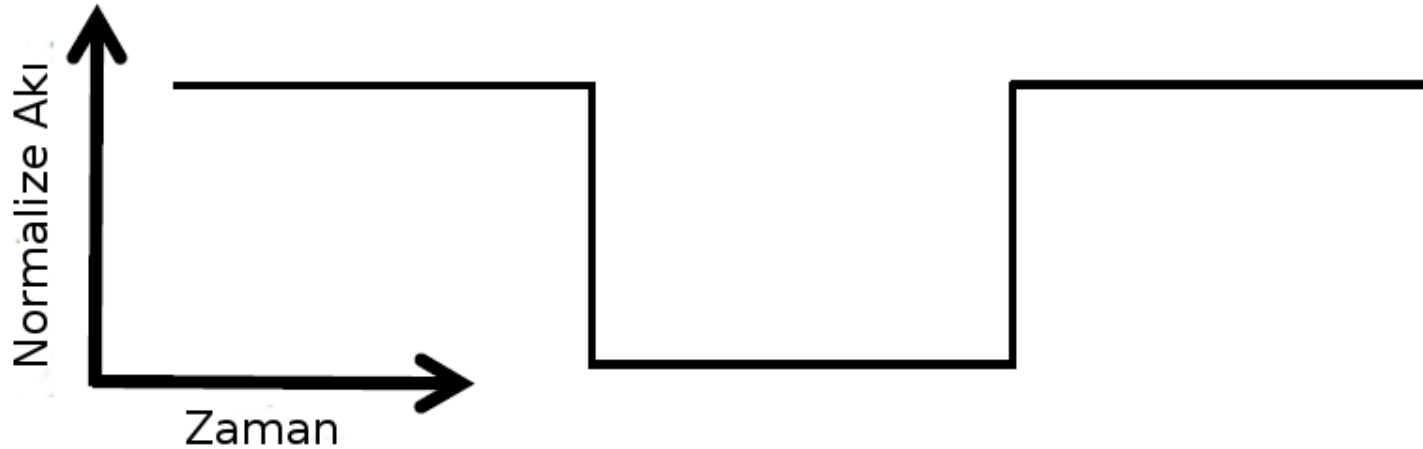


# Modelleme - I

Hassas Işık Eğrisi  $\rightarrow \delta, T, \tau, T_0 \rightarrow k, g_p$  ve  $\rho_*$

Işık Eğrisi + Dikine Hız ( $K_*$ )  $\rightarrow R_p, M_p$

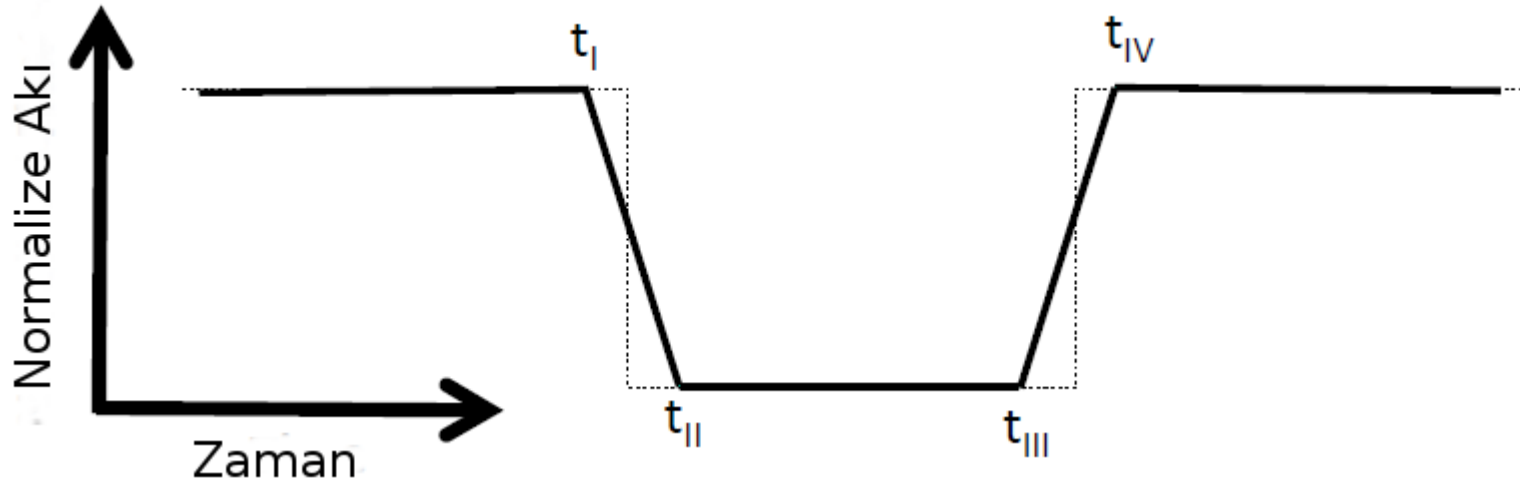
**1. Kutu Modeli (Boxcar):** BLS (Box-Fitting Least Squares, Kovacs vd. 2002) ve QATS (Quasiperiodic Automated Transit Search Algorithm, Carter & Agol 2013) gezegen keşfi için gezegen “avcıları” tarafından kullanılan basit modellerdir.





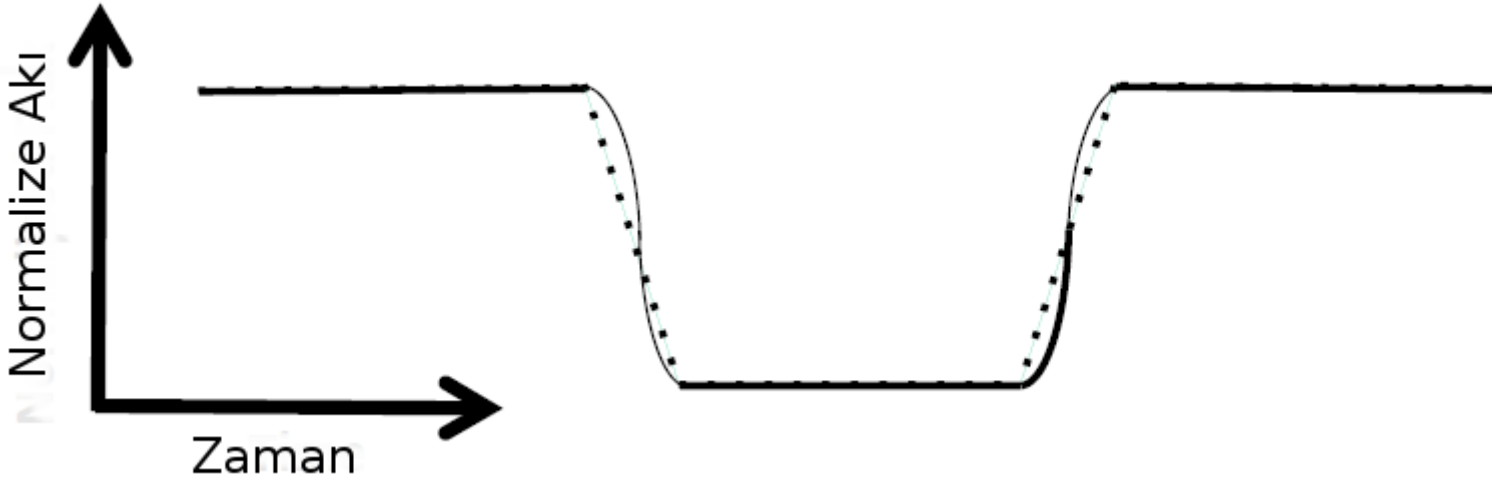
# Modelleme - II

**2.Yamuk Modeli (Trapezoid):** Zamanlamalar ve derinlik kullanılarak elde edilen bütün parametreler hesaplanabilir. Yerden ya da dar bantlarda yapılan duyarlılığı düşük gözlemler için genellikle yeterli kabul edilir. Takip gözlemleri için bir fikir vermesi amacıyla kullanılır.



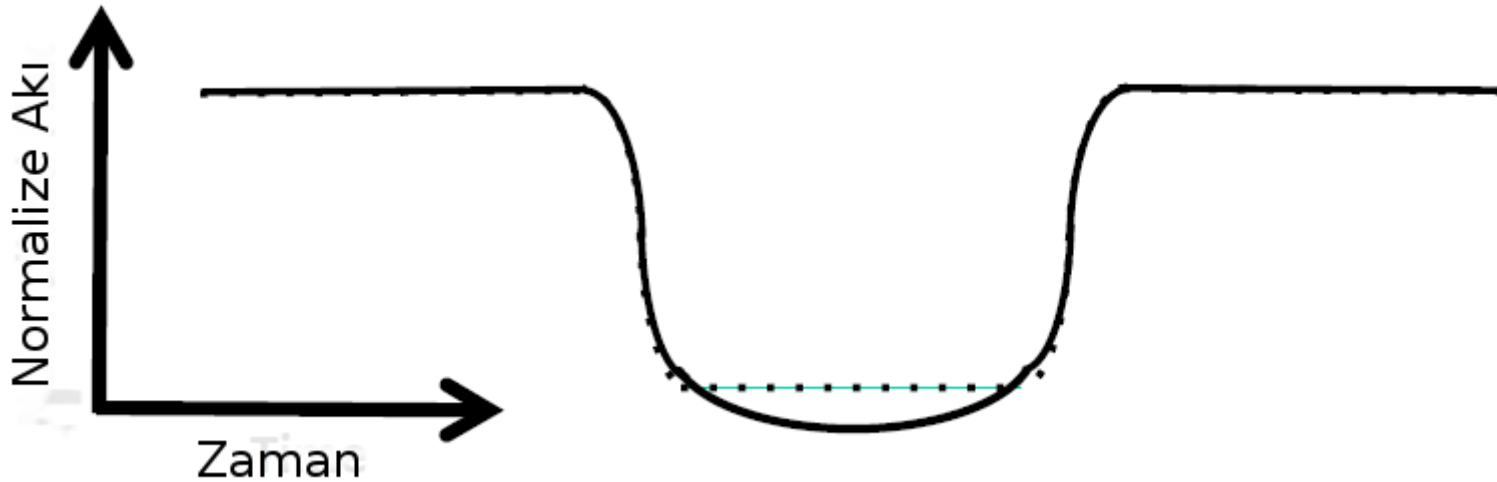
# Modelleme - III

**3. Tekdüze Modeller (Uniform):** Çembersel yörünge varsayımı altında etki parametresini ( $b/R_*$ ), gezegen diskinin yıldız diski önünden geçerkenki hızı ( $v/R_*$ ), transit ortası ( $T_0$ ), geçiş derinliği ( $\delta$ )  $\rightarrow k \rightarrow R_p / R_*$  oranı.



# Modelleme - IV

**4. Kenar Kararmalı Modeller** : Veri kalitesinin yeterli olduğu durumlarda genellikle kuadratik kenar kararma yasasının (Mandel & Agol 2002, Pal 2008) parametreleri serbest bırakılarak hesaplanır. Veri kalitesinin yetersiz olduğu durumlarda model atmosfer değerlerini sabit olarak kullanmak daha akılcıdır (Claret 2000, Sing 2011). Gezegenin küçük ve atmosferinin olmadığı varsayılır!



# Basit Modellerin Ötesi

- ✓ Yıldız ve gezegenin küresel simetriden sapmaları (Carter & Winn 2010, Dobbs-Dixon vd. 2012),
- ✓ Dalgaboyu bağımlılığı (Knutson vd. 2007, Bean vd. 2009),
- ✓ Uydu ve halkalar (Kipping vd. 2010), Barnes vd. 2011),
- ✓ Örtme modeli (Majeau vd. 2012),
- ✓ Kırılma etkisi (Sidis & Sari 2011)
- ✓ Yüzey parlaklık dağılımı düzensizlikleri, granülasyon, flare ve çekim kararması etkileri (Sanchis Ojeda & Winn 2010),
- ✓ Işık-zaman etkisi ve rölativistik etkiler (Doppler beaming) (Mazeh vd. 2011),
- ✓ Yansıyan ışık ve polarizasyon (Agol 2010),
- ✓ Geçiş sürelerinin değişimi (Miralda-Escude 2002)

# Algoritmalar

1. **En Küçük Kareler Yöntemi ve Levenberg-Marquardt Algoritması:** “En iyi” modelden fark kareler toplamının minimizasyonuna dayanır. Sonuç olarak modelin parametreleri için tahmini değer ve hataları çıktı olarak verilir.

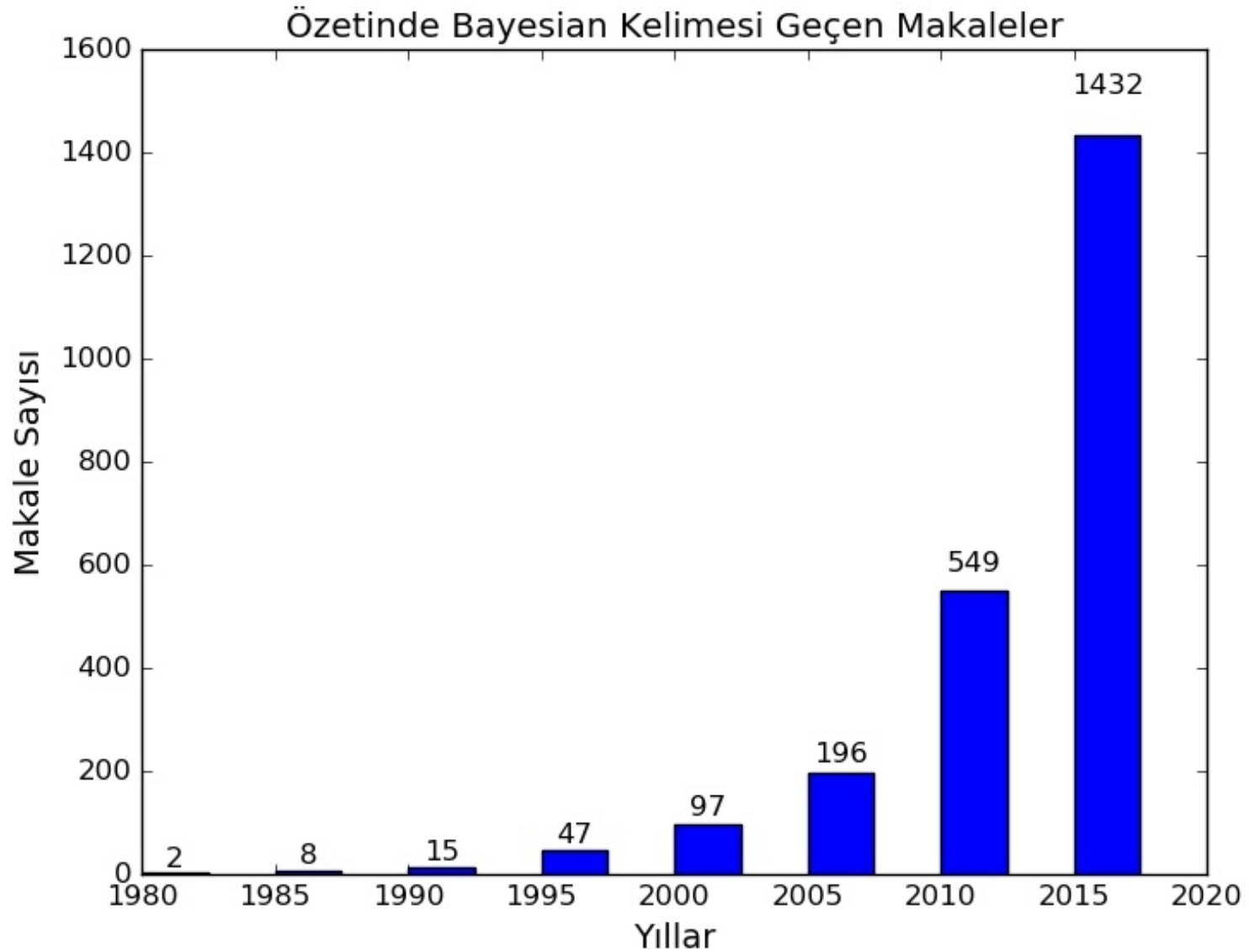
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{f_i(\text{gözl.}) - f_i(\text{hes.})}{\sigma_i} \right]^2$$

2. **Bayesian Modeller:** Marjinalize edilen her parametre için model öncesi (a priori) belirlenen dağılımların (prior), elde edilen gözlemsel veri (data) ile bir olasılık fonksiyonu yardımıyla (likelihood function) güncellenerek, ilgili parametrenin alabileceği tüm değerlerin olasılıklarının (posterior) çıktı olarak üretildiği modellerdir.

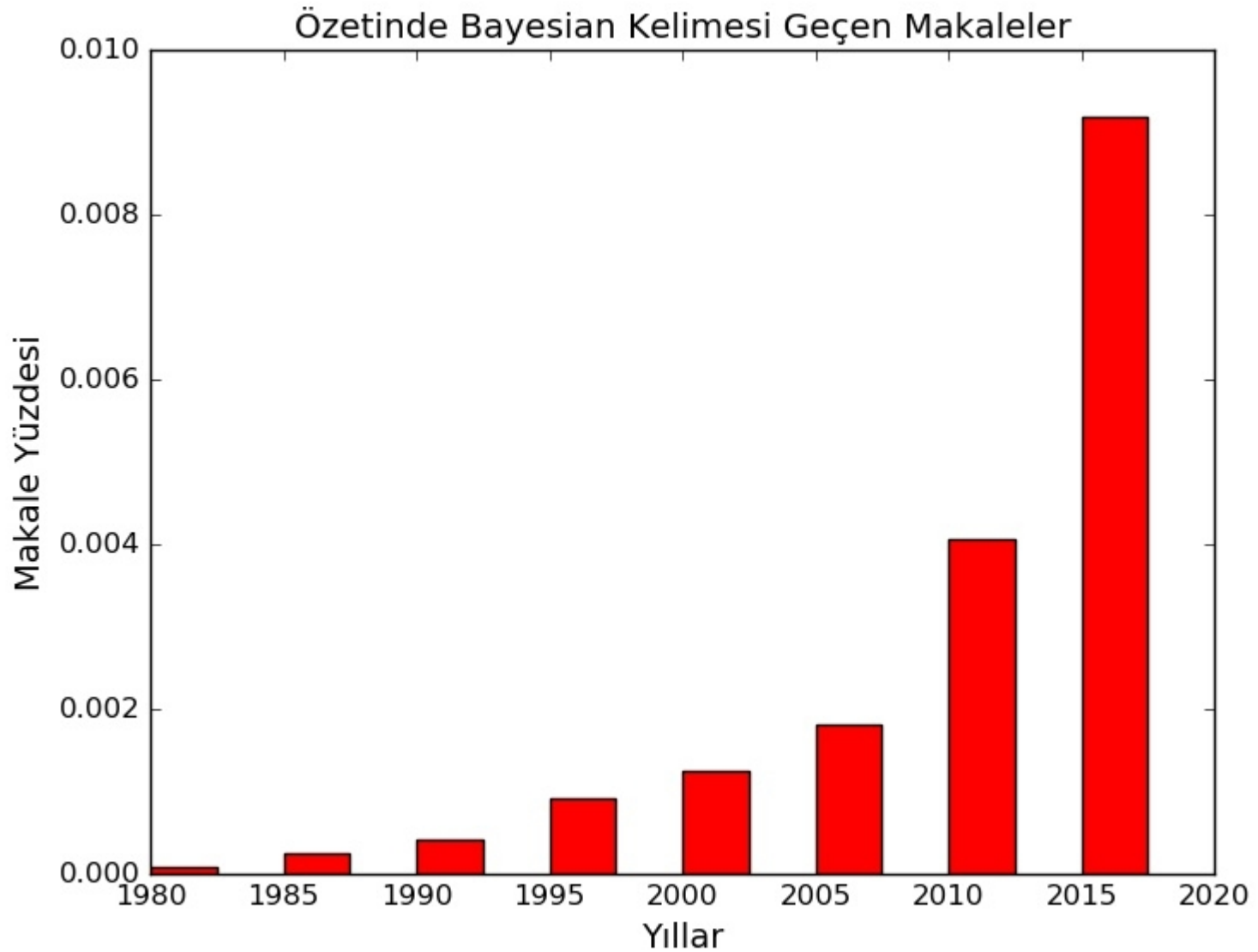
$$P(H | E) = \frac{P(E | H) \cdot P(H)}{P(E)}$$

Olasılık dağılımını (posterior distribution) hızlı hesaplamak ve paydadaki normalizasyon teriminden kurulmak için Monte-Carlo Markov Chain (MCMC) (Gregory 2005, Holman vd. 2006, Collier-Cameron vd. 2007, Burke vd. 2007) ya da Nested Sampling (Corsaro vd. 2015) gibi yöntemler kullanılmaktadır.

# Bayesian İstatistik



# Bayesian İstatistik

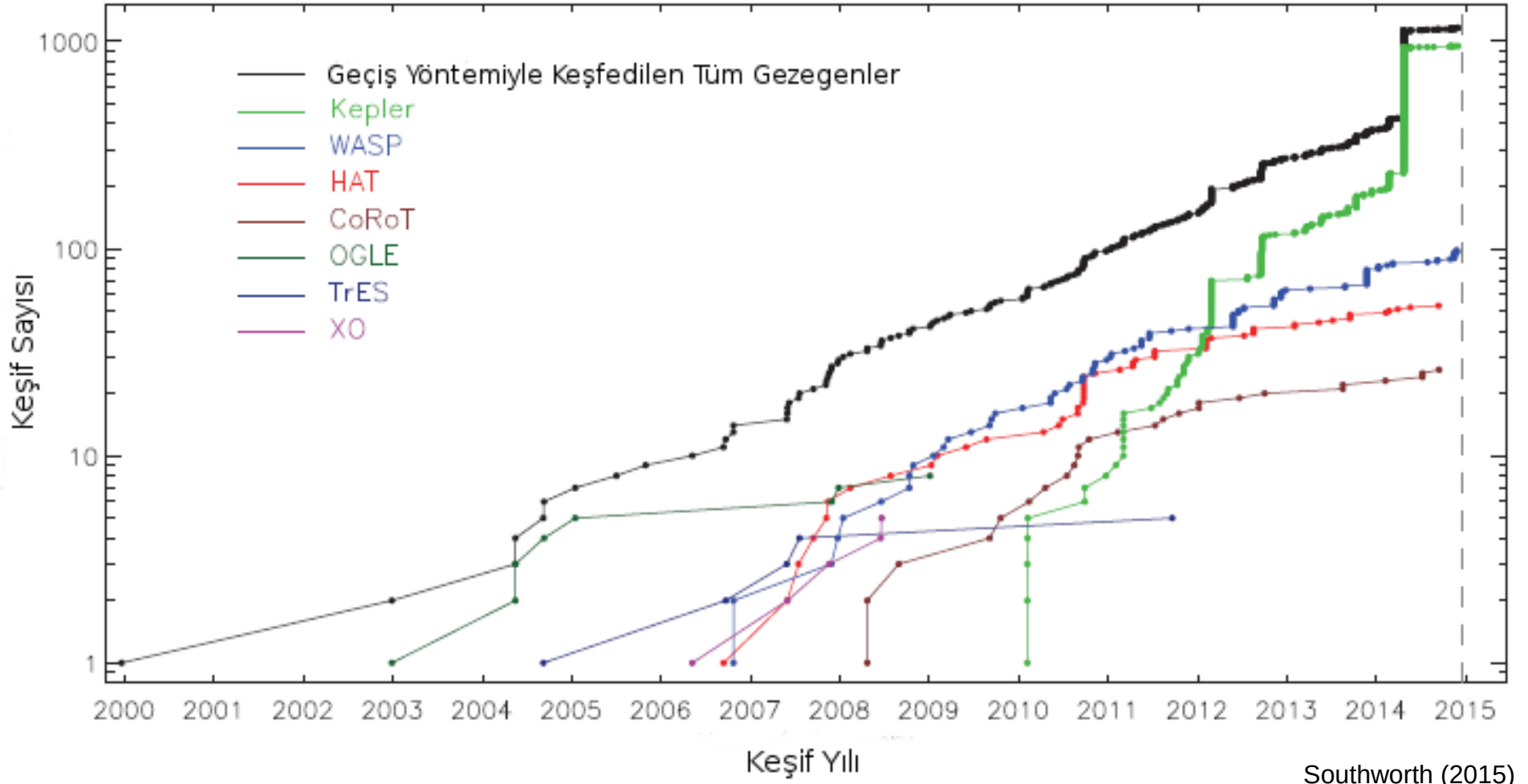




# **Geçiş Gözlemleriyle Ulaşılan Sonuçlar**



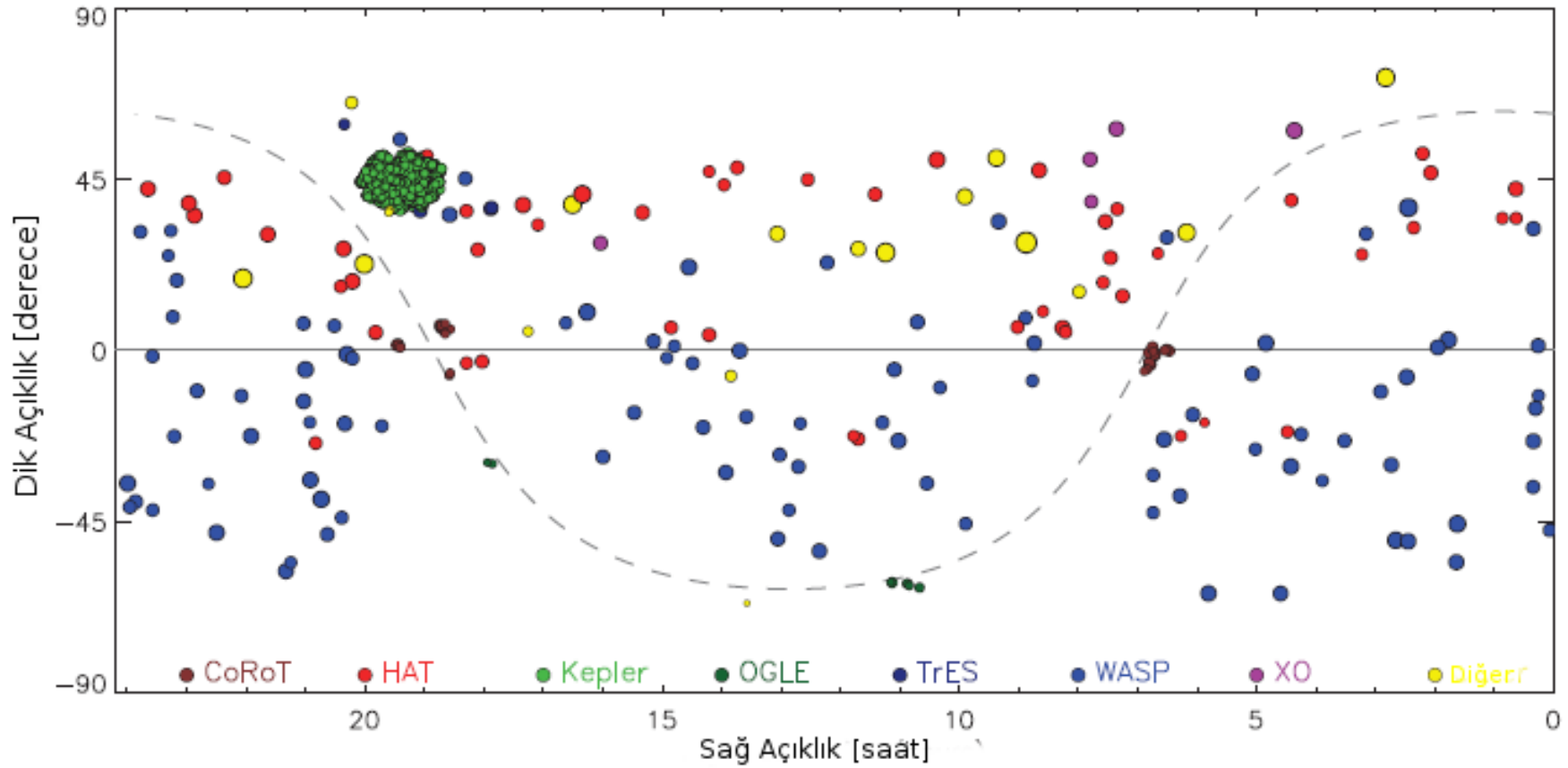
# Geçiş Yöntemiyle Keşifler - I



Bugüne kadar (30 Ağustos 2016) keşfedilen toplam 3518 ötegezegenin 2678'i (%76) geçiş yöntemiyle keşfedilmiştir. Bunların 2290'ı (%86) Kepler Uzay Teleskobu ile keşfedilmiştir (<http://exoplanet.eu>)

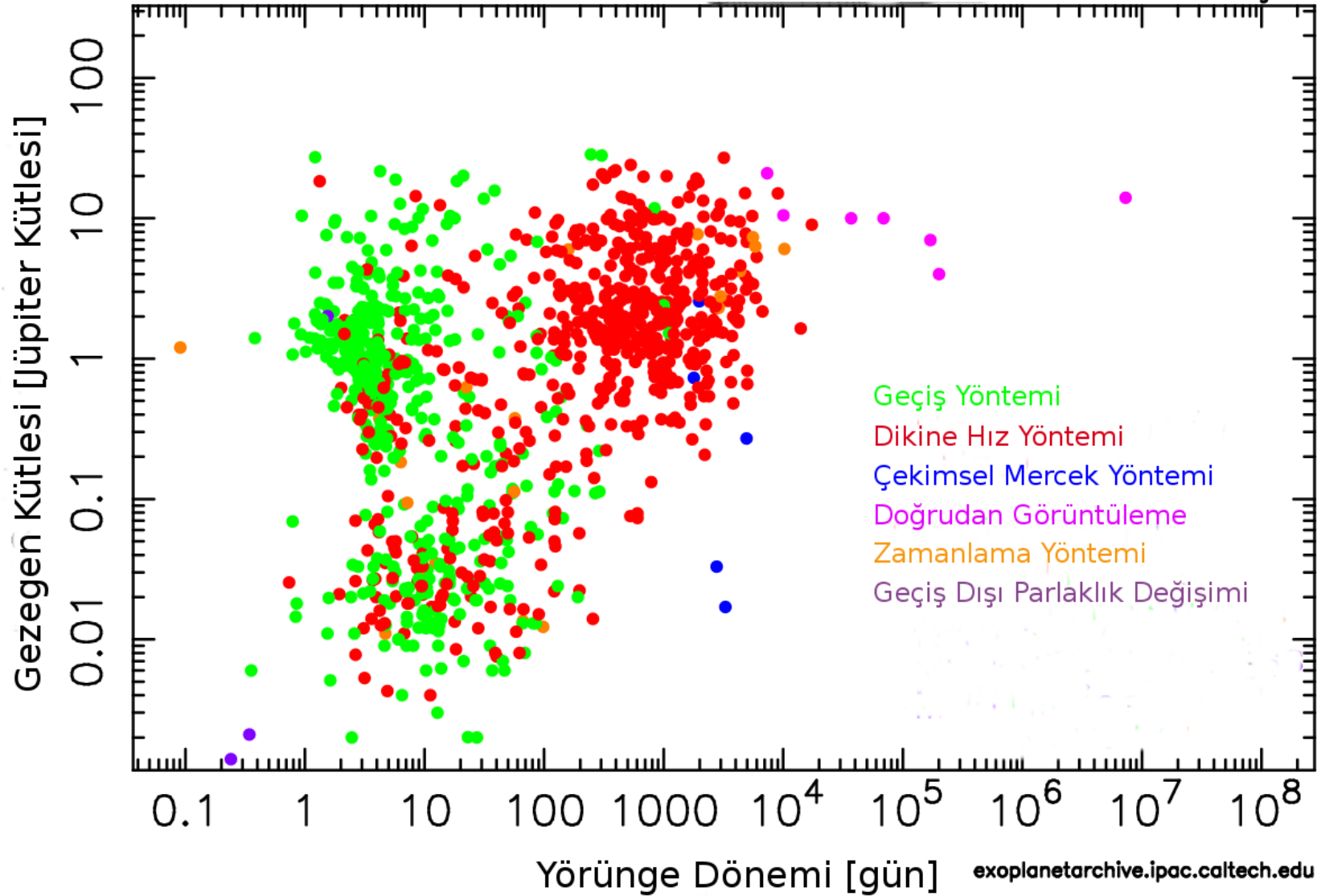
# Geçiş Yöntemiyle Keşifler - II

Southworth (2015)

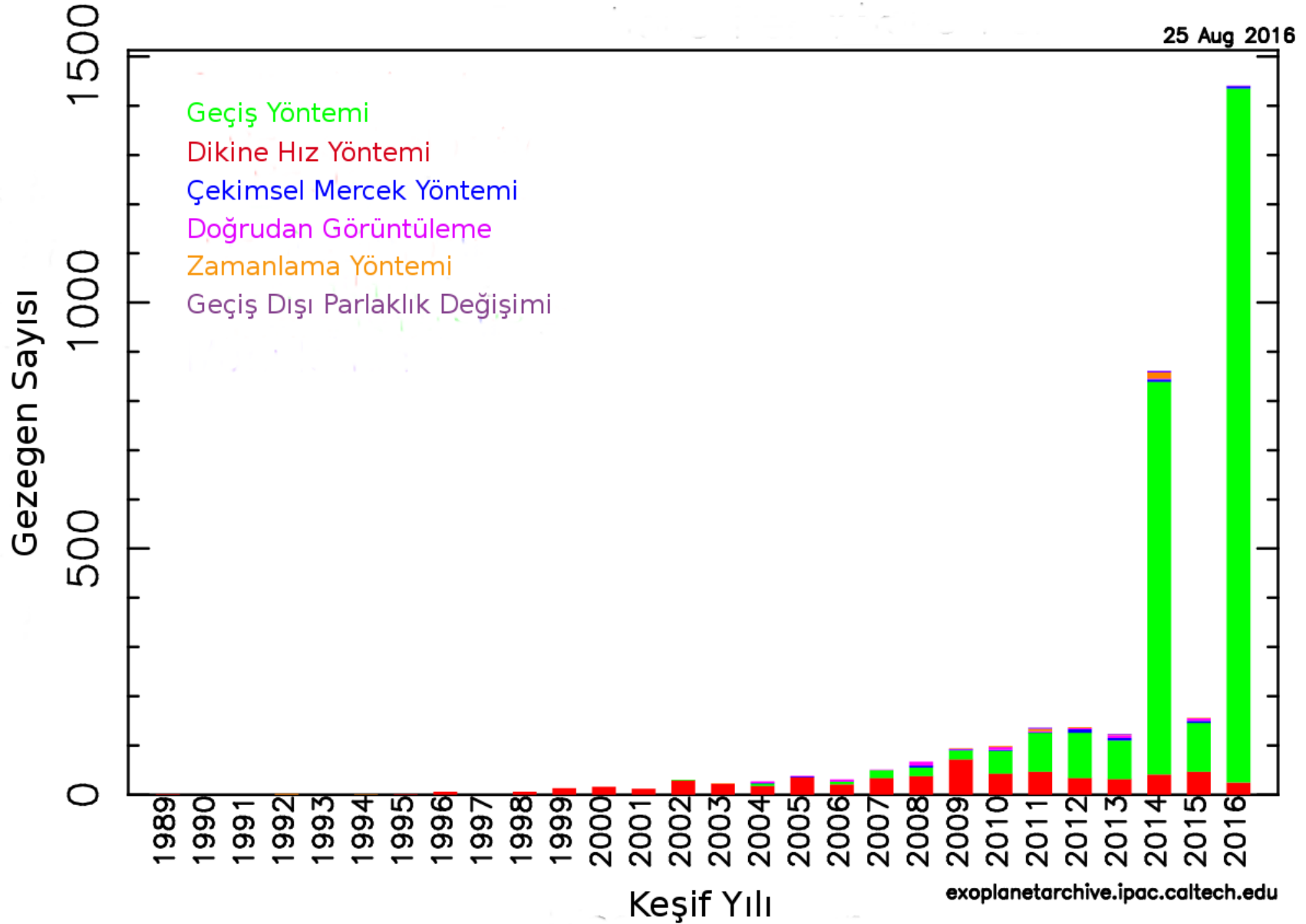


# Geçiş Yöntemiyle Keşifler - III

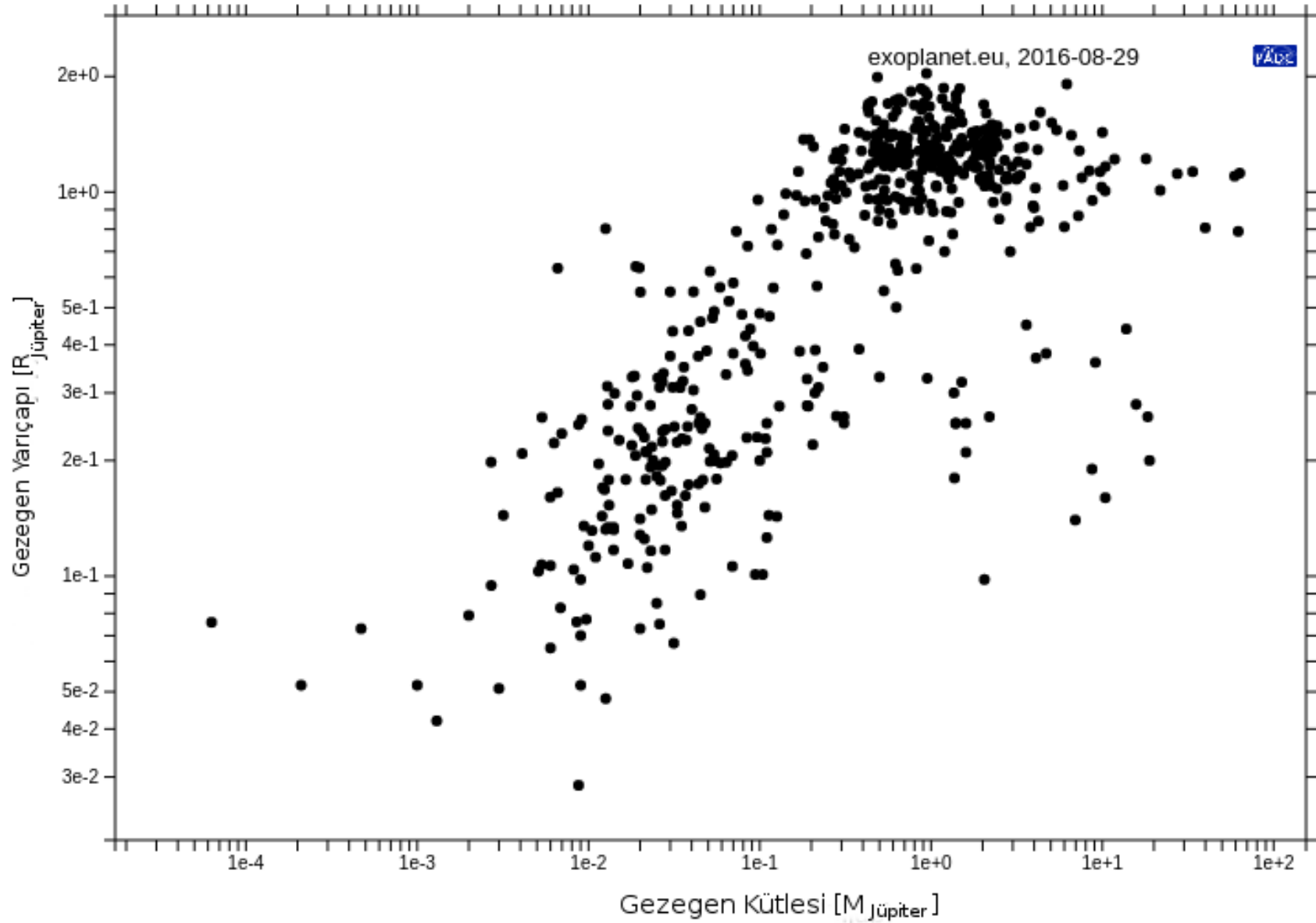
25 Aug 2016



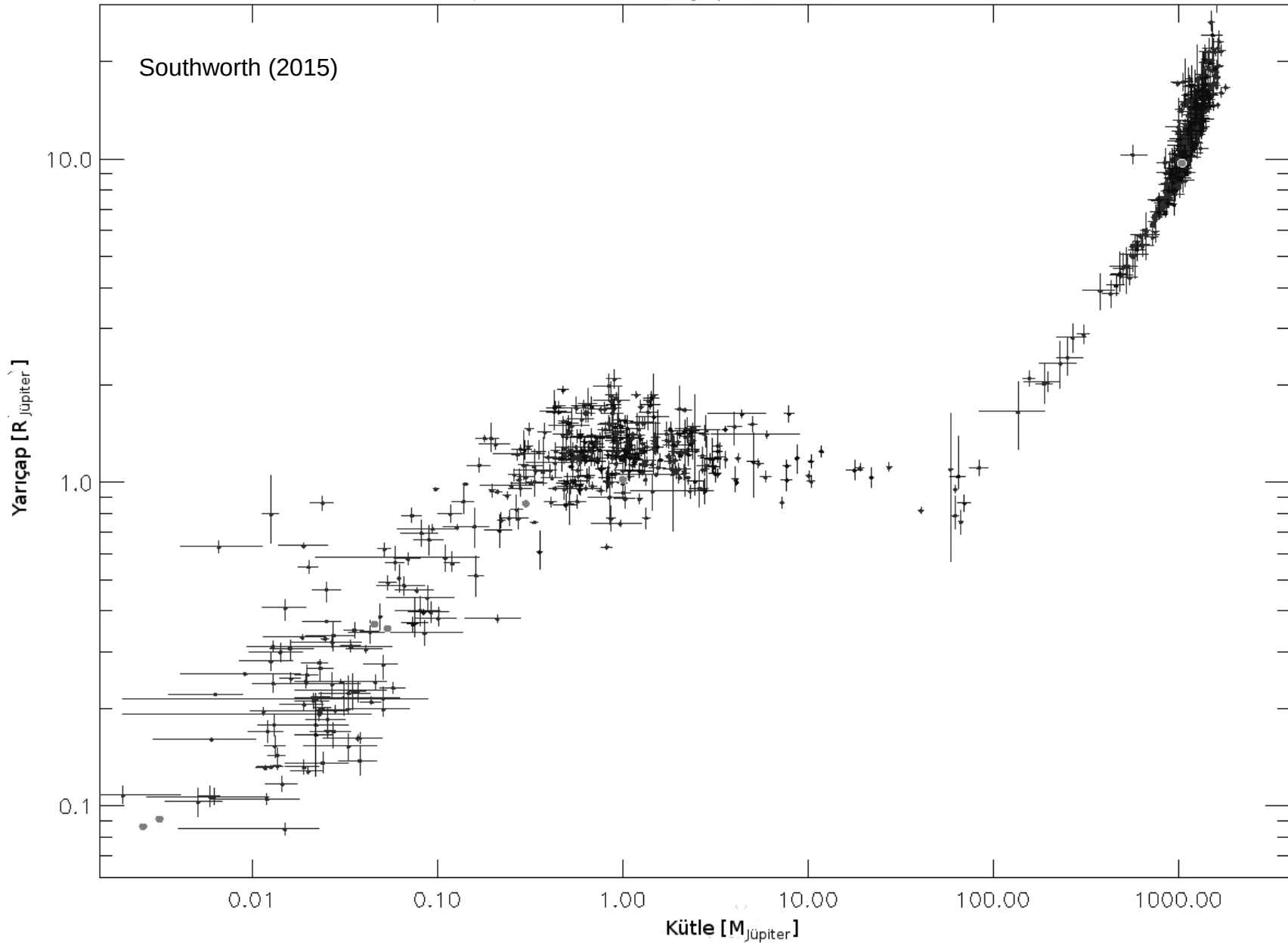
# Geçiş Yöntemiyle Keşifler - IV

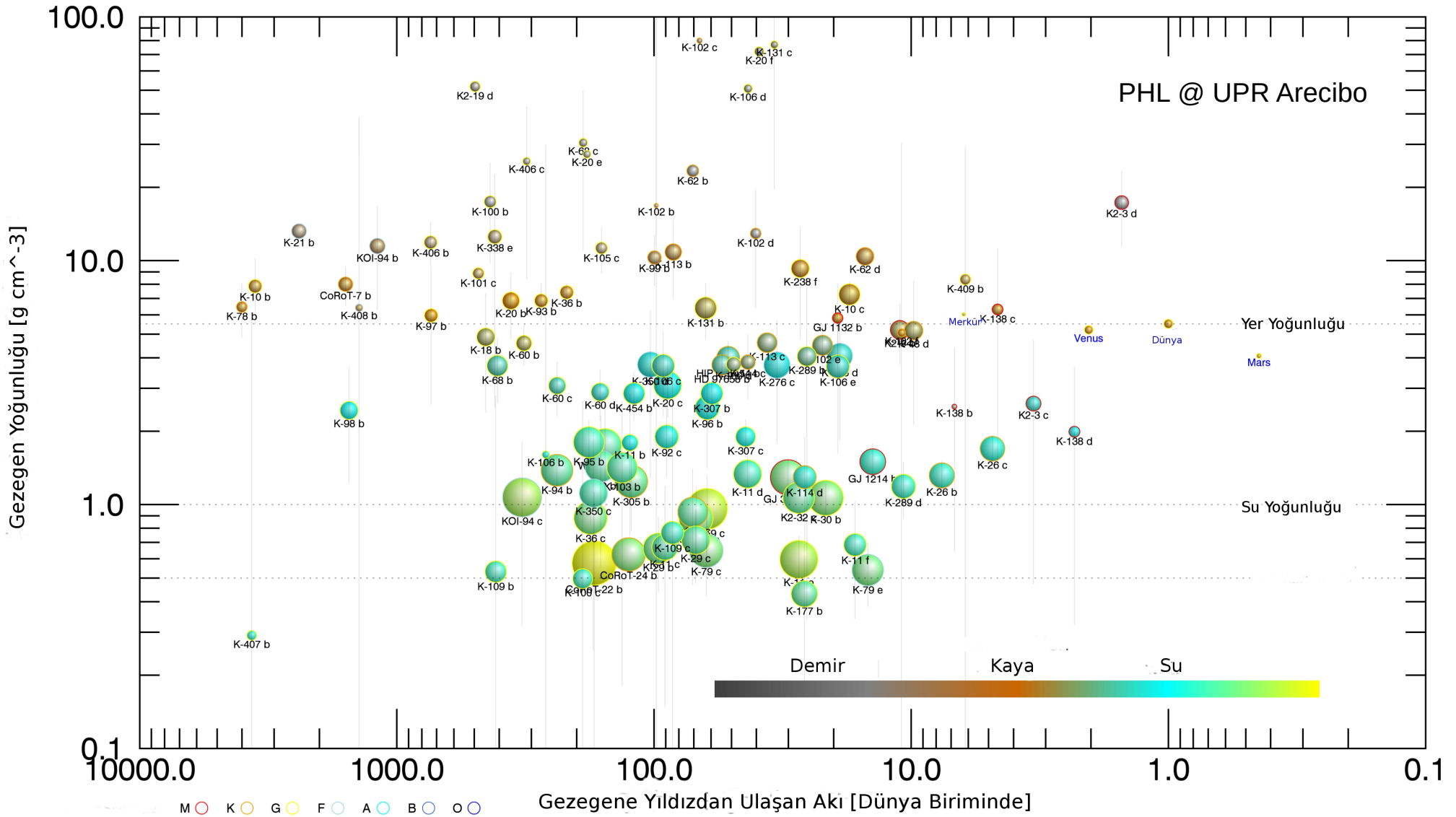


# Kütle - Yarıçap İlişkisi



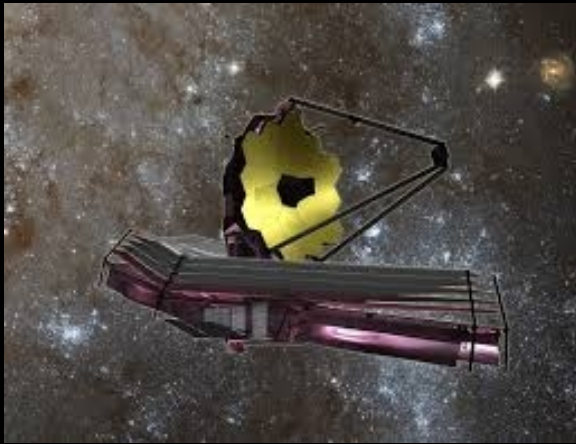
# Kütle - Yarıçap İlişkisi



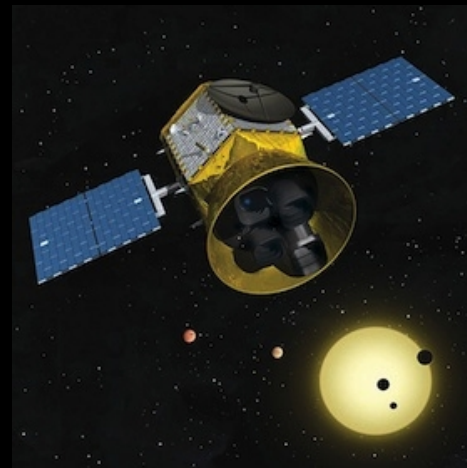


phl.up.edu, Jun 2016

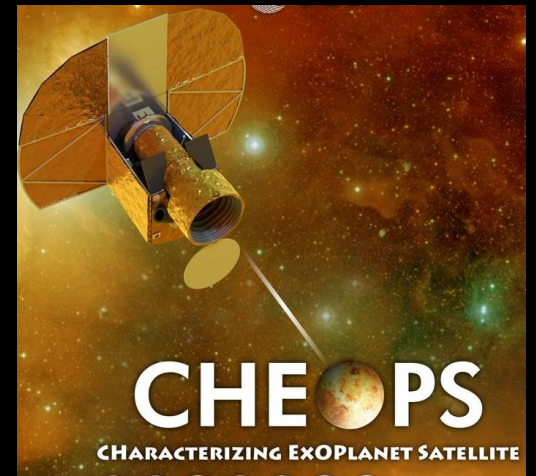
20 Yer kütlesinden küçük kütleyle sahip ötegezegenlerin yoğunluk-akı dağılımı. Gezegen büyüklükleri ölçeklidir. Daire renkleri kimyasal kompozisyonu, çember renkleri barınak yıldız tayf türünü göstermektedir.



James Webb Space Telescope, JWST  
Ekim 2018



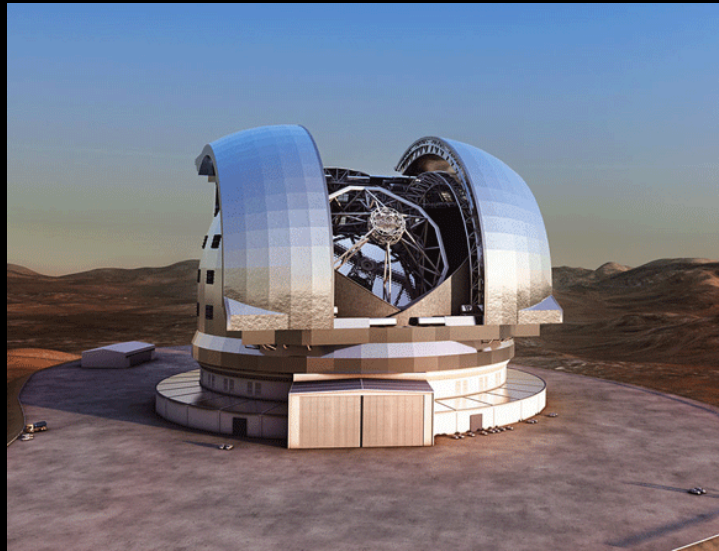
Transiting Exoplanet Survey Satellite, TESS  
Aralık 2017



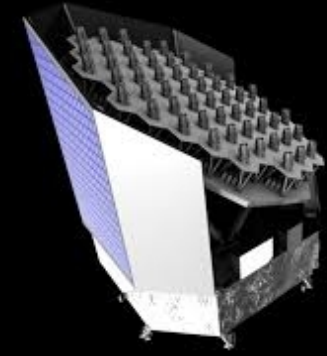
Characterizing Exoplanet Satellite, CHEOPS  
Aralık 2017



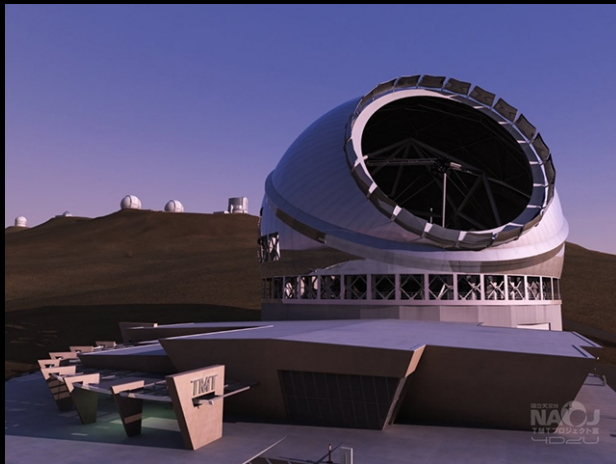
GAIA Çalışmaya başladı



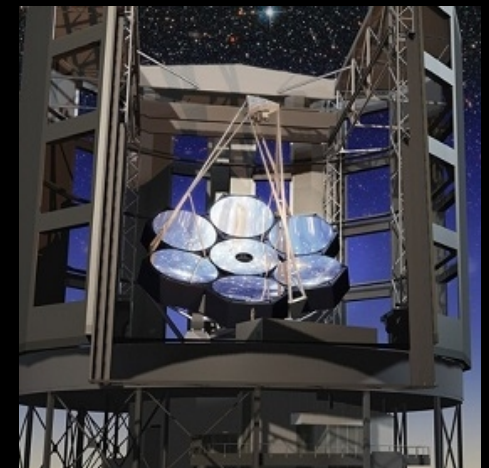
European Extremely Large Telescope, E-ELT  
2024



Planetary Transits and Solar Oscillations  
PLATO 2.0, 2024



Thirty Meter Telescope



Giant Magellan Telescope, 2025



# Kaynaklar

1. Murray, C. D.; Correia, A. C. M., 2010, "*Keplerian Orbits and Dynamics of Exoplanets*", Exoplanets, ed. Sarah Seager, University of Arizona Press, p. 15-23
2. Winn, J. N. , 2010, "Exoplanet Transits & Occultations", Exoplanets ed. Sarah Seager, University of Arizona Press, p. 55-77
3. Kipping, D. M., 2008, "*Transiting planets - light-curve analysis for eccentric orbits*", MNRAS, 389, 1383
4. Huber, D.; Chaplin, W.; vd., 2014, "*Fundamental Properties of Kepler Planet-candidate Host Stars using Asteroseismology*", ApJ, 767, 127
5. Seager, S.; Mallen-Ornelas, G. 2003, "*A Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve*", ApJ, 585, 1038
6. Fabricky, T., Tremaine, S., 2007, "*Shrinking Binary and Planetary Orbits by Kozai Cycles with Tidal Friction*", ApJ, 669, 1298
7. Goldreich, P., Tremaine, S., 1980, "*Disk Satellite Interactions*", ApJ, 241, 425
8. Dawson, R., Murray-Clay, R., 2013, "*gadgetbelt: A Tool for Modeling Planetary Sculpting of Massive Debris Disks*", Protostar & Planets IV, Heidelberg, Poster #2B075
9. Albrecht, S., 2012, "*A High Stellar Obliquity in the WASP-7 Exoplanetary System*", ApJ, 744, 189
10. Mancini, L., Southworth, J., 2016, "*Eight years of accurate photometric follow-up of transiting giant exoplanets*", astro.ph 1605.05576
11. Winn, J., vd., 2006, "*Measurement of the Spin-Orbit Alignment in the Exoplanetary System HD 189733*", ApJ, 653, 69
12. Hirano, T., vd., 2011, "*Further Observations of the Tilted Planet XO-3: A New Determination of Spin-Orbit Misalignment, and Limits on Differential Rotation*", PASJ, 63, 57
13. Albrecht, S., vd., 2011, "*Two Upper Limits on the Rossiter-McLaughlin Effect, with Differing Implications: WASP-1 has a High Obliquity and WASP-2 is Indeterminate*", ApJ, 738, 52
14. Winn, J., vd., 2009, "*HAT-P-7: A Retrograde or Polar Orbit, and a Third Body*", ApJ, 703, 99
15. Hartman, J. D., vd., 2015, "*HAT-P-57b: A Short-period Giant Planet Transiting a Bright Rapidly Rotating A8V Star Confirmed Via Doppler Tomography*", AJ, 150, 197
16. Nutzman, P.A., vd., 2011, "*Using Star Spots to Measure the Spin-orbit Alignment of Transiting Planets*", ApJ, 740, 10
17. Desert, J.-M., vd., 2011, "*The Hot-Jupiter Kepler-17b: Discovery, Obliquity from Stroboscopic Starspots, and Atmospheric Characterization*", ApJS, 197, 14
18. Sanchis-Ojeda, R., Winn, J., 2011, "*Starspots, Spin-Orbit Misalignment, and Active Latitudes in the HAT-P-11 Exoplanetary System*", ApJ, 743, 61
19. Howell, S.B., vd., 1999, "*Photometric Search for Extra-Solar Planets*", ASPC, 189, 170
20. Gilliland, R.L., Brown, T.M., 1988, "*Time-resolved CCD photometry of an ensemble of stars*", PASP, 100, 754
21. Kjeldsen, H., Frenesen, S., 1992, "*High-precision time-resolved CCD photometry*", PASP, 104, 413
22. Honeycutt, R.K., 1992, "*CCD ensemble photometry on an inhomogeneous set of exposures*", PASP, 104, 435
23. Young, A.T., 1963, "*Temperature effects in photomultipliers and astronomical photometry*", ApOpt, 2, 51

# Kaynaklar

23. Kovács, G.; Zucker, S.; Mazeh, T, 2002, “A box-fitting algorithm in the search for periodic transits”, A&A, 391, 369
24. Carter, J.C., Agol, E., 2013, “The Quasiperiodic Automated Transit Search Algorithm”, ApJ, 765, 132
25. Mandel, K, Agol, E., 2002, “Analytic Light Curves for Planetary Transit Searches”, ApJ, 580, 171
26. Pál, A., 2008, “Properties of analytic transit light-curve models”, MNRAS, 390, 281
27. Claret, A., 2000, “A new non-linear limb-darkening law for LTE stellar atmosphere models. Calculations for  $-5.0 \leq \log[M/H] \leq +1$ ,  $2000 K \leq T_{\text{eff}} \leq 50000 K$  at several surface gravities”, A&A, 363, 1081
28. Sing, D.K., vd., 2011, “Gran Telescopio Canarias OSIRIS transiting exoplanet atmospheric survey: detection of potassium in XO-2b from narrowband spectrophotometry”, A&A, 527, 73



**Teşekkürler...**