



AST418 Gezegen Sistemleri ve Oluşumu
Ders 6b: Zamanlama Yöntemleri – II
TTV, ETV, PTV

Geçiş/Tutulma Zamanlaması Değişimi Yöntemi

Transit/Eclipse Timing Variations (TTV, ETV)

İlave Cisimler Kaynaklı Nedenleri:

- 1) Gezegen-gezegen etkileşimleri nedeniyle yörüngenin tedirgin olması
- 2) Işık-zaman etkisi
- 3) Yörünge geometrisi etkisi

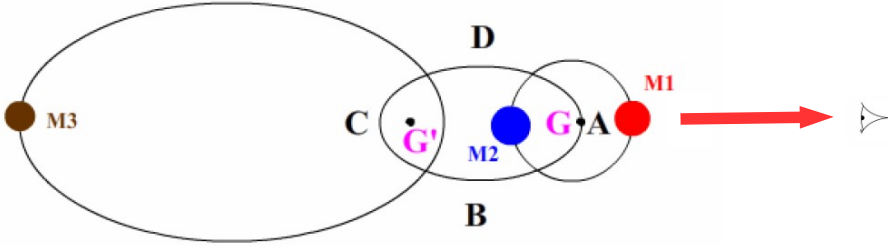
Gözlendiği Sistemler:

- 1) Çoklu Gezegen Sistemleri
- 2) Doğal Uydular
- 3) Çift Yıldız Gezegenleri

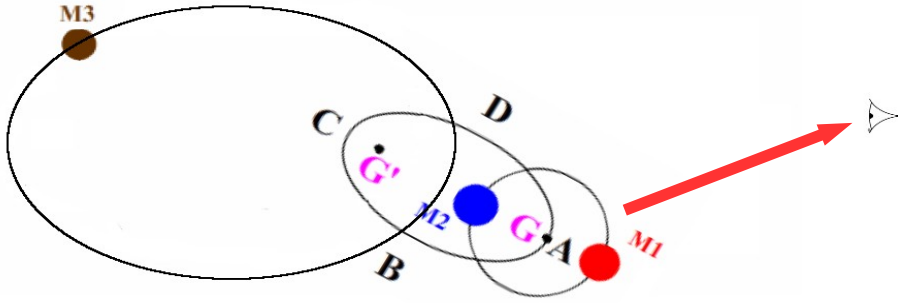
TTV / ETV Araştırmalarının Temel Motivasyonları

- ✓ Geçiş yapan en az bir gezegen barındıran sistemlerde görünmeyen olası ilave bileşenleri bulmak
- ✓ Öte-uyduları keřfetmek
- ✓ Gezegen-gezegen ve yıldız-gezegen arası dinamik etkileşmeleri çalışmak
- ✓ Çoklu gezegen sistemlerindeki gezegenlerin kütlelerini kesinleřtirmek
- ✓ Çift yıldızların etrafındaki gezegenleri keşfetmek

1. Işık-Zaman Etkisi (Light (Travel) Time Effect, LiTE)

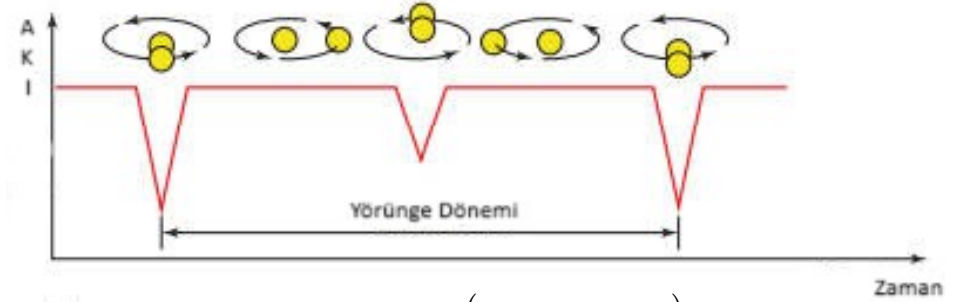


$M_1 - M_2$ sistemini gözlediğinizi ve bu sistemin de gözleyemediğiniz bir M_3 kütlesi ile ortak kütle merkezi etrafında yörünge hareketi yaptığını düşünün. Yukarıdaki konumdayken gözlediğiniz bir minimum zamanın (örtme ya da geçiş) zamanı t_1 olsun.



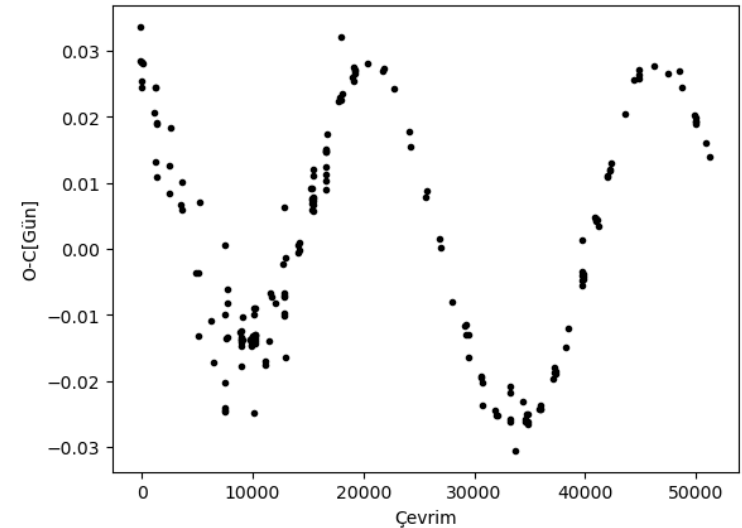
Yörünge hareketi nedeniyle gözlediğiniz sistem sizden bir miktar uzaklaşıyor olsun. Bu sırada gözleyeceğiniz bir geçiş ya da tutulmanın zamanı (t_2) ışık hızı sonlu olduğundan t_1 'e göre daha geç olacaktır! Bu şekilde gözlediğiniz $M_1 - M_2$ sisteminin, gözleyemediğiniz M_3 nedeniyle minimum zamanları düzenli değişir. Bu değişimden M_3 'ün varlığını tespit edebilirsiniz!

Geçiş ortası ya da tutulma minimumları hassas bir şekilde belirlenen sistemlerin geçmişte gözlenmiş bir minimum zamanları (T_0) ve belirlenmiş bir yörünge dönemleri (P) referans alınarak herhangi bir çevrimdeki (epoch, E) geçiş / tutulma zamanları hesaplanabilir (calculated: C).



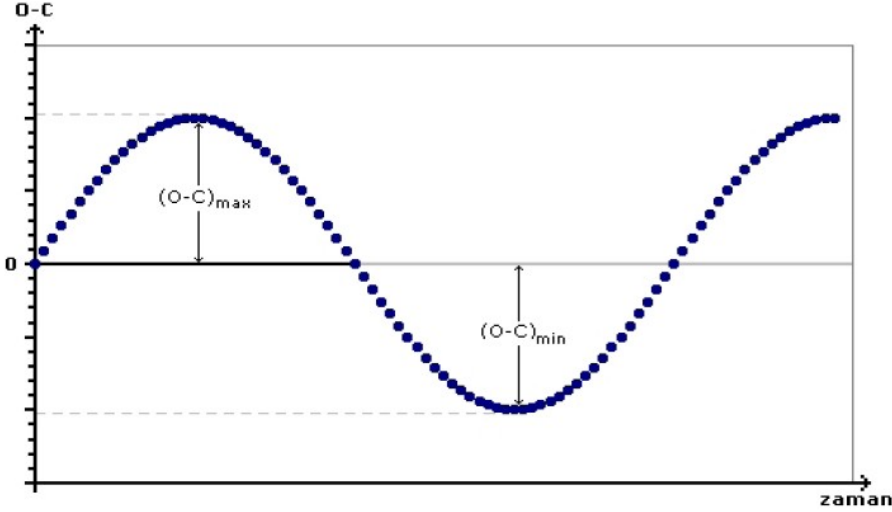
$$O - C = T - (T_0 + E \times P)$$

O-C değerlerinin zamana ya da çevrim sayısına karşılık grafiğe aktarılmasıyla O-C eğrisi elde edilir.



1. Işık-Zaman Etkisi

O-C (ETV / TTV) Eğrisi Analizi



Gerçekte gözlenen (T) geçiş / tutulma zamanı (O: observed) arasında ışık zaman etkisi nedeniyle oluşan farkın genliği (A_{LiTE}), çift sistemin kütle merkezinin gözlenemeyen üçüncü cisimle ortak kütle merkezi etrafındaki yörüngesinin büyüklüğüne (a_{12}), üçüncü cismin yörünge eğim açısına (i_3) ve yörüngenin dış merkezliliği (e_3) ile enberi noktasının boylamına (ω_3) bağlıdır (Irwin 1952).

$$A_{LiTE} = \frac{1}{2} [(O-C)_{maks} - (O-C)_{min}] = \frac{a_{12} \sin i' \sqrt{1 - e_3^2 \cos^2 \omega_3}}{173.15}$$

O-C eğrisinin Kepleryan modeliyle elde edilen A_{LiTE} , e_3 ve ω_3 kullanılarak $a_{12} \sin i_3$ değeri elde edilebilir. Bu formülde kullanılan 173.15 sabiti $a_{12} \sin i_3$ değerinin Astronomi Birimi (AB) cinsinden bulunmasını sağlayacak bir dönüşüm katsayısıdır. Aynı zamanda Kepleryan model ile ışık zaman etkisinin dönemi de bulunur. Kepler'in üçüncü yasası yardımıyla dönem ve $a_{12} \sin i'$ değerlerini kullanarak cismin kütle fonksiyonu ($f(m_3)$) elde edilir.

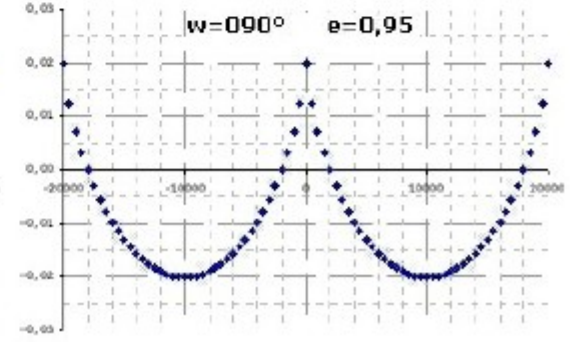
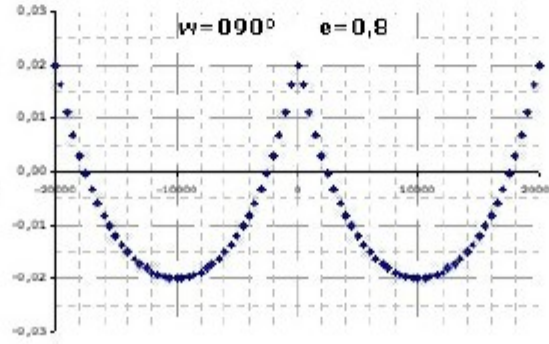
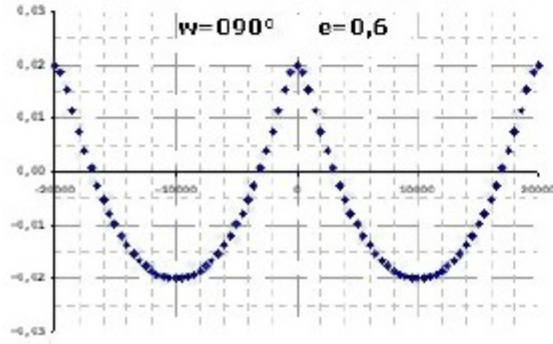
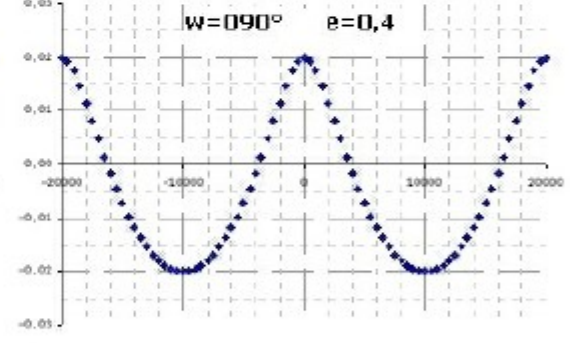
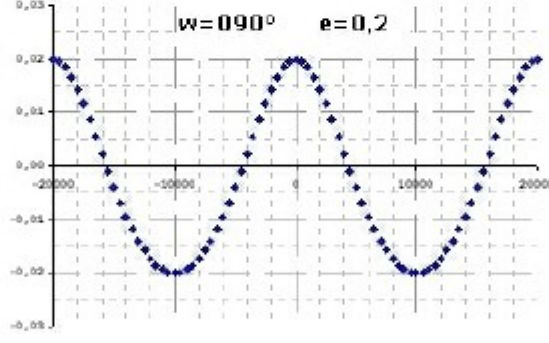
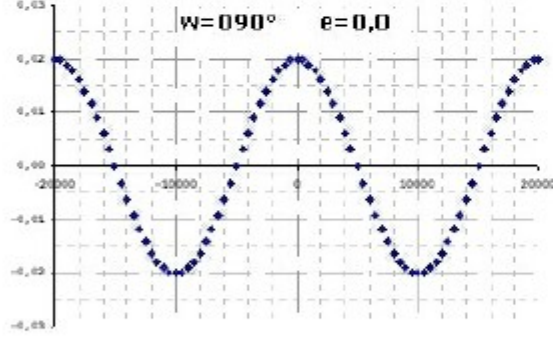
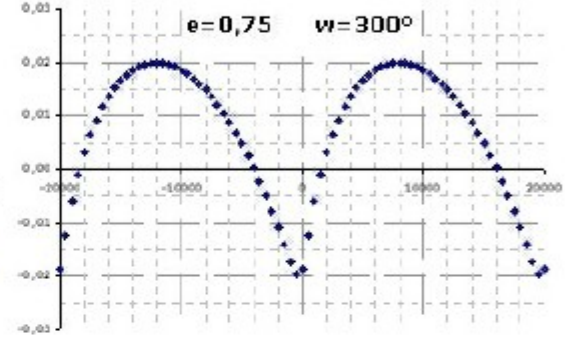
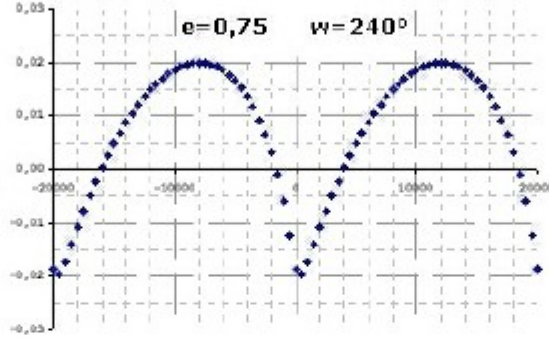
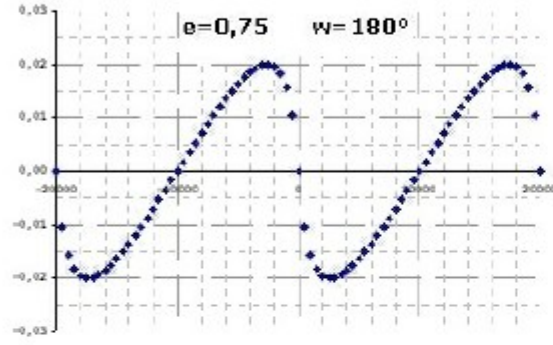
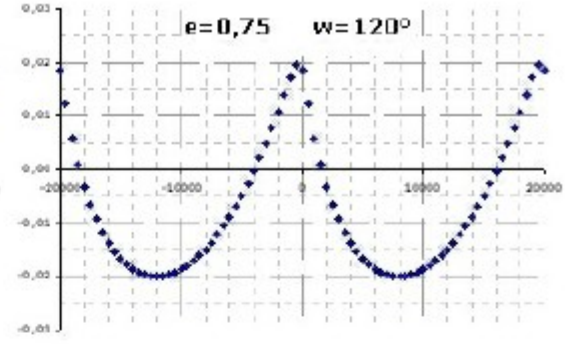
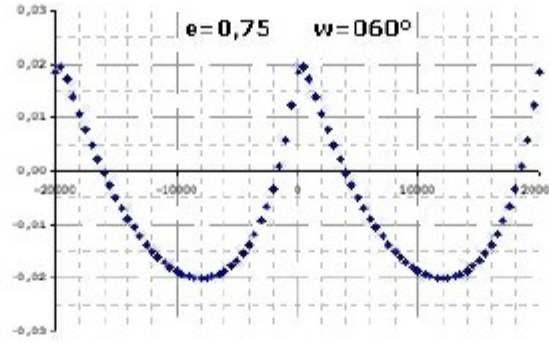
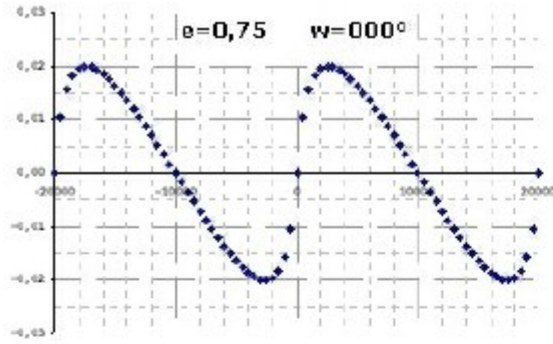
Bu kütle fonksiyonunda P_{LiTE} birimi yıl, $a_{12} \sin i'$ birimi Astronomi Birimi alınırsa bulunan kütle fonksiyonu Güneş kütlesi biriminde olur. Birinci ve ikinci cismin kütlesi biliniyorsa üçüncü cismin kütlesine yörünge eğim açısı dejenerasyonu altında ($m_3 \sin i_3$) ulaşılabilir

Not: İkili sistemle onun etrafında dolanan üçüncü cismin aynı düzlemde yörünge hareketi yaptıkları varsayılırsa $i' = i_3$ olur.

$$f(m_3) = \frac{(a_{12} \sin i')^3}{P_{LiTE}^2}$$

$$f(m_3) = \frac{(m_3 \sin i_3)^3}{(m_1 + m_2 + m_3)^2} = \frac{1}{P_{LiTE}^2} \left[\frac{173.15 A_{LiTE}}{\sqrt{1 - e_3^2 \cos^2 \omega_3}} \right]^3$$

$$a_3 \sin i_3 = \frac{a_{12} (m_1 + m_2)}{m_3 \sin i_3}$$



3. cismin çeşitli ω ve e değerleri için O-C değişimi

$$O - C = \frac{A_{LTE}}{\sqrt{(1 - e_3^2 \cos^2 \omega_3)}} \left\{ \left[\frac{1 - e_3^2}{1 + e_3 \cdot \cos v} \sin(v + \omega_3) \right] + e_3 \sin \omega_3 \right\}$$

2. Gezegen-Gezegen Etkileşimleri

Gezegenlerin birbirleriyle **kütleçekimsel** olarak **etkileştiği**, ancak rezonans durumunun dikkate alınmadığı durumda, dış-merkezli ($e_2 > 0$, eksantrik) bir yörüngede dolanan bir gezegen nedeniyle çembersel ($e_1 = 0$) bir yörüngede dolanan bir iç gezegenin ($N + 1$). geçiş zamanı:

$$T_{N+1} = N \times P_1 + \frac{m_2(1-e_2^2)^{-2/3}}{2\pi(m_*+m_1)} \frac{P_1^2}{P_2} (\theta_2 + e_2 \sin(\theta_2))$$

Gezegenlerin birbirleriyle **kütleçekimsel** olarak **etkileştiği**, ve rezonans durumunun dikkate alınmadığı durumda, her iki gezegenin de çembersel ($e_1 = e_2 = 0$) yörüngeler üzerinde hareket ettiği varsayımıyla geçiş zamanındaki değişim ($\mu_{\text{pert.}}$: tedirgin eden cismin indirgenmiş kütlesi)

$$\delta t \approx 0.7 \mu_{\text{pert.}} \left(\frac{a}{a_2 - a_1} \right)^2 P$$

Gezegenlerin birbirleriyle **kütleçekimsel** olarak **etkileştiği**, ve **1. dereceden $j : j+1$ rezonans** durumunun dikkate alındığı durumda maksimum geçiş zamanı değişimi:

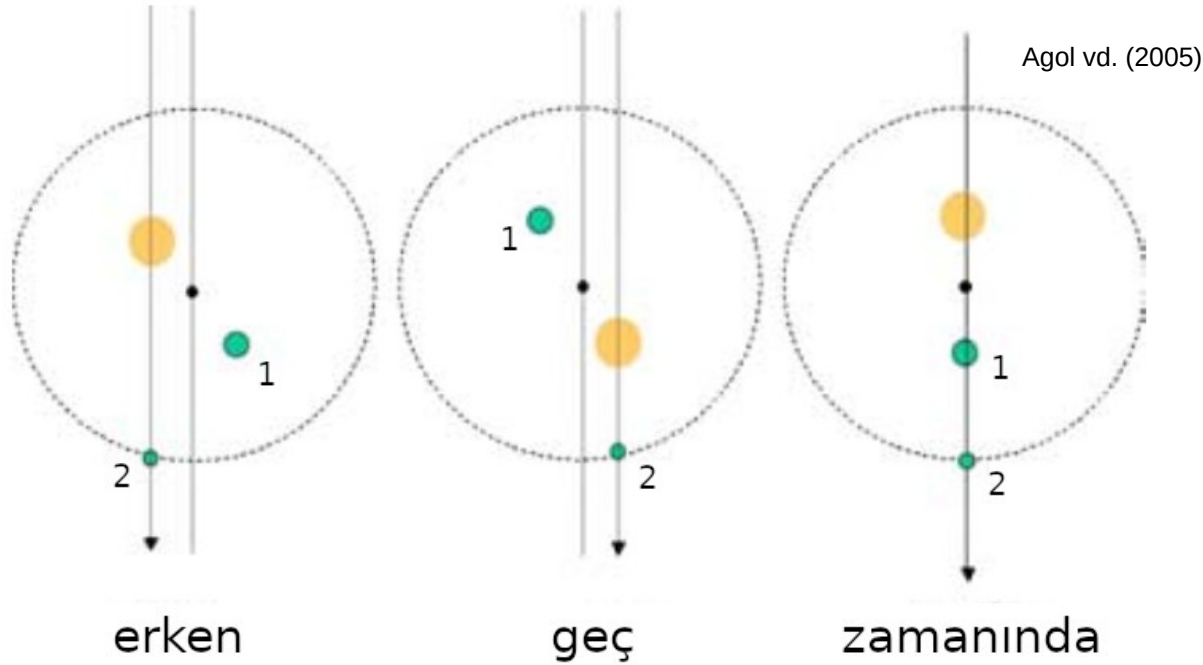
$$\delta t_{\text{max}} \sim \frac{P}{4.5 j} \frac{m_{\text{pert.}}}{m_{\text{pert.}} + m_{\text{geçiş}}}$$

$l = 0, 1, \dots, N$. cisimler için $\alpha_{ij} = \min(a_i / a_j, a_j / a_i)$ yarı-büyük eksen uzunlukları oranı, $\theta_{ij}(\lambda_i, e_i, \omega_i, i_i, \Omega_i, \lambda_j, e_j, \omega_j, i_j, \Omega_j)$ olmak üzere **genel olarak**:

$$\delta t_i = P_i \sum_{j \neq i} \frac{m_j}{m_*} f_{ij}(\alpha_{ij} \theta_{ij})$$

Çeşitli konfigürasyonlar için gezegen-gezegen etkileşimi kaynaklı Geçiş Zamanları Değişimi (TTV) ifadesinin çıkarılışı Borkovits vd. (2003), Agol vd. (2005), Nesvorný and Morbidelli (2008); Nesvorný (2009); Nesvorný and Beaugé (2010); Agol and Deck (2016); Deck and Agol (2016) tarafından ele alınmıştır. Gezegen-gezegen etkileşmesi kaynaklı TTV **rezonans durumları** için maksimumdur.

3. Yörünge Geometrisi Etkisi

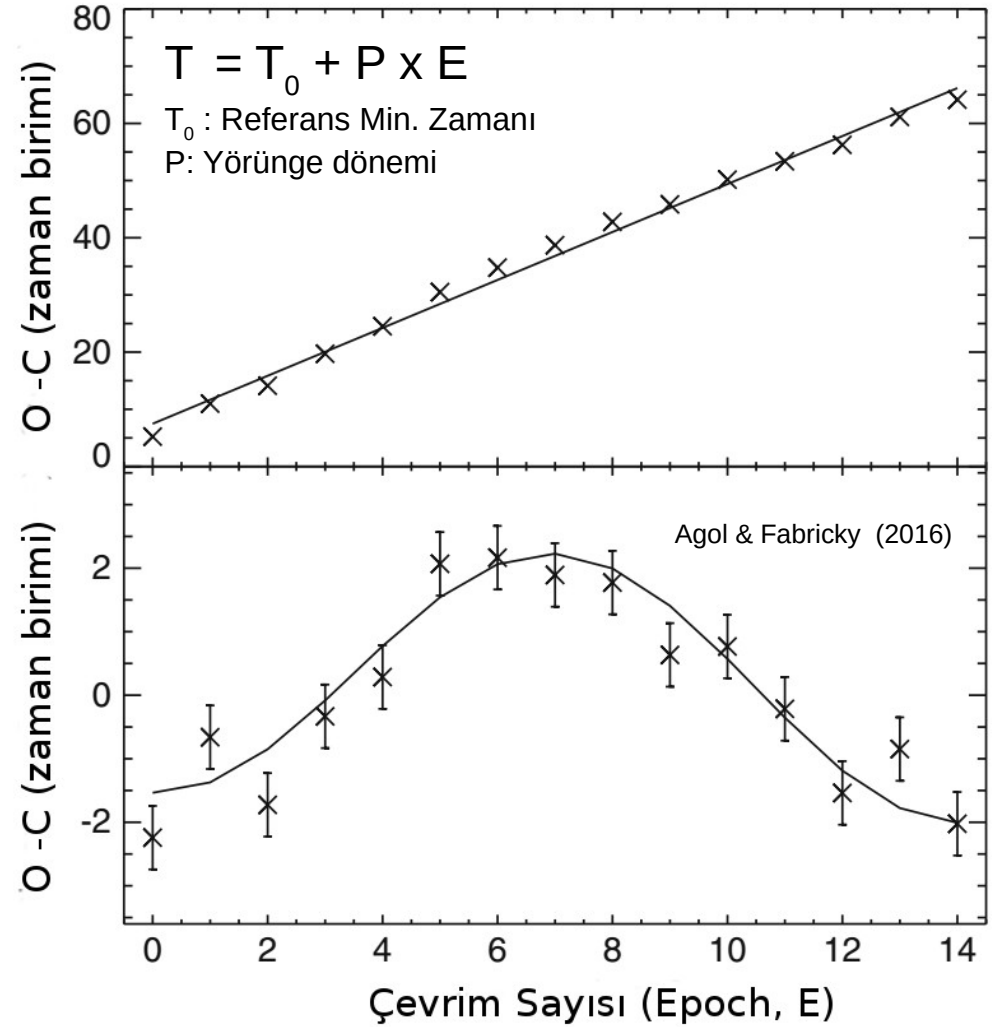
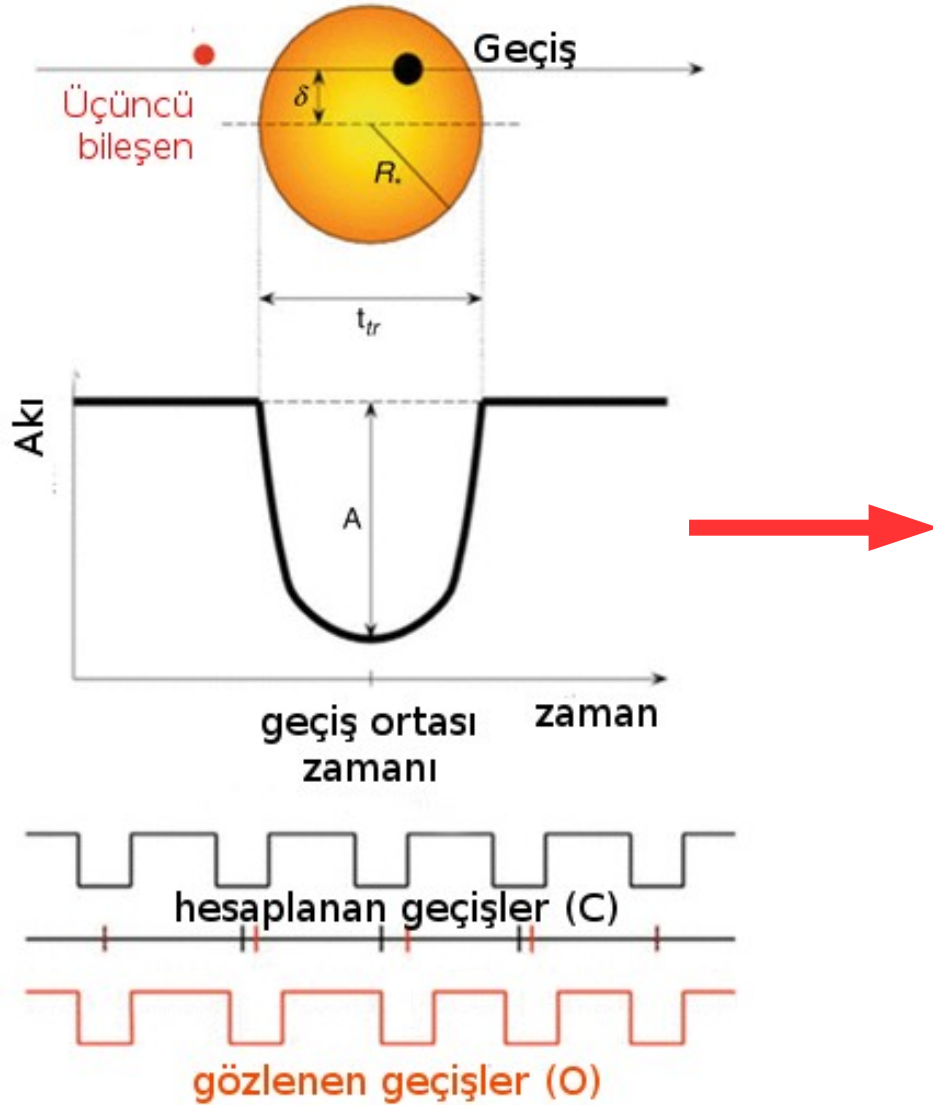


Işık-zaman etkisinin düzeltilmesi sonrası, yıldızla ortak kütle merkezleri etrafında hareket eden gezegenler (1,2) arası etkileşimlerin yok sayılması, ikisinin aynı düzlemde ($i = 90^\circ$) yörünge hareketi yaptığı ve $(1-e_2) a_2 \gg (1-e_2) a_1$ varsayılması durumunda dahi yıldızın ortak kütle merkezi etrafındaki cisimler kaynaklı hareketi gereği, geçişler yörüngenin farklı noktalarında ve dolayısıyla farklı zamanlarda gerçekleşecektir. Yukarıdaki durum için dıştaki gezegenin (2) geçiş zamanındaki değişim aşağıdaki (δt_2) kadar olur.

$$\mu_i: \text{indirgenmiş kütle,} \quad \mu_i = \frac{m_i}{M_{\text{toplama}}} \sim \frac{m_i}{m_*} \longrightarrow \delta t_2 \approx \frac{P_2 \mu_1 r_1 \cos(\omega_1 + \theta(t)) \sqrt{1-e_2^2}}{2 \pi a_2 (1-e_2 \sin(\omega_2))}$$

r_i : konum vektörü o.ü.

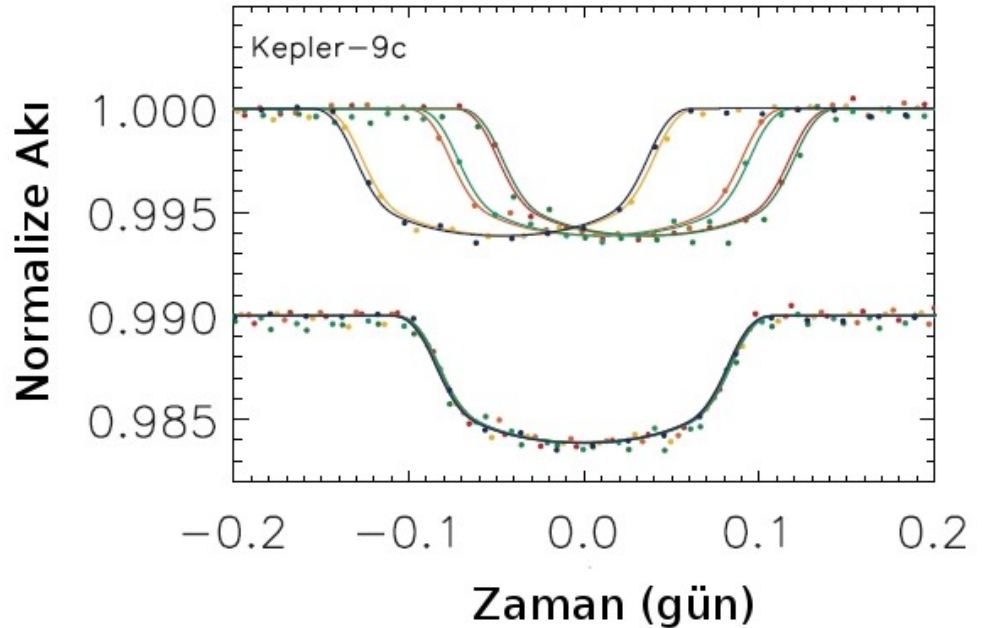
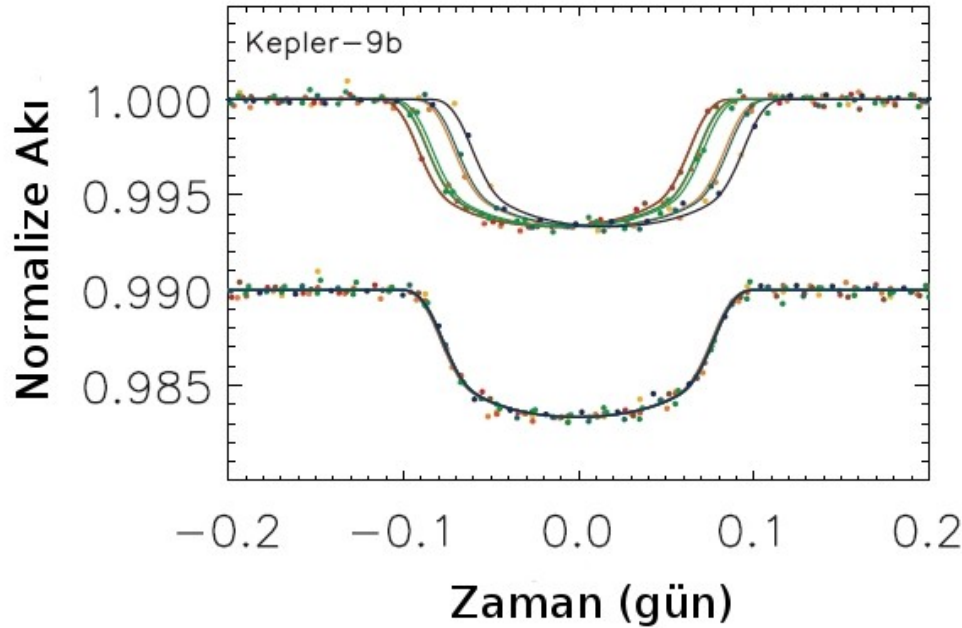
Zamanlama Gözlemleri ve Analiz



Üstteki grafikteki lineer trend referans seçilen efemeris elemanlarının (T_0 ve P) üzerindeki belirsizlikler kaynaklıdır. Grafiğe uyumlanan doğrunun y-eksenini kestiği nokta (δ_{T0}) ve eğimi (δ_P) kullanılarak bu değerler düzeltilir ($T_0 + \delta_{T0}$, $P + \delta_P$) ve bu şekilde lineer trend giderilerek alt paneldeki O-C eğrisi elde edilir.

İlk TTV Gözlemi: Kepler-9 Sistemi

TTV'nin kuşkusuz olarak tespit edildiği ilk sistem Kepler-9 sistemidir (Holman et al. 2010). Hem Kepler-9b, hem de Kepler-9c'nin transitlerinde TTV görünür (aşağıdaki şekil). Ancak her ikisi de transit yöntemiyle keşfedilmiş gezegenler olduğu için TTV ile ilk gezegen keşfi bu değildir. Aynı durum ilk keşiften önce yine TTV'si belirlenen Kepler-11 (Lissauer et al.2011) için de geçerlidir.



Holman vd. (2010)

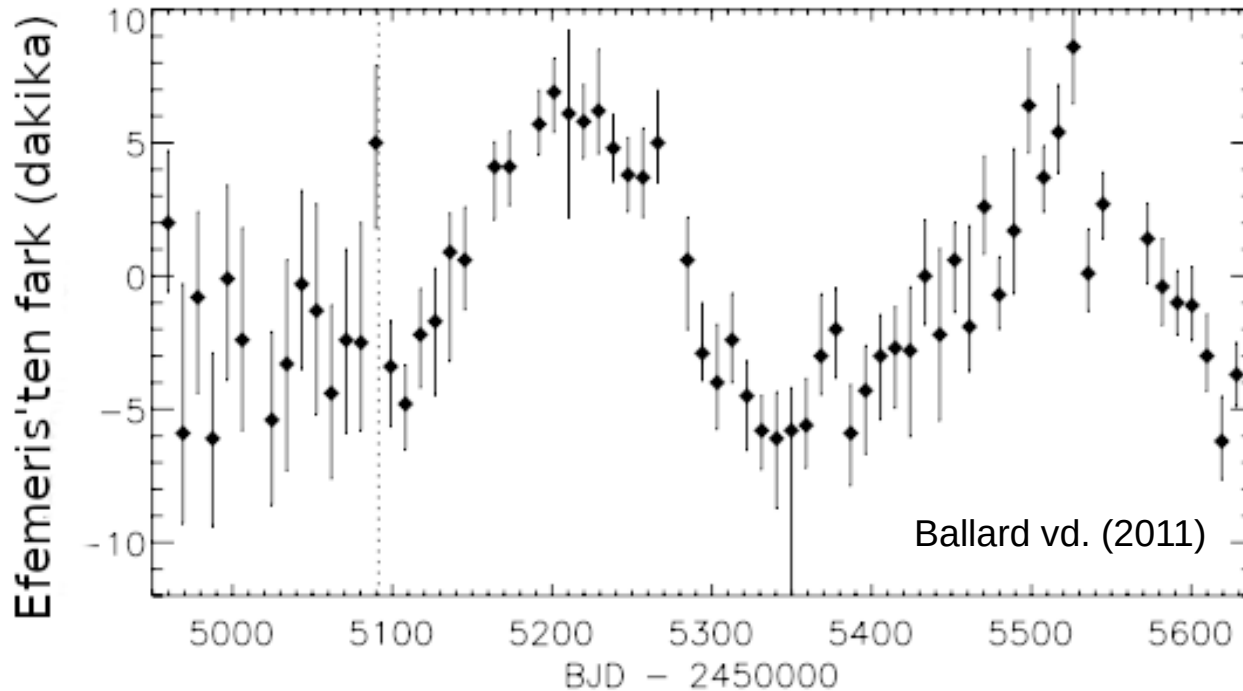
2:1 Rezonans

$P_b = 19.24$ gün

$P_c = 38.91$ gün

İlk TTV Keşfi: Kepler-19c

Her ne kadar makalesinde bu yöntemle keşfedilen ikinci gezegen olduğu söylene de aslında bu yöntemle keşfedilen ilk gezegen Kepler-19c'dir (Ballard et al. 2011). Zira bu makalede ilk keşifler için WASP-10c ve d (Maciejewski et al. 2011) 'ye atıf yapılmıştır. Oysa ki sonraki çalışmalar (Beck et al. 2019) bu konuda olumlu sonuç vermemiştir. Bazı kaynaklarda ilk TTV keşfi olduğu iddia olunan Kepler-46 c de ilk bulunan TTV gezegenlerinden olmakla birlikte keşfi biraz daha sonradır (1 yıl kadar sonra Nesvorny et al. 2012).

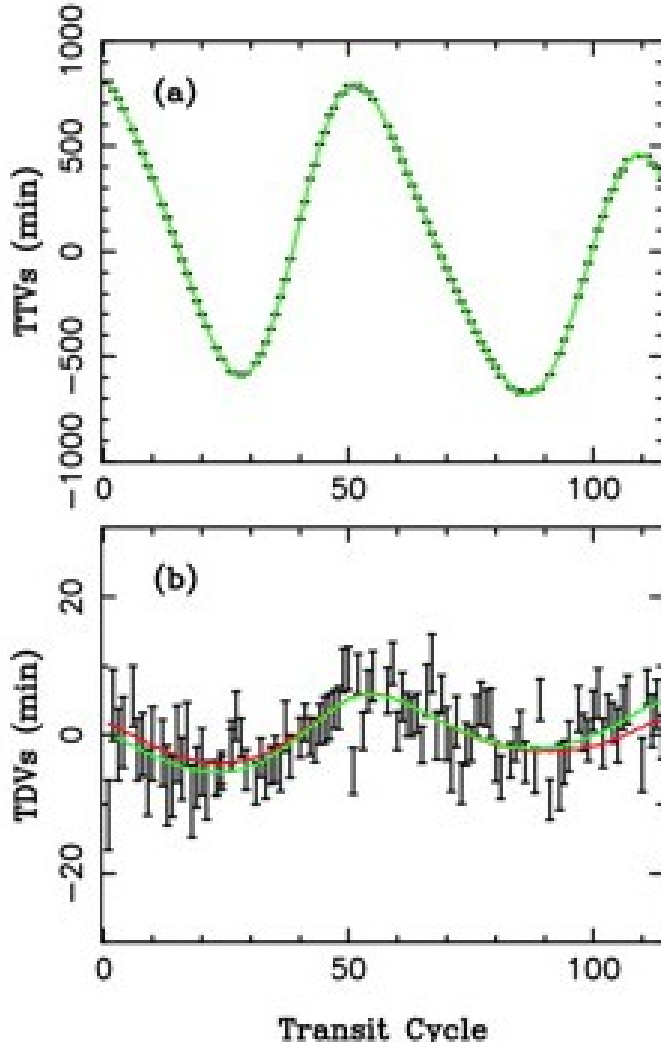


TTV Keşifleri (35*)

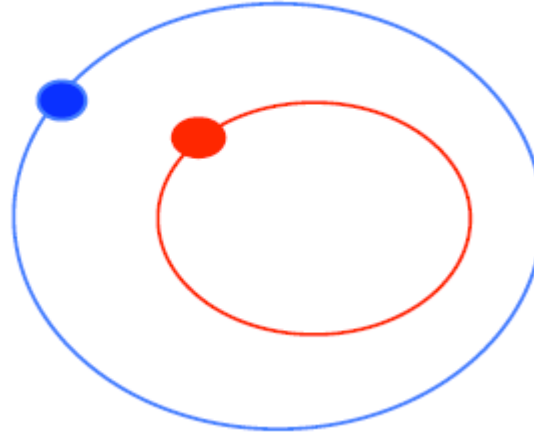
Gezegen	Keşif yılı	Araştırma	Yayın
Kepler-19 c	2011	Kepler	Ballard vd. (2011)
Kepler-46 c	2012	Kepler	Saad-Olivera vd. (2017)
Kepler-46 c	2012	Kepler	Nesvorny vd. (2012)
Kepler-122 f	2014	Kepler	Morton vd. (2016)
Kepler-338 e	2014	Kepler	Yayınlanmadı
Kepler-37 e	2014	Kepler	Yayınlanmadı
Kepler-414 c	2014	Kepler	Berger vd. (2018)
Kepler-415 c	2014	Kepler	Yayınlanmadı
Kepler-416 c	2014	Kepler	Yayınlanmadı
...	...	...	...
Kepler-411 e	2018	Kepler	Sun vd. (2019)
Kepler-82 f	2019	KOINet	Freudenthal vd. (2019)
WASP-126 c	2019	TESS	Pearson (2019)
WASP-18 c	2019	TESS	Pearson (2019)
Kepler-160 d	2020	Kepler	Heller vd. (2020)
...	...	...	...
AU Mic d	2023	Yer / TESS / CHOPS	Witrock vd. (2023)

* 2025-05-21 itibarı ile NASA Exoplanet Archive

Geçiş Zamanları Değişimi (Transit Duration Variation, TDV)



KOI-142



2:1 Rezonans

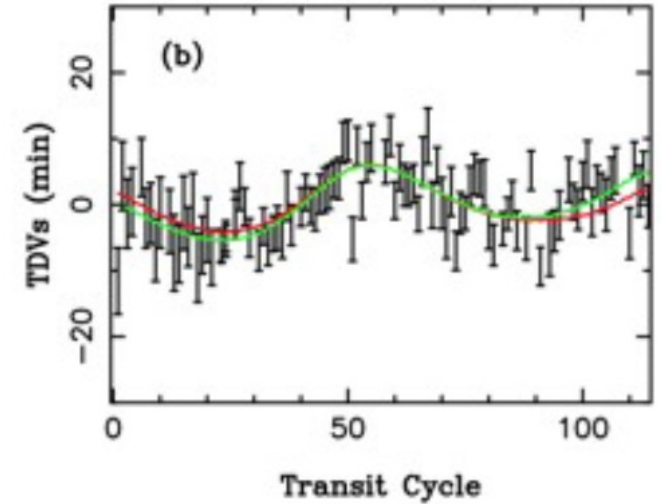
$P_b = 10.95$ gün

$P_c = 22.34$ gün

Bu durumda geçişin
süresi de değişebilir

→

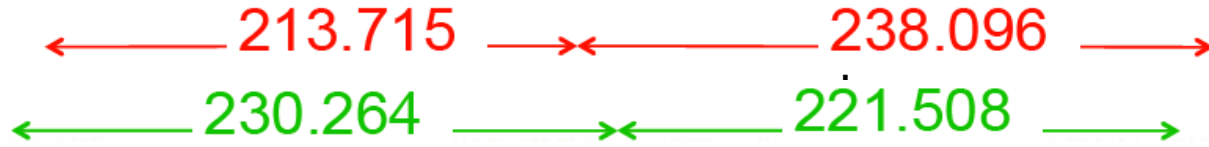
Geçiş Süresi Değişimi
(ing. Transit Duration
Variation, TDV) gözlenir!



Mazeh vd. (2013), Nesvorny vd. (2013)

Gezegen-gezegen arası etkileşmeler nedeniyle gezegenlerin yörünge hızları da, buna bağlı olarak geçiş yaptıkları süre de değişir. Bu değişim KOI-142 sisteminin de aralarında bulunduğu az sayıda sistemin Kepler Uzay Teleskobu ile elde edilen verilerinde gözlenmiştir.

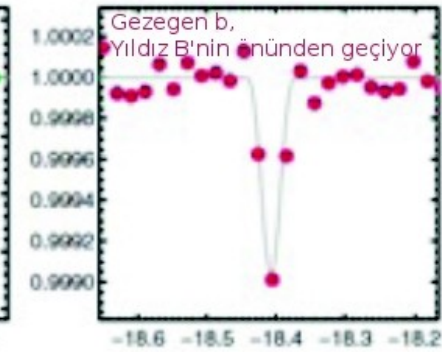
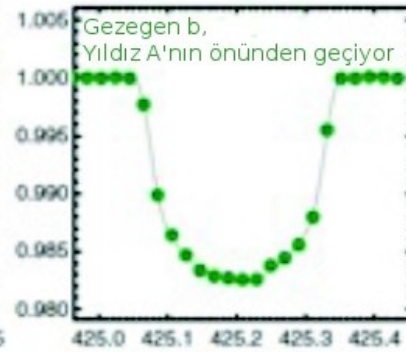
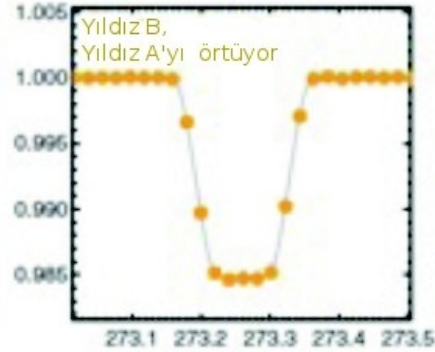
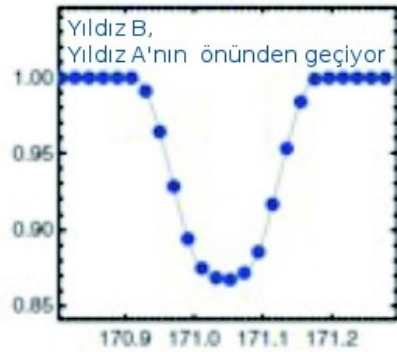
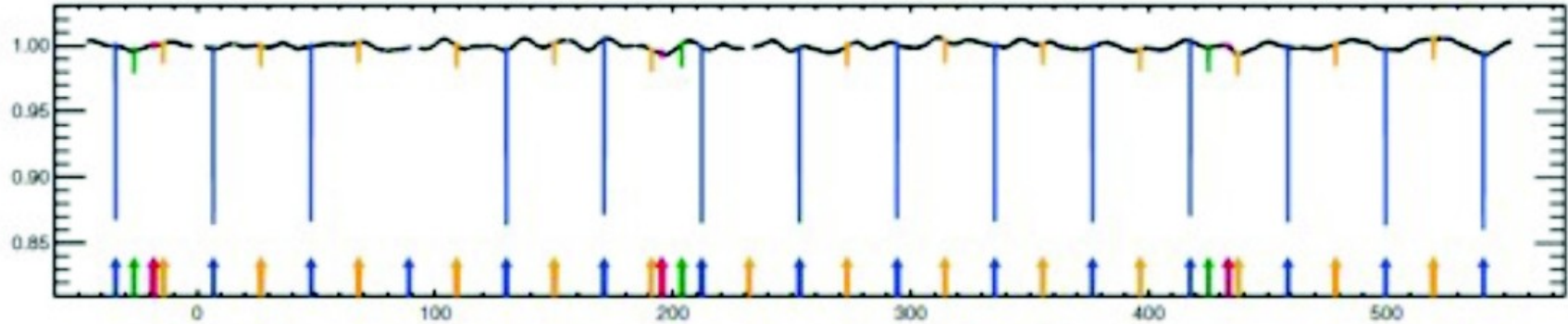
Kepler - 16b



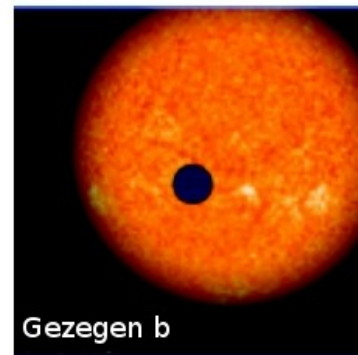
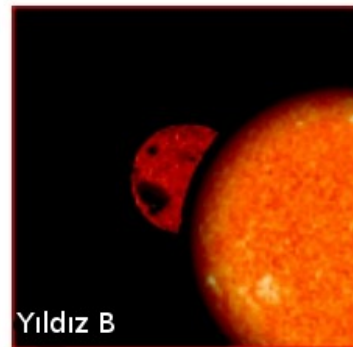
$$\Delta = 24.38$$

$$\Delta = 8.756$$

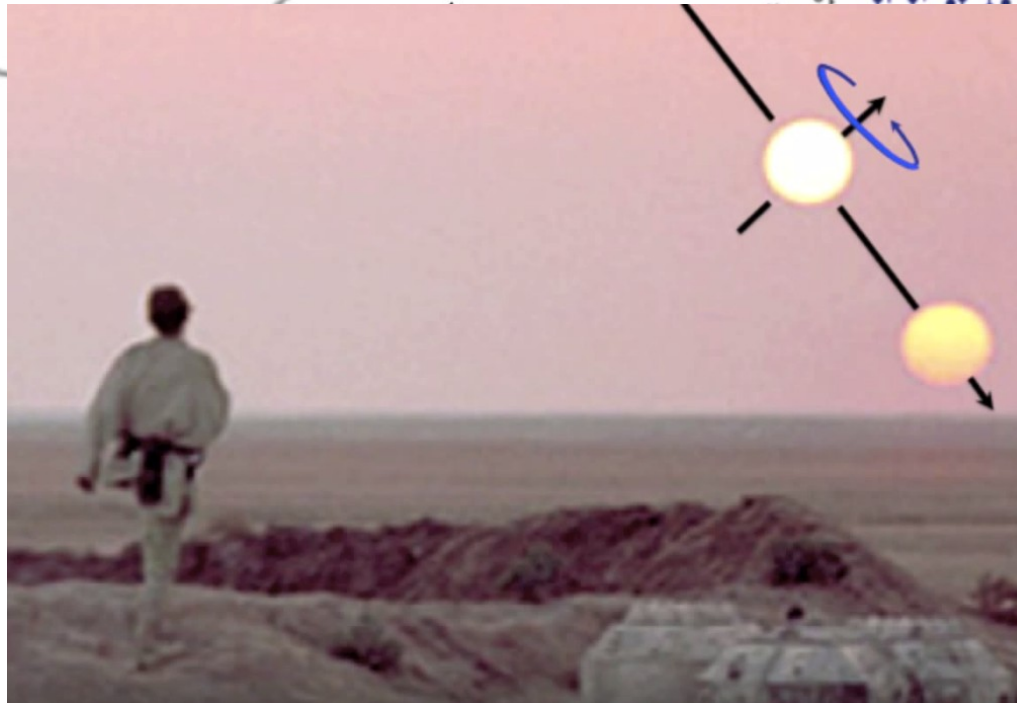
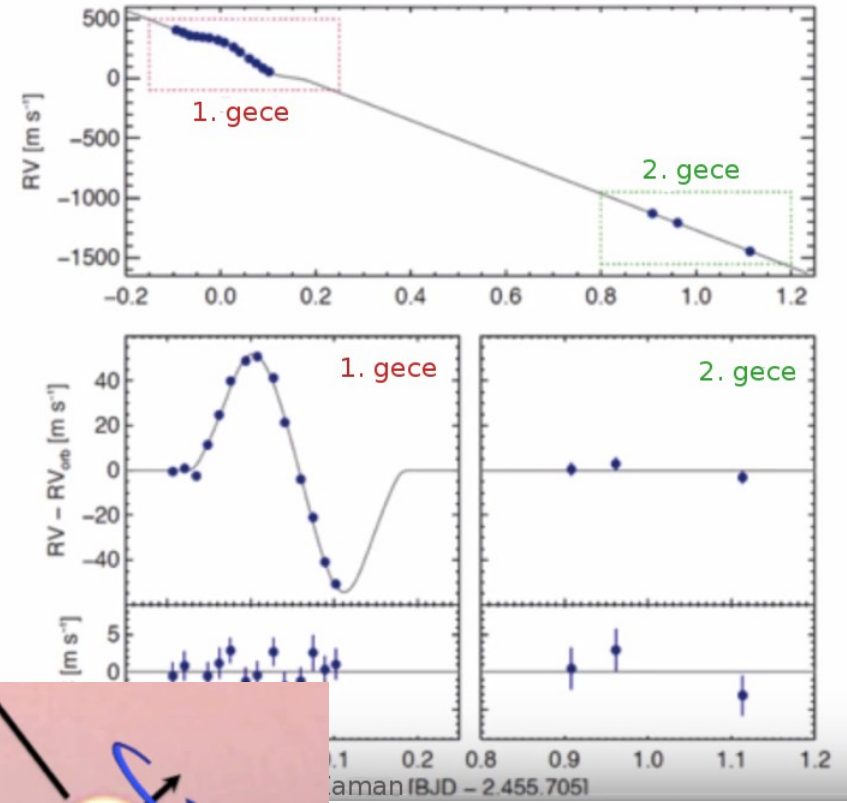
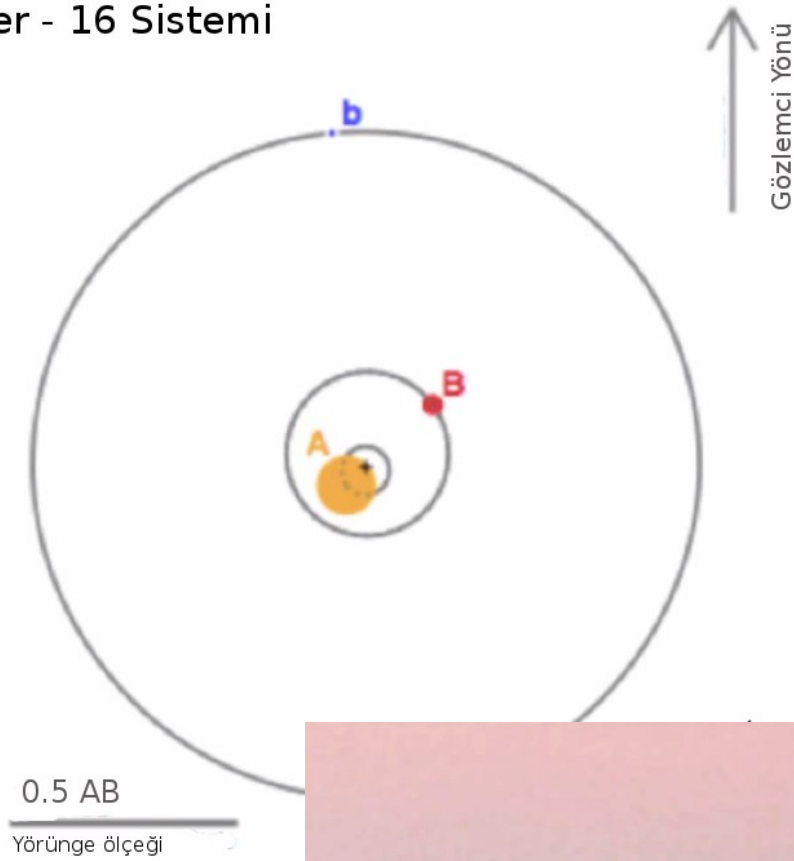
Görelî Akı



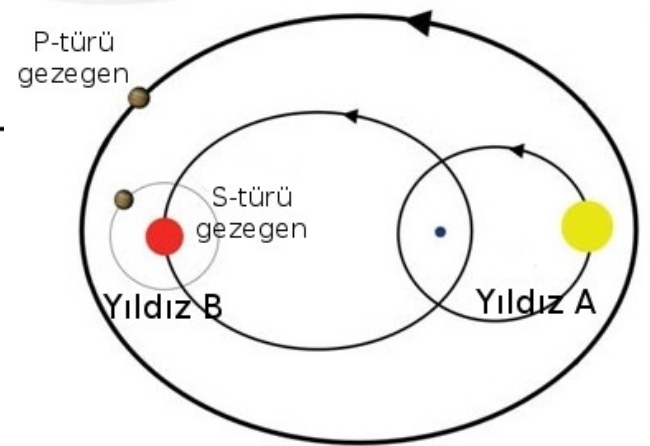
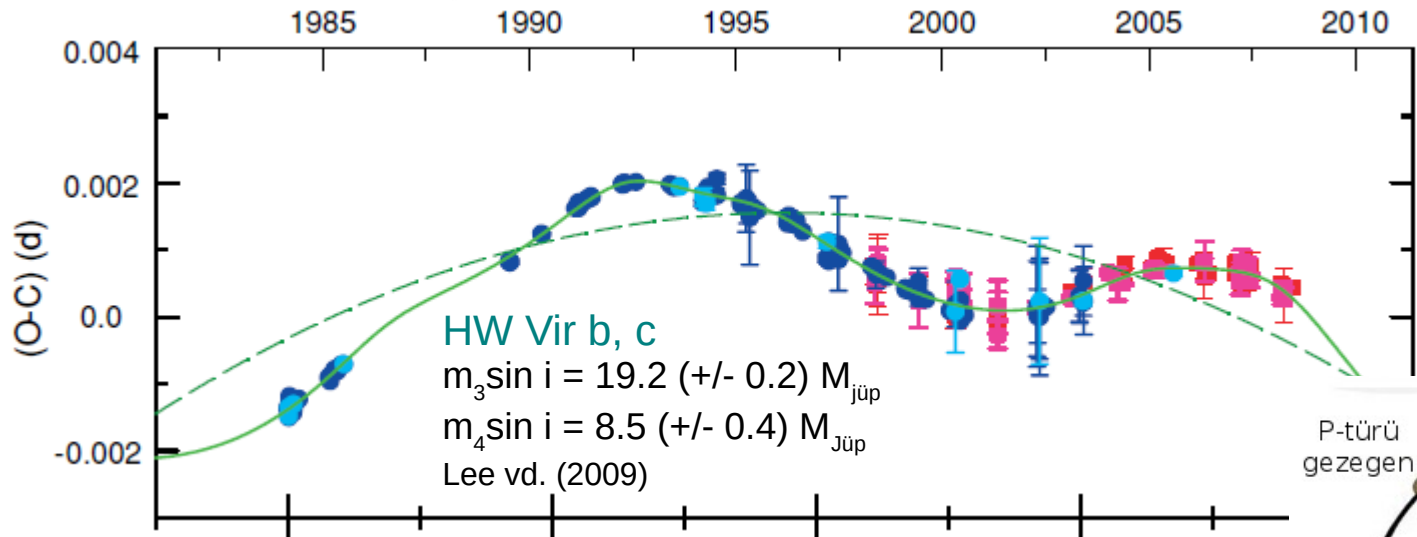
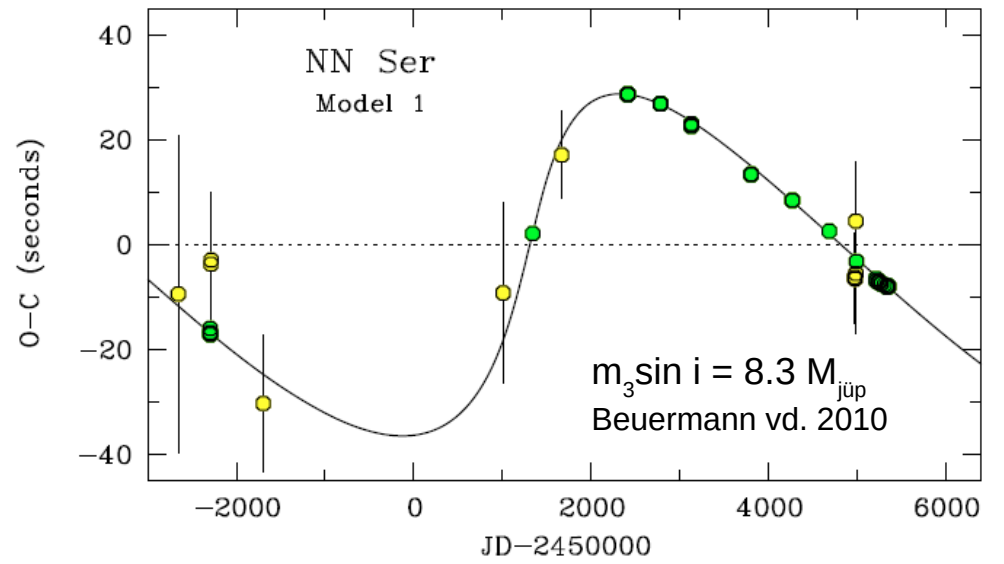
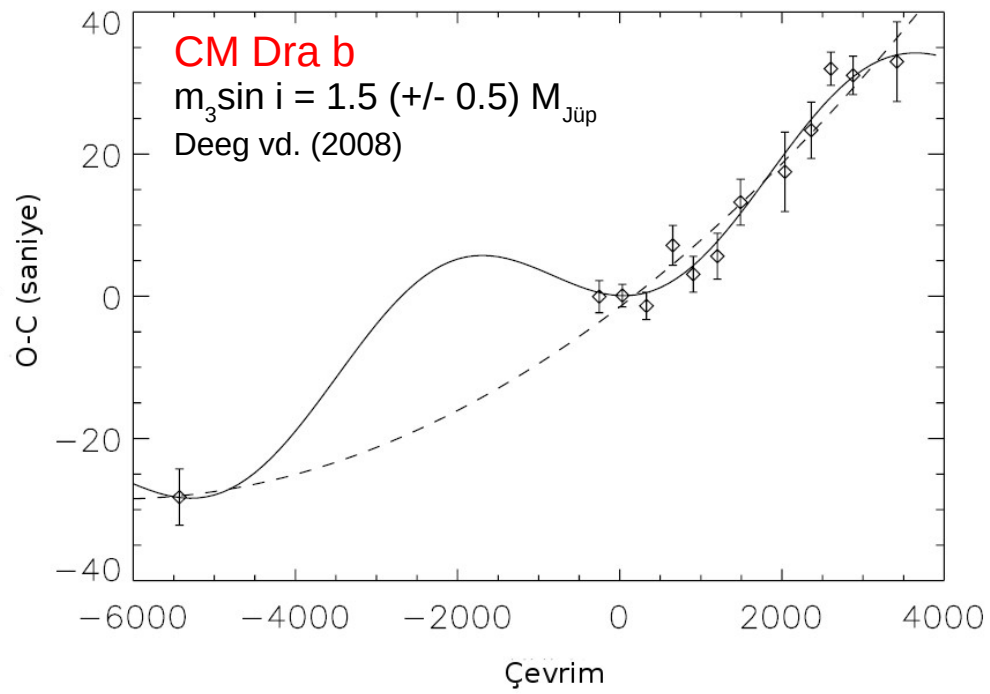
Zaman (BJD - 2455000)

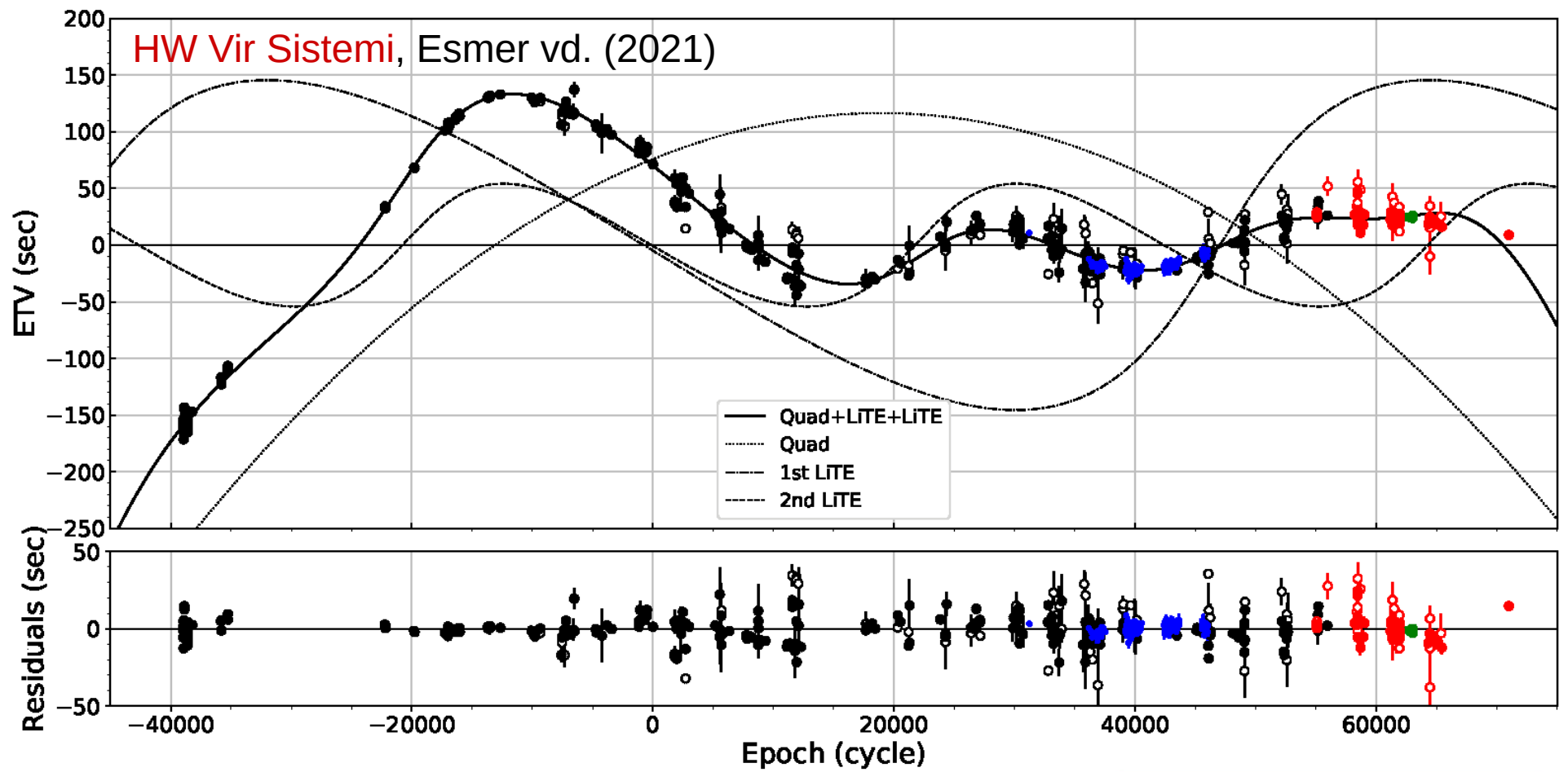


Kepler - 16 Sistemi

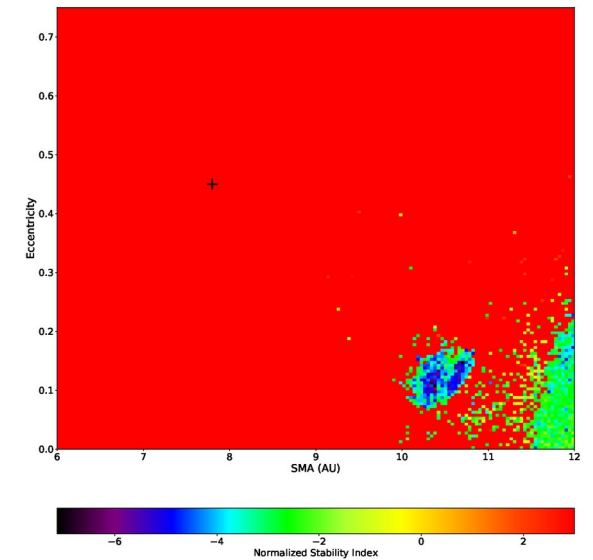


ve Rossiter-McLaughlin Etkisi



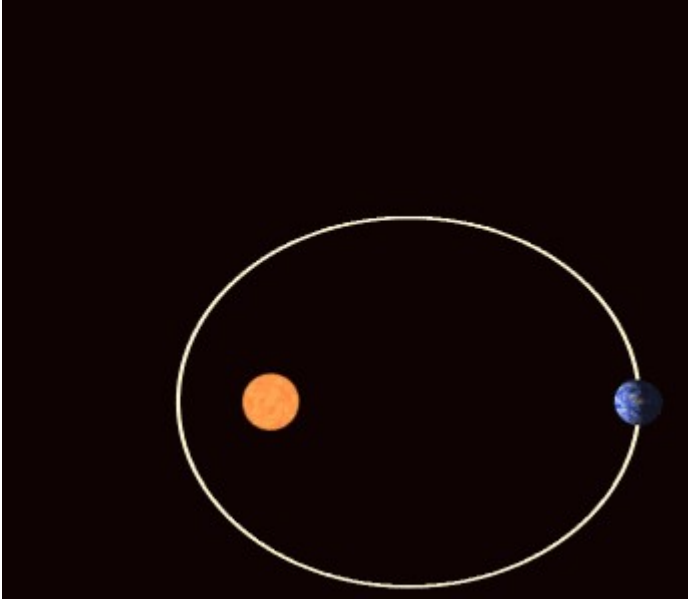


O-C analizi size sadece çevrimsel bir dönem değişim olduğunu söyleyebilir. Bu değişimin kaynağı gezegen olmayabilir. HW Vir sisteminin O-C analizinden önerilen gezegen kütleli ikinci cismin yörüngesi kararlı değil! (Esmer vd. 2021)



Geçiş / Tutulma Zamanının Diğer Değişim Nedenleri – 1

Eksen Dönmesi

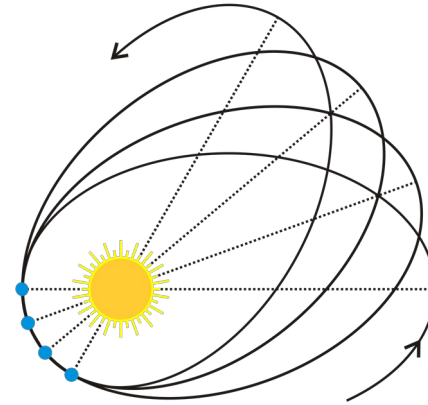


Nedenleri:

- 1) Sisteme bağlı diğer cisimlerin kütle çekim etkisi kaynaklı tedirginlik etkileri
- 2) Dönme ve iç yapı kaynaklı olarak küresel simetriden uzaklaşma sonucu dört kutuplu (quadrupole) moment değişimi
- 3) Görelilik etkileri (Merkür için 100 yılda 43" kadar küçük bir etki)

Yukarıda verilen sıra bir gezegen sistemi için aynı zamanda neden oldukları eksen dönmesi büyüklüğü için bir önem sırasındır.

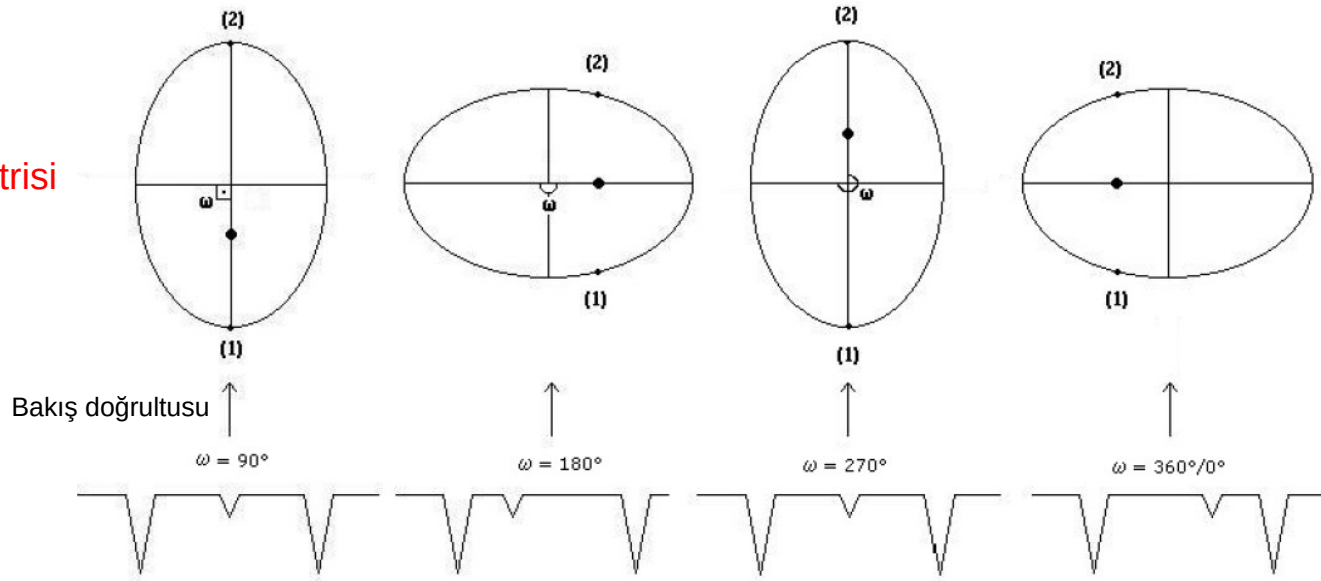
Dışmerkezliliği olan sistemlerde küçük kütleli gezegenin (ya da yoldaş yıldız bileşenin) yörüngesi de uzayda zamanla döner. Bu görselde eksen dönmesi adı verilen bu etki görselleştirme için abartılı olarak gösterilmektedir. Özellikle gezegen sistemlerinde yörünge dış merkezliliği çok daha az, eksen dönmesi hareketi çok daha küçüktür ve yavaş gerçekleşir! ©wikipedia



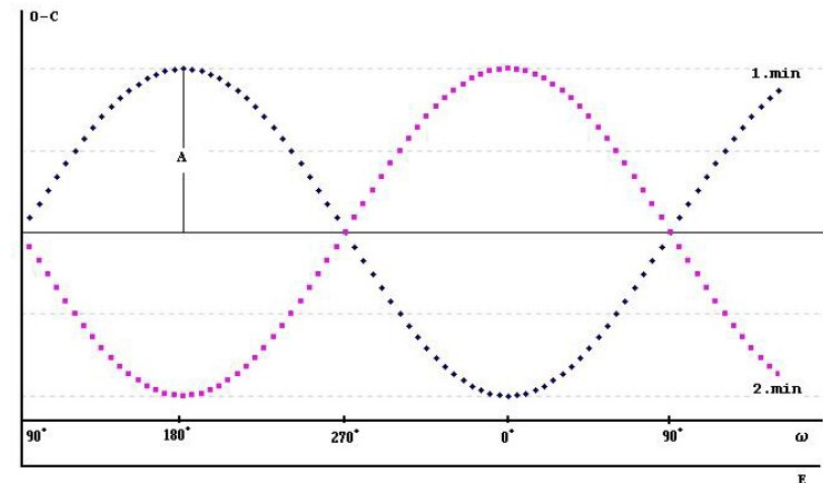
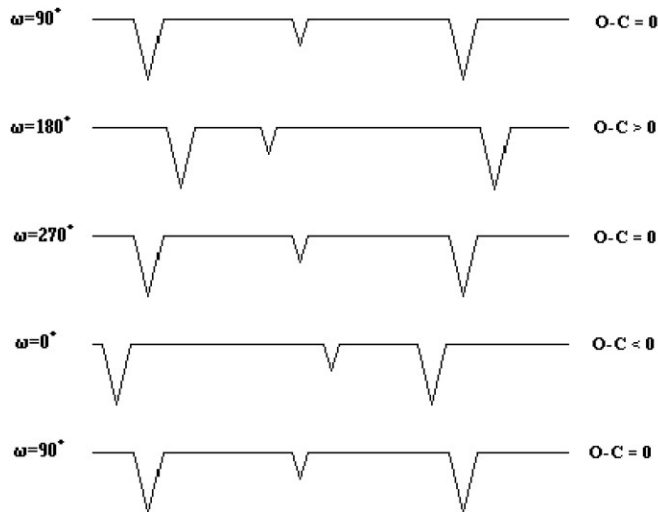
Geçiş / Tutulma Zamanının Diğer Değişim Nedenleri - 1

Eksen Dönmesi Kaynaklı Geçiş / Tutulma Zamanlaması Değişimleri

Yörünge Geometrisi



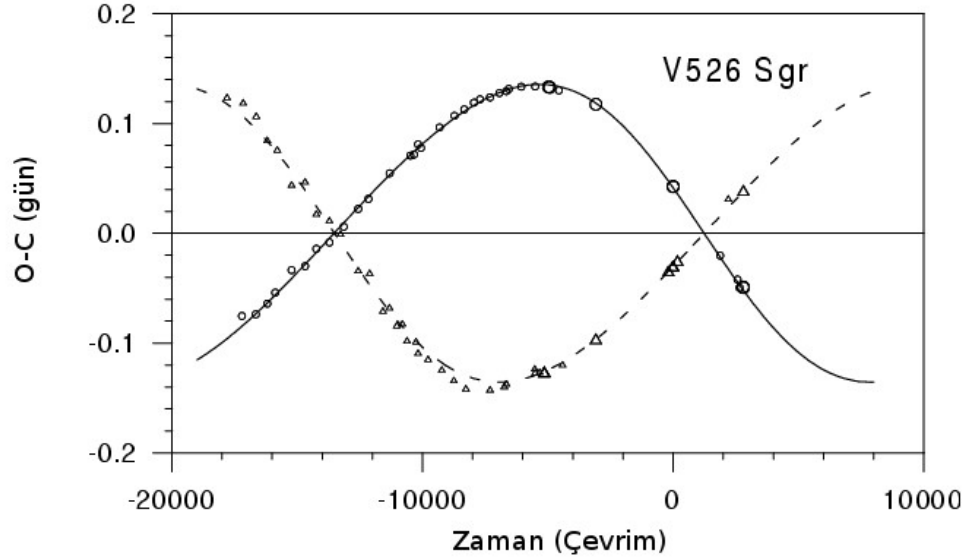
Işık Eğrisi



Eksen Dönmesi Kaynaklı Tutulma Zamanları Değişimi

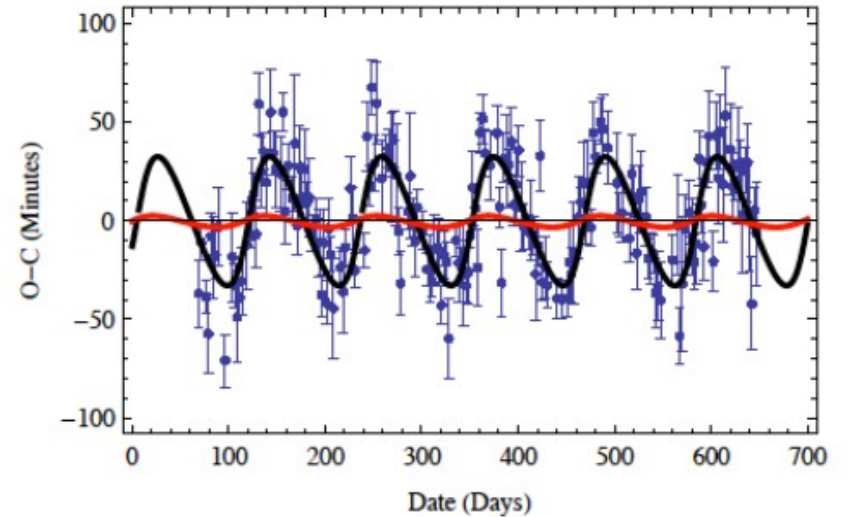
Geçiş / Tutulma Zamanının Diğer Değişim Nedenleri - 1

Eksen Dönmesi Kaynaklı Geçiş / Tutulma Zamanlaması Değişimleri



V526 Sgr Çift Yıldız Sisteminin Eksen Dönmesi Kaynaklı
Dönem Değişimi (Wolf & Zejda 2005)

Söz konusu bir gezegen sistemi olduğu vakit 2. minimumu (örtme) gözlemek düşük ışık değişimi genliği nedeniyle oldukça güçtür. Bu durumda sadece 1. minimum değişimi gözlenir.

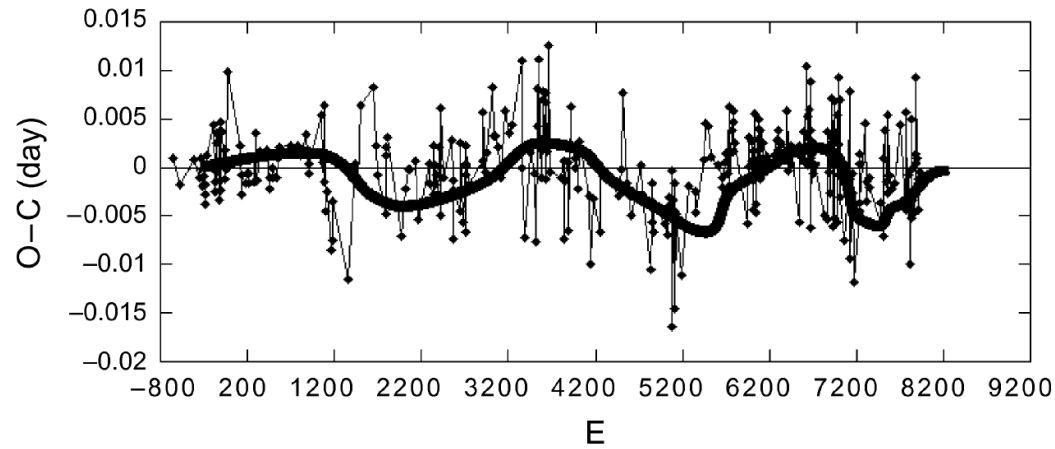


KOI-928 Sistemine Bağlı Bir Gezegen Kaynaklı
Dönem Değişimi (Steffen vd. 2011)

Geçiş / Tutulma Zamanının Diğer Değişim Nedenleri – 2

Manyetik Etkinlik Kaynaklı Geçiş / Tutulma Zamanlaması Değişimleri

Applegate kuramına (1992) göre kuvveti değişken manyetik etkinliğin yıldızın dönme hızında neden olduğu zamanla değişim, açısal momentumun korunumu gereği çoklu sistemlerde yörünge dönemlerine de yansır ve yörünge dönemi değişir. Yörünge döneminin, manyetik etkinlik kaynaklı olduğu için onun gibi çevrimsel olan bu değişimi sistemde gözlenen geçiş / tutulma zamanlarının da çevrimsel olarak daha geç ve daha erken gözlenmesine neden olur.



RZ Cas'ın manyetik etkinlik kaynaklı O-C değişimi (Golovin & Pavlenko 2005)

Manyetik etkinlik kaynaklı O-C değişimleri ilave cisim(ler)in yaratacağı değişimlerden farklı olarak katı birer döneme sahip olmayıp çevrimsel ve daha kaotiktirler. Ayrıca bu değişimlere ışık şiddeti, renk ve (tayfsal ve fotometrik) manyetik etkinlik belirteçlerinin değişimleri de eşlik eder. Dolayısı ile bu değişimlerin takip edilebileceği gözlemlerin varlığında ilave cisim(ler)in yaratabileceği O-C değişimlerinden ayırdedilebilmeleri de mümkündür.

Geçiş / Tutulma Zamanının Diğer Değişim Nedenleri – 3

Bileşenler Arası Kütle Aktarımı

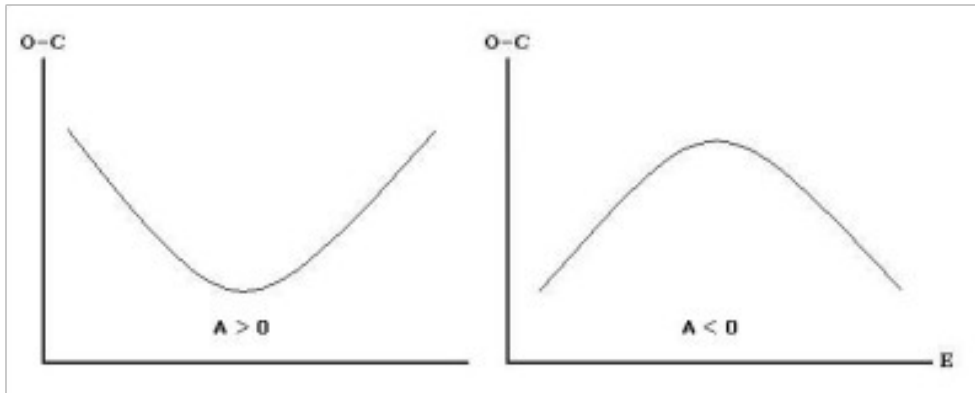
Eğer çift bileşenleri arasında korunumlu kütle aktarımı varsa, sistemin kütle oranı değişeceğinden yörünge dönemi de değişir ve O-C eğrisinde parabolik bir değişim meydana gelir. Bu değişim aşağıdaki ifadeyle temsil edilebilir.

$$O-C = T - (T_0 + E \times P + A \times E^2)$$

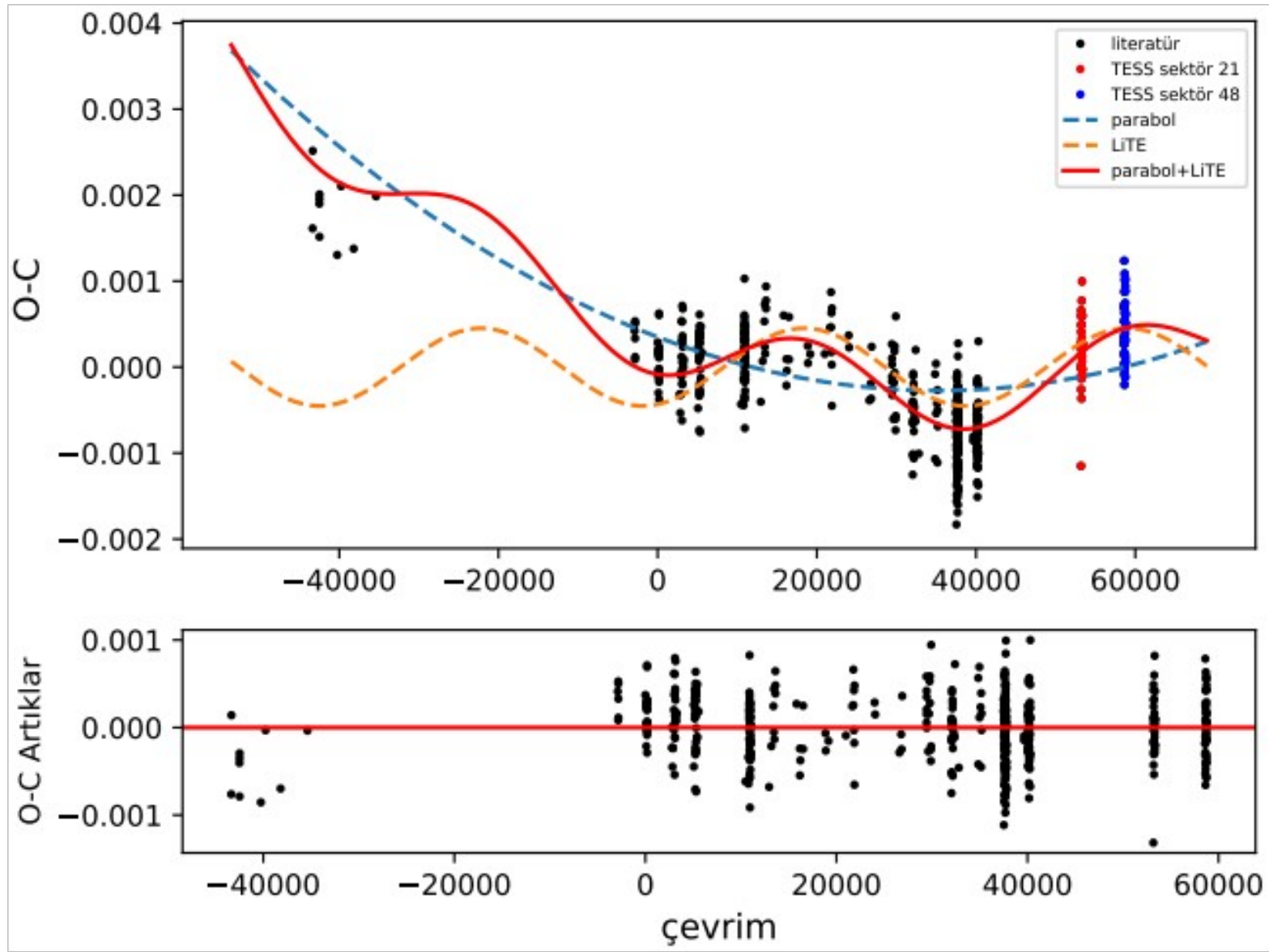
Burada T_0 ve P sırasıyla referans minimum zamanı ve yörünge dönemi, T gözlenen minimum zamanlar olup; E ise çevrim sayısını (epoch) göstermektedir. O-C değişiminin zamana (ya da çevrim sayısına, E) göre türevi doğal olarak değişimin hızını ve yönünü verecektir. O-C değişimi yörünge dönemi değişimi kaynaklı olduğu için elde edilen yörünge dönemindeki değişimdir.

$$\frac{dP}{dE} = 2A \Rightarrow \frac{dP}{dt} = \frac{2A}{P}$$

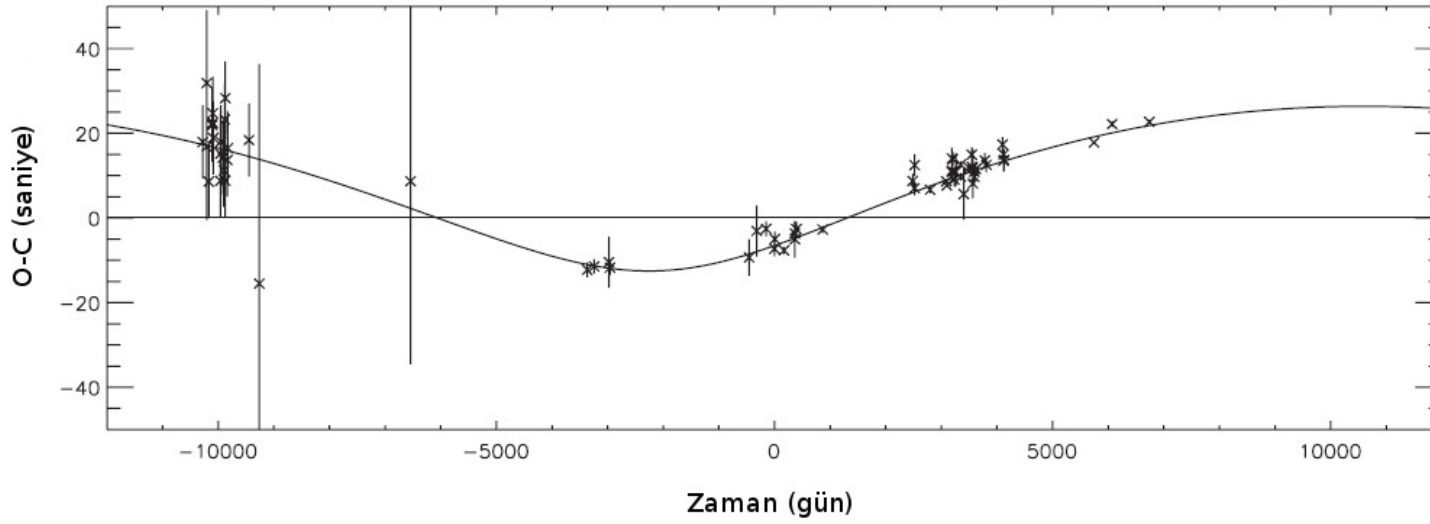
A , O-C değişimini temsil eden parabolün kuadratik teriminin (ikinci dereceden terimin) katsayısıdır. Sonuç olarak veriye uyumlanan parabolün ikinci dereceli teriminin katsayısının iki katı çevrim başına dönem değişimini verir. Eğer çevrim başına dönem değişimi değil de zamanla (örneğin gün başına saniye) cinsinden dönem değişimi (dP / dt) isteniyorsa bu değişim referans yörünge dönemine (P) bölünür.



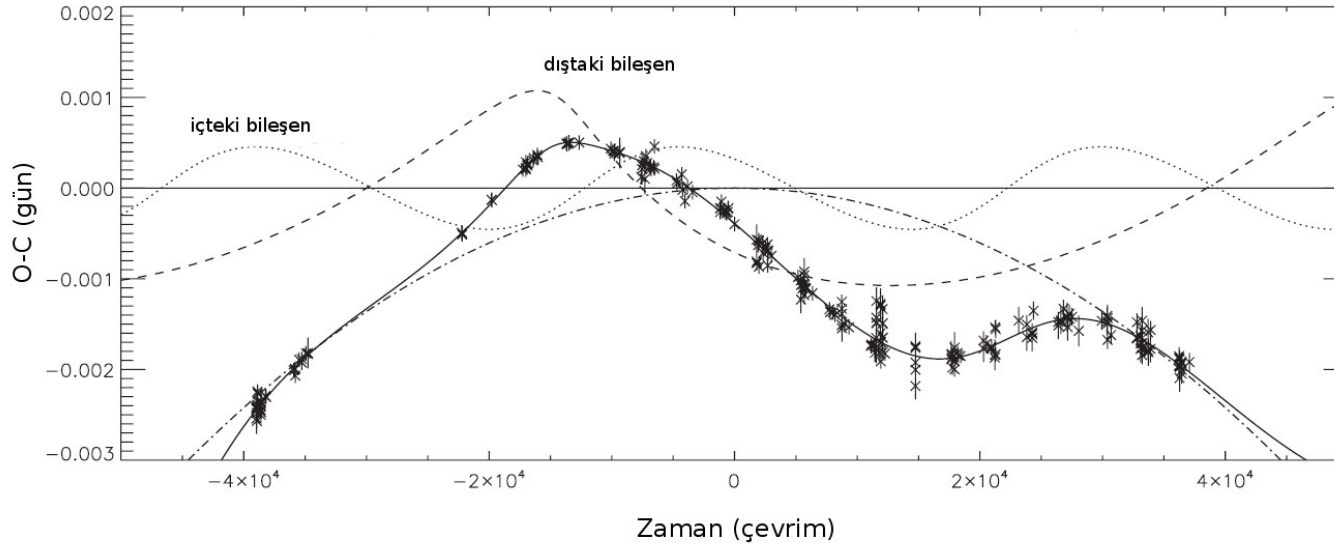
A 'nın işareti O-C (ya da dönem) değişiminin yönünü verir. Gözlenen çift sistemin yörünge dönemi uzuyorsa kolları yukarı dönük bir parabolik O-C değişimi ($A > 0$) gözlenirken, dönem kısalıyorsa bu durumda gözlenen minimum zamanları hesaplananlardan referans minimumun (T_0) her iki yönünde giderek daha erken gerçekleşeceğinden kolları aşağı, türevi negatif olan ($A < 0 \rightarrow dP/dt < 0$) bir parabolik değişim gözlenir.



Çoğu zaman gözlenen bu değişimlerin üstüste binmiş birer kombinasyonu olmaktadır. Şekilde kataklizmik sistem DW Uma'nın O-C değişimi (üst panel) görülmektedir. Yörünge dönemindeki artış, olası bileşenler arası kütle transferi kaynaklı olduğu düşünülen kolları yukarı bir parabol (mavi kesikli eğri) ile temsil edilirken, ışık-zaman etkisi (LiTE) kaynaklı olduğu düşünülen değişim (turuncu kesikli eğri) ise çembersel yörüngede dolanan gezegen kütlesi limitleri dahilinde ($m_3 \sin i = 5.8 M_{Jup}$) bir cisme bağlanmıştır. Bu iki farklı fiziksel olgunun neden olduğu bileşke değişim ise kırmızı sürekli eğri ile gösterilmiştir. Alt panelde bu modelden artıklardan bir değişimin olmadığı görülmektedir. (Demir, Baştürk, Esmer, Şenavcı, Bahar 2023)



NSVS 14256825 sisteminde m_3 sini = $6.7 M_{jüp}$ kütleli gezegen adayı kaynaklı O-C değişimi (Hinse vd. 2014)



HW Vir sisteminde m_3 sini = $12 M_{jüp}$ (içteki) ve m_3 sini = $14 M_{jüp}$ (içteki) kütleli iki gezegen adayı kaynaklı O-C değişimi. Bu iki değişimin üstüne bindiği kütle aktarımı kaynaklı bir parabolik değişimdir. (Horner vd. 2013)

Şekillerden de açıkça görülebileceği gibi zamanlama yöntemiyle gezegen keşfi için

- 1) örtme / tutulma zamanlarını büyük bir hassasiyetle (saniye mertebesinde) belirlemeye,
- 2) uzun zamana mümkün olduğunca eşit şekilde yayılmış, sık gözlem noktalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Zamanlama Yöntemi: Çift Yıldız Gezegenleri

Eğer örten bir çift yıldız sisteminde tutulma zamanları düzenli olarak değişiyor ve bu değişim diğer senaryolarla açıklanamıyorsa sistemde gözlenemeyen bir başka bileşen daha olduğu düşünülür. Sisteme bağlı üçüncü bir bileşenin varlığı aslında iki etkiye aynı anda yol açar.

1. Işık-Zaman Etkisi

$$A_{1.min} = \frac{\Delta P_{\text{çift}}}{P_{\text{çift}}} = \frac{M_{\text{gez}}}{(M_{\text{gez}} + M_A + M_B)^{3/2}} \left(\frac{P_{\text{gez}}}{P_{\text{çift}}} \right)^{(2/3)} \left(\frac{G M_A}{2 \pi c^3 P_{\text{gez}}} \right)^{(1/3)}$$

1. minimum zamanının
değişim genliği

2. Üçüncü Cismin Kütle Çekim Etkisi

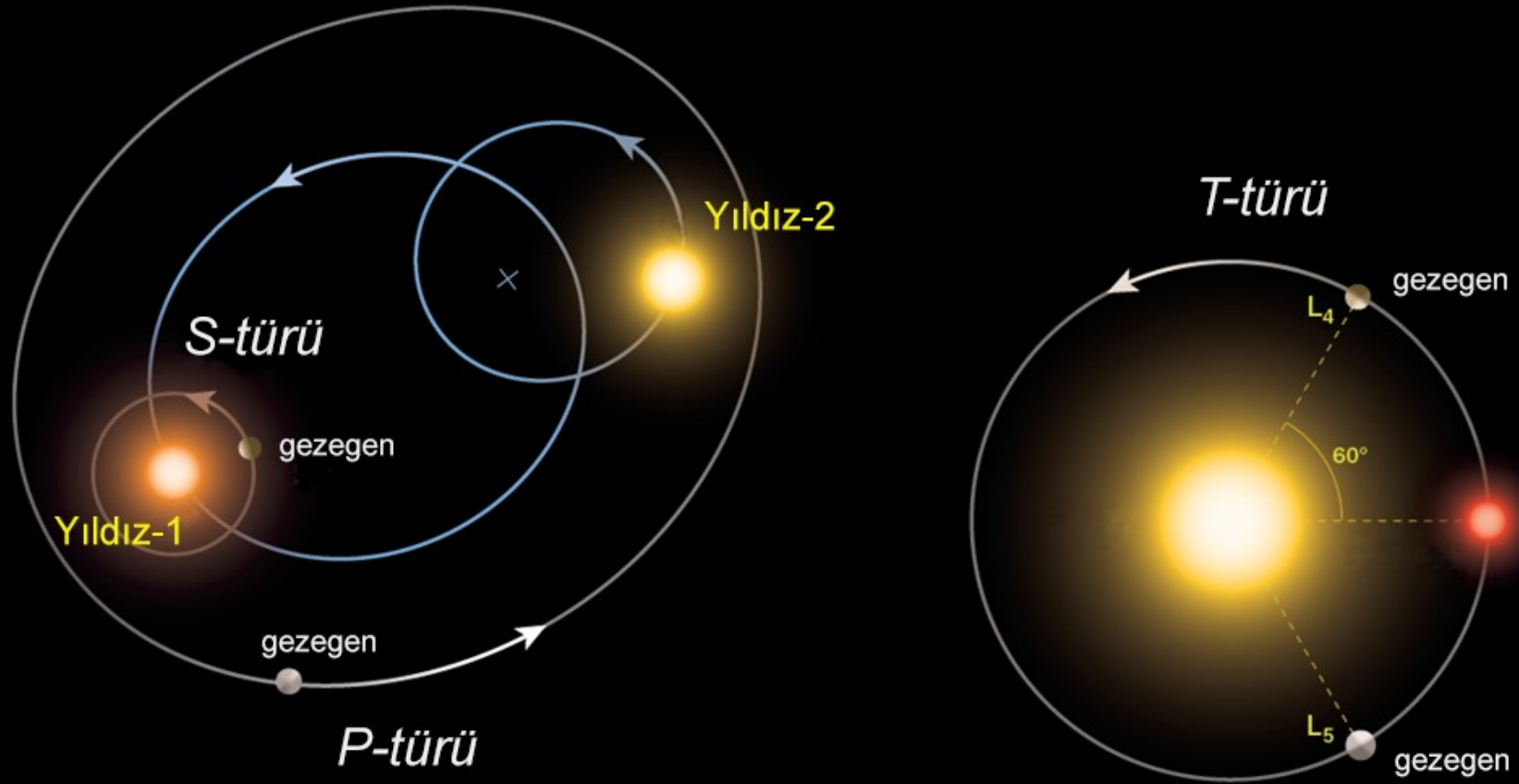
$$A_{1.min} = \frac{\Delta P_{\text{gez}}}{P_{\text{gez}}} \approx \frac{3}{8 \pi} \frac{M_{\text{gez}}}{(M_{\text{gez}} + M_A + M_B)} \left(\frac{P_{\text{gez}}}{P_{\text{çift}}} \right)$$

1. minimum zamanının
değişim genliği

Her iki etkinin ölçeği ve örtme/örtülme (tutulma) zamanı değişimlerini hangisinin domine edeceği çift sistemin bileşenlerinin birbirine yakınlığına, her üç cismin kütlelerine ve 3. cismin, çift sisteme yakınlığına bağlıdır. Kepler-16 sisteminde domine eden faktör yakın üçüncü cismin (Kepler-16b gezegeninin) kütle çekim etkisi iken diğer pek çok çift yıldız-gezegen sisteminde domine eden faktör ışık-zaman etkisidir.

Genel olarak, **geçiş zamanları değişiminde (TTV) gezegen-gezegen etkileşimleri** baskınken, **tutulma zamanları değişiminde (ETV) ışık-zaman etkisi** baskındır.

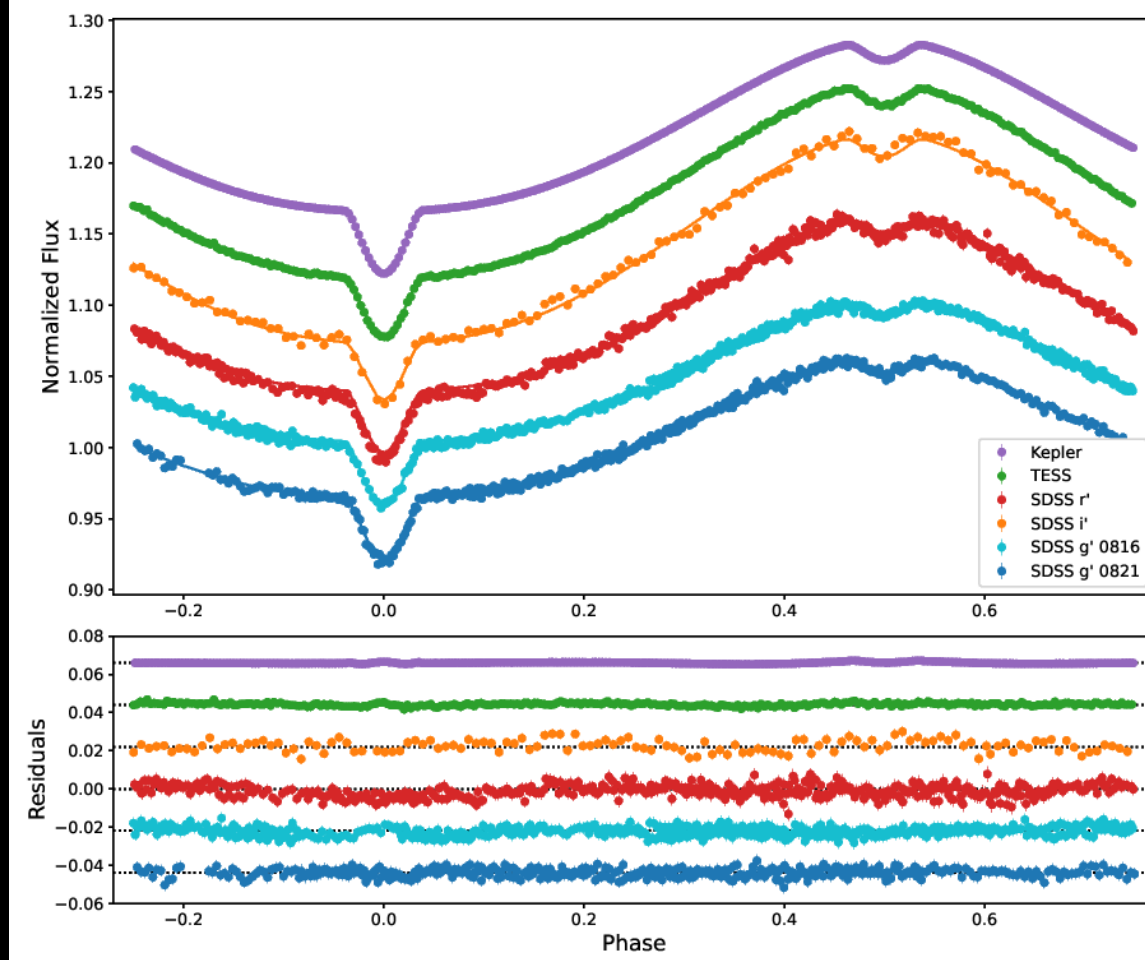
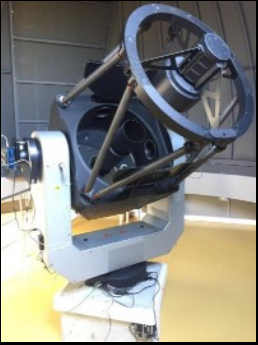
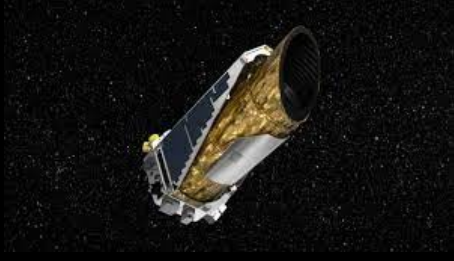
Çift Yıldız Gezegenleri ve Trojanlar



Çift yıldız bileşenlerinin etrafında dolanan gezegenler **P-türü (planet-type, circumbinary planets)** olarak bilinirken, bileşenlerden birinin etrafında dolanan gezegenlere ise **S-türü (satellite-type, circumstellar planets)** adı verilir. Ayrıca sistemin L₄ ve L₅ noktalarında da gezegenler bulunabilir. **T-türü (trojan)** adı verilen bu tür gezegenlerin henüz keşfedilmiş bir örneği bulunmamaktadır.

Tutulma Zamanlaması Yöntemi (ETV, O-C) ile keşfedilen gezegenler, toplam kütlesi küçük, sıcak bir altcüce (sdOB) ya da bir beyaz cüce (WD) baş bileşen ile M-tayf türünden soğuk bir anakol yıldızından oluşan (dM), kısa yörünge dönemli örten çiftler etrafında keşfedilmektedir. Evrimi sırasında üst katmanlarını kaybederek küçük kütleli bir cisme evrilen baş bileşen ile soğuk cücenin toplam kütlesi küçük olduğundan ($M < 0.8 M_{\odot}$) etraflarındaki gezegen kütleli cisim çift sisteme ortak kütle merkezi etrafında gözlenebilecek büyüklükte bir hareket yaptırır. Bu hareketin gözlemcinin bakış doğrultusundaki bileşeni ETV olarak gözlenir.

Kepler-451 Sistemi



Kepler-451

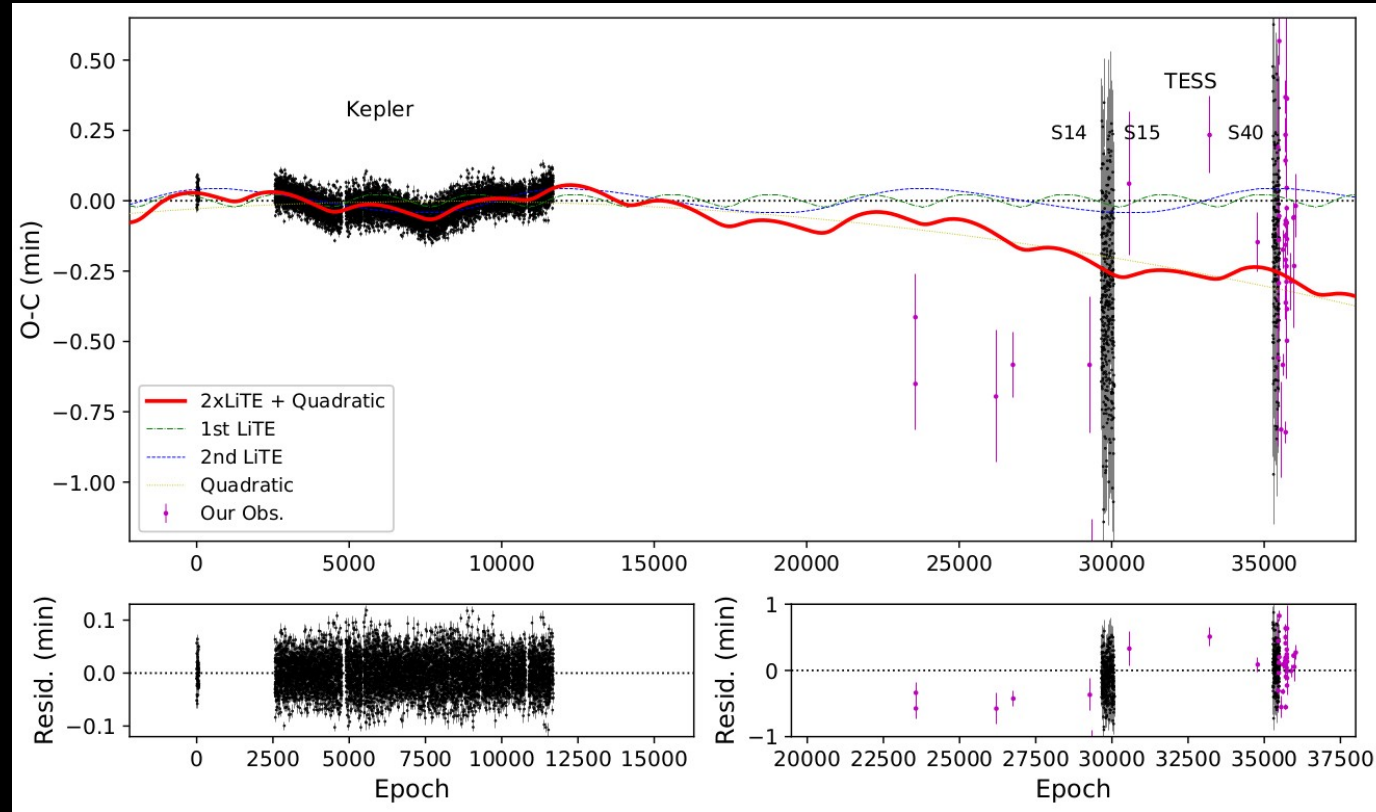
sdB Bileşen
 $T_1 \sim 29550 \text{ K}$
 $M_1 = 0.48 M_\odot$
 $R_1 = 0.20 R_\odot$

dM Bileşen
 $T_2 \sim 2850 \text{ K}$
 $M_2 = 0.12 M_\odot$
 $R_2 = 0.17 R_\odot$

$P_{\text{yör.}} \sim 3^{\text{sa}} 1^{\text{dk}} 6^{\text{sn}}$
 $a = 0.89 R_\odot$

Kepler-451 (sdB + dM) çiftlerinde gezegen aramanın bir diğer avantajı bileşenlerin benzer büyüklükleri nedeniyle hızlı geçilen, V-şeklindeki minimum profillerinin hassas minimum zaman ölçümüne olanak sağlamasıdır.

Kepler-451 O-C Analizi

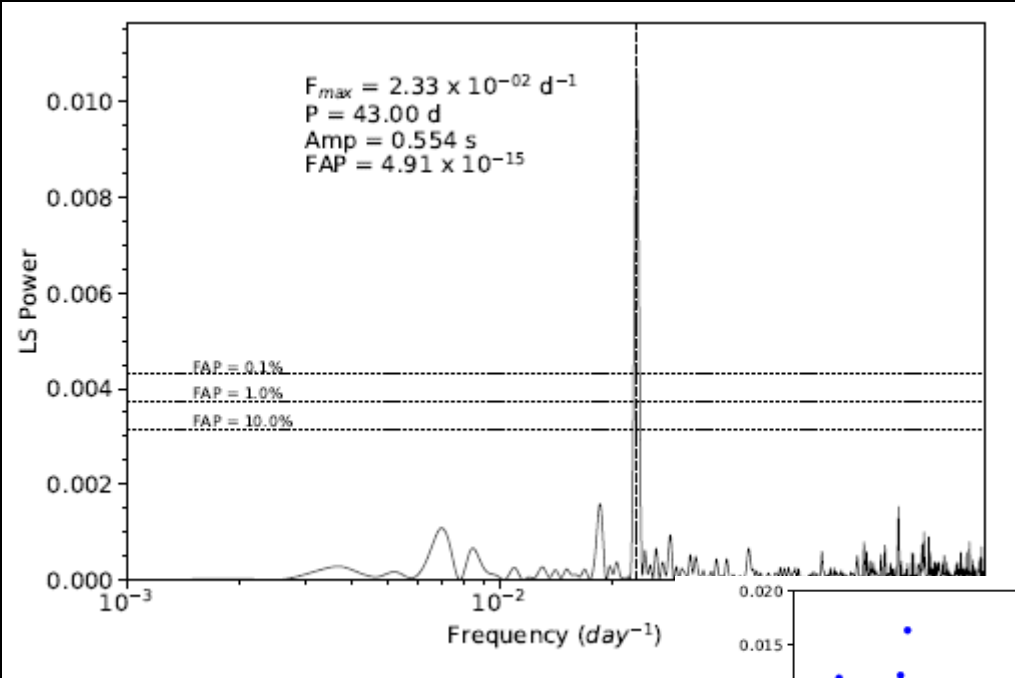


Kepler-451b (Baran vd. 2015)
Yörünge Dönemi: 406 gün

Kepler-451c
Yörünge Dönemi: 1800 gün

Esmer, Baştürk, Selam, Alış (2022)

Kepler-451 O-C Analizi



Artıklarda frekans analizi

Kepler-451b

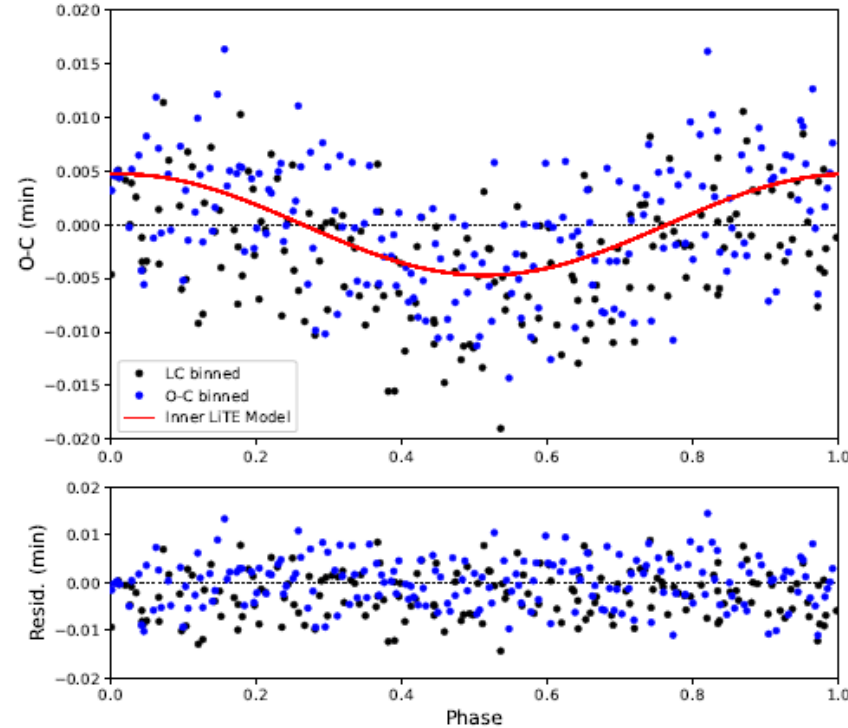
Yörünge Dönemi: 406 gün

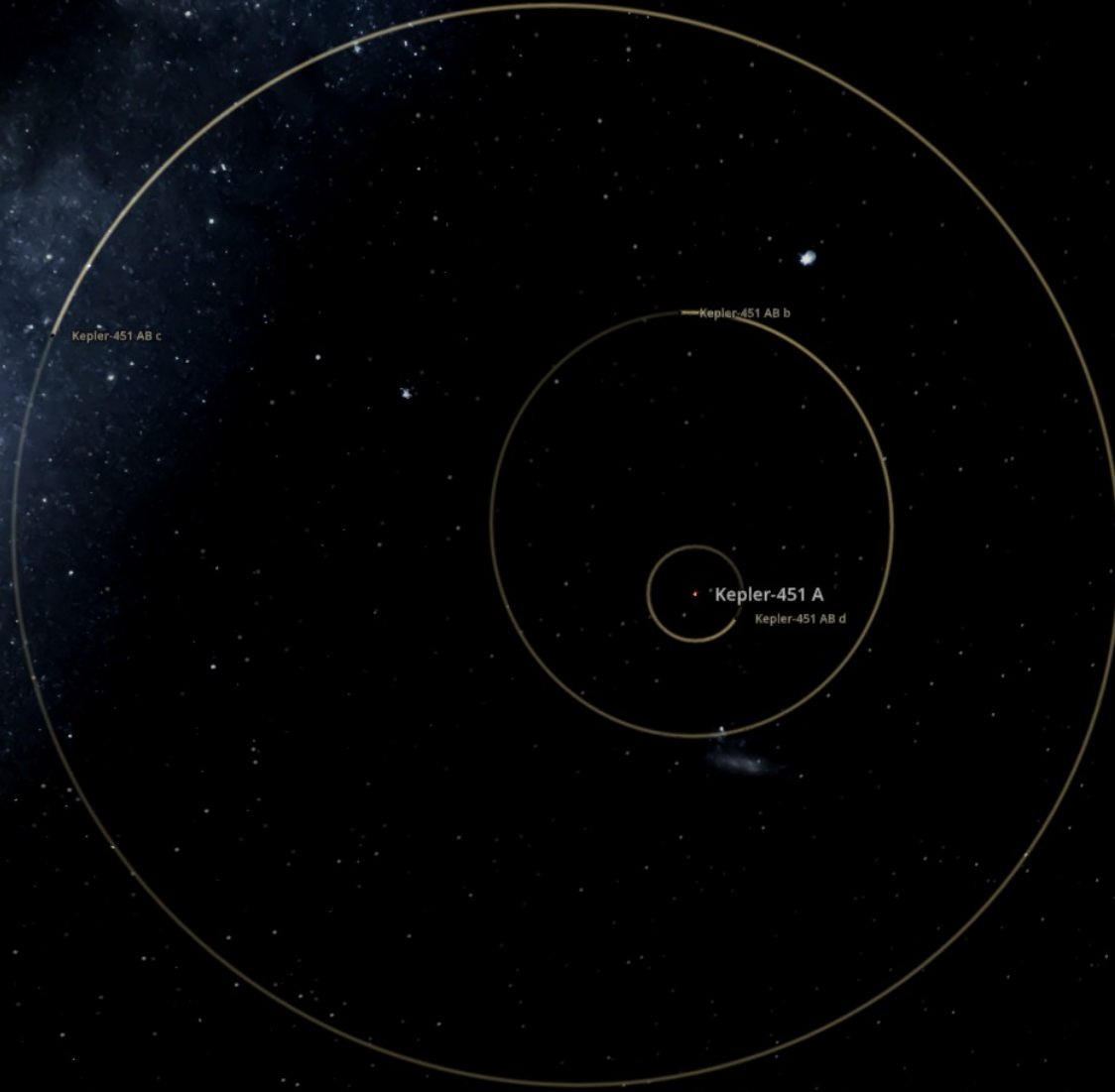
Kepler-451c

Yörünge Dönemi: 1800 gün

Kepler-451d

Yörünge Dönemi: 43 gün





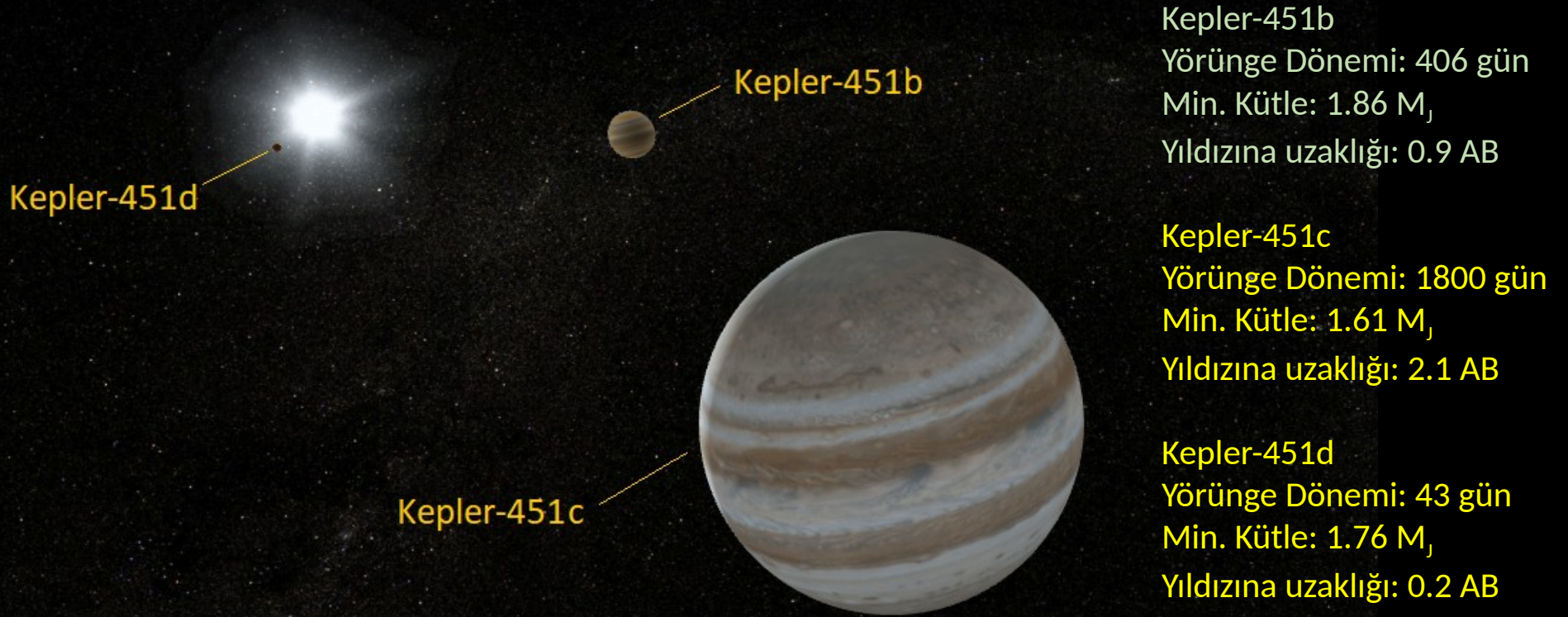
Kepler-451b
Yörünge Dönemi: 406 gün

Kepler-451c
Yörünge Dönemi: 1800 gün

Kepler-451d
Yörünge Dönemi: 43 gün

Bu tür sistemlerin etrafındaki **birinci nesil** gezegenlerin sistemin evriminden nasıl kurtulduğu önemli bir sorudur. sdOB / WD bileşene dönüşen baş bileşenin attığı kütleyi üzerinde biriktirebilecek bu gezegenlerin zamanla kütle, yarıçap ve yörünge parametreleri değişiyor da olabilir (**hibrit (melez) oluşum senaryosu**).

Kepler-451 çift sistemi etrafında Jüpiter kütlesinden büyük 2 yeni dev gezegen keşfi



Bu tür sistemlerin evrimi sırasında sdOB / WD bileşene dönüşen baş bileşenin attığı maddeden oluşan ortak zarf, sistemin etrafında bir öngezegen diski oluşturuyor ve keşfedilen bu gezegenler bu diskte oluşuyor olabilirler (ikinci nesil gezegen oluşumu).

Monthly Notices

of the Royal Astronomical Society



Royal
Astronomical
Society

Issues ▾ Advance articles Submit ▾ Purchase Alerts About ▾

All Monthly Notices of the ▾



Advanced
Search



Volume 511, Issue 4
April 2022
(In Progress)

Article Contents

ABSTRACT

1 INTRODUCTION

2 OBSERVATIONS AND DATA

3 LIGHT-CURVE MODELLING

4 ECLIPSE TIMINGS ANALYSIS

5 DYNAMICAL STABILITY OF
THREE PLANET MODEL

6 CONCLUSIONS

Detection of two additional circumbinary planets around Kepler-451

Ekrem Murat Esmer ✉, Özgür Baştürk, Selim Osman Selam, Sinan Aliş

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 511, Issue 4, April 2022, Pages 5207–5216, <https://doi.org/10.1093/mnras/stac357>

Published: 10 February 2022 Article history ▾

“ Cite Permissions Share ▾

ABSTRACT

We announce the detection of two new planetary-mass companions around Kepler-451 binary system in addition to the one detected previously based on eclipse timing variation analysis. We found that an inner planet with 43 d period with a minimum mass of $1.76 M_{\text{Jup}}$ and an outer one with a ~ 1800 d orbital period with a minimum mass of $1.61 M_{\text{Jup}}$ can explain the periodic variations in the residuals of the one-planet fit of the eclipse timings. We updated the orbital period of the middle planet as 406 d, and determined its eccentricity as 0.33. The newly discovered outer planet is also on an eccentric orbit (0.29), while the innermost planet was assumed to have a circular orbit. All three Jovian planets have similar masses, and our dynamical stability test yields that the system is stable.



Advertisement



View Metrics

Email alerts

Article activity alert

Advance article alerts

New issue alert

In progress issue alert

Zamanlama Yöntemiyle İki Yeni Ötegezegen Keşfi

TÜBİTAK 1001 Programı desteği kapsamında, Ankara Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümünden Doç. Dr. Özgür BAŞTÜRK yürütücülüğündeki "Zamanlama Yöntemiyle Ötegezegen Keşfi" başlıklı projede **iki gezegen keşfedildi**. Türkiye'de ilk kez çift yıldızlar etrafında gezegen keşfi gerçekleştirildi.

Kepler - 451 sistemi



Keşifte TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nin
1 m çaplı T100 teleskobu da
gözlem amaçlı kullanıldı.

Kepler - 451c

1.336 Işık Yılı
Uzaklıkta

1 yörünge yılı
43 gün

Kepler - 451d

1.336 Işık Yılı
Uzaklıkta

1 yörünge yılı
1.800 gün



Bu keşifle Kepler-451 sisteminde daha önce keşfedilmiş olan bir gezegene ilave olarak Jüpiter boyutlarında iki dev gezegen daha keşfedilmiş oldu.

Kepler-451

Çift Yıldız Etrafında İki Yeni Gezegen Keşfi

Ekrem Murat Esmer [Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Astrofizik Anabilim Dalı



Kepler - 451 çift yıldız sisteminde iki yeni gaz devi gezegen keşfedildi. Bu keşiflerle birlikte toplam üç gezegen barındırdığı bilinen bu çift yıldız sistemi, sıra dışı özellikleri ile de dikkat çekici. Biri yaklaşık 29.000 °C, diğeri 2.900 °C yüzey sıcaklığına sahip bileşenleri ortak bir kütle merkezinin etrafında üç saatte bir tur atıyor. 1,5 ile 2,0 Jüpiter kütlesi arasındaki üç gezegen ise 43 gün, 406 gün ve 1.800 günlük sürelerde çift yıldızın etrafında dolanıyor. Ankara Üniversitesinden araştırmacılar olarak yaptığımız bu iki gezegen keşfi ile Kepler - 451 sistemi çift yıldızlar etrafında dolanan ve üç gezegen barındırdığı bilinen ikinci sistem oldu.

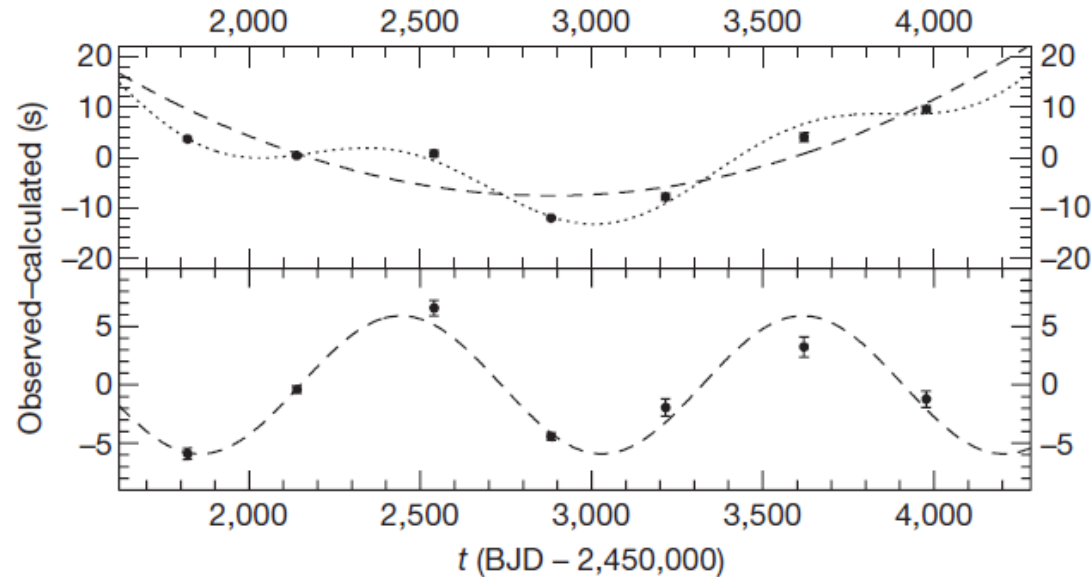
<https://bilimteknik.tubitak.gov.tr/makale/kepler-451>

ETV Keşifleri (24)

Gezegen	Çift Yıldız Türü	Gözlemler	Referans
HW Vir b	sdB + dM	Yer-tabanlı teleskoplar	Lee vd. (2009)
HW Vir c	sdB + dM	Yer-tabanlı teleskoplar	Lee vd. (2009)
DE CVn b	WD + WD	Yer-tabanlı teleskoplar	Qian vd. (2010)
NN Ser b	WD + dM	Yer-tabanlı teleskoplar	Beuermann vd. (2010)
NN Ser c	WD + dM	Yer-tabanlı teleskoplar	Beuermann vd. (2010)
DP Leo b	WD + dM	Yer-tabanlı teleskoplar	Qian vd. (2011)
HU Aqr b	WD + dM	Yer-tabanlı teleskoplar	Qian vd. (2011)
HU Aqr c	WD + dM	Yer-tabanlı teleskoplar	Qian vd. (2011)
...	...	...	...
Kepler-451 b	sdB + dM	Kepler Uzay Teleskobu	Baran vd. (2015)
KIC 5095269 b	G + K	Kepler Uzay Teleskobu	Getley vd. (2017)
KIC 10544976 b	sdB + dM	Kepler Uzay Teleskobu	Almeida vd. (2019)
Kepler-451 c ,d	sdB + dM	Kepler / TESS Uzay Teleskopları ve Yerden Gözlemler	Esmer vd. (2022)
TOPLAM	22 CV		24 Gezegen/Kahverengi Cüce

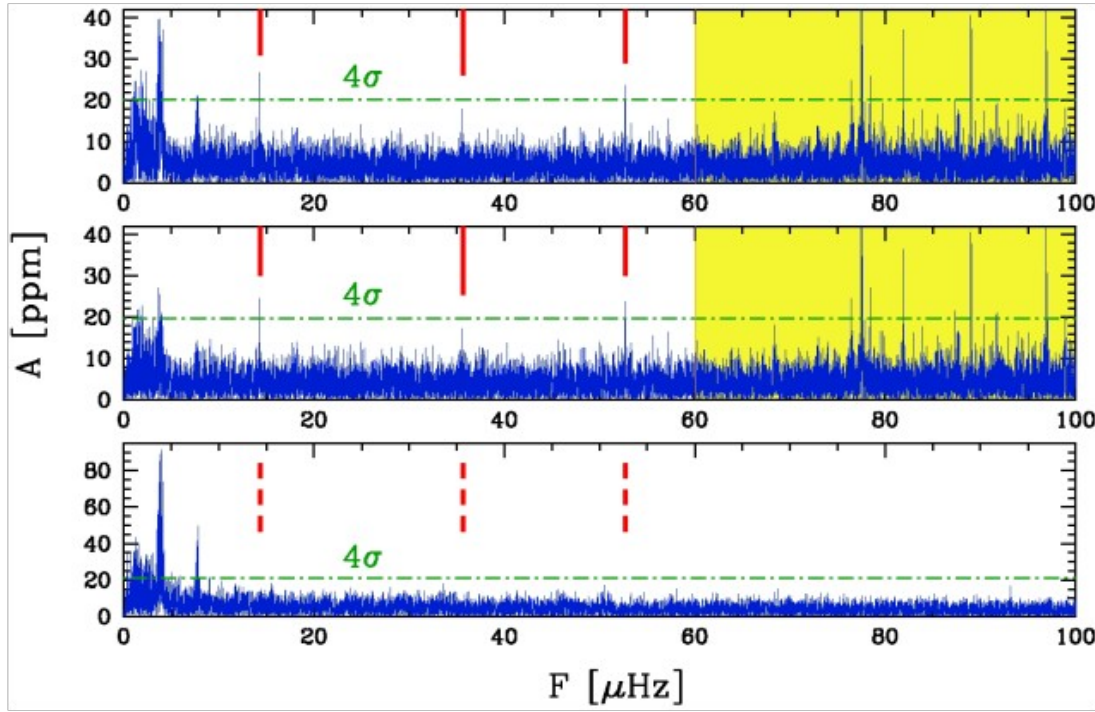
Zonklama Frekansı Değişim Yöntemi (Pulsation Frequency Variation, PFV)

2007 yılında sdB türü bir yatay kol (horizontal branch) yıldızı olan V391 Peg'in etrafında sdB yıldızının zonklama frekanslarında Işık Zaman Etkisi kaynaklı düzenli değişimlere neden olan bir ötegezegen keşfi duyuruldu (Silvotti vd. 2014). sdB türü yıldızlarda temel modda kısa dönemli (30 - ~10000 saniye) ve yüksek genlikli zonklamalar gösteren evrimleşmiş yıldızlardır. Yıldız kütle çekimle bağlı ve onunla ortak kütle merkezi etrafında yörünge hareketi yapan bir cismin varlığında (yörünge eğim açısına (i) da bağlı olarak) yıldız gözlemciye yaklaşır ve uzaklaşır. Cisim gözlemciye yakinken ışığı daha erken ulaşacağından zonklama kaynaklı parlaklık değişimleri, uzaklaştığı zamankine oranla daha erken gözlenir. Işık-Zaman Etkisi ile gerçekleşen bu değişim dönemlidir ve dikine hız gözlemlerinin de yapılması durumunda görünmeyen bileşenin kütlesi belirlenebilir. V391 Peg etrafında önerilen gezegen son yapılan çalışmayla iyice tartışılır bir hal almıştır (Silvotti vd. 2017).

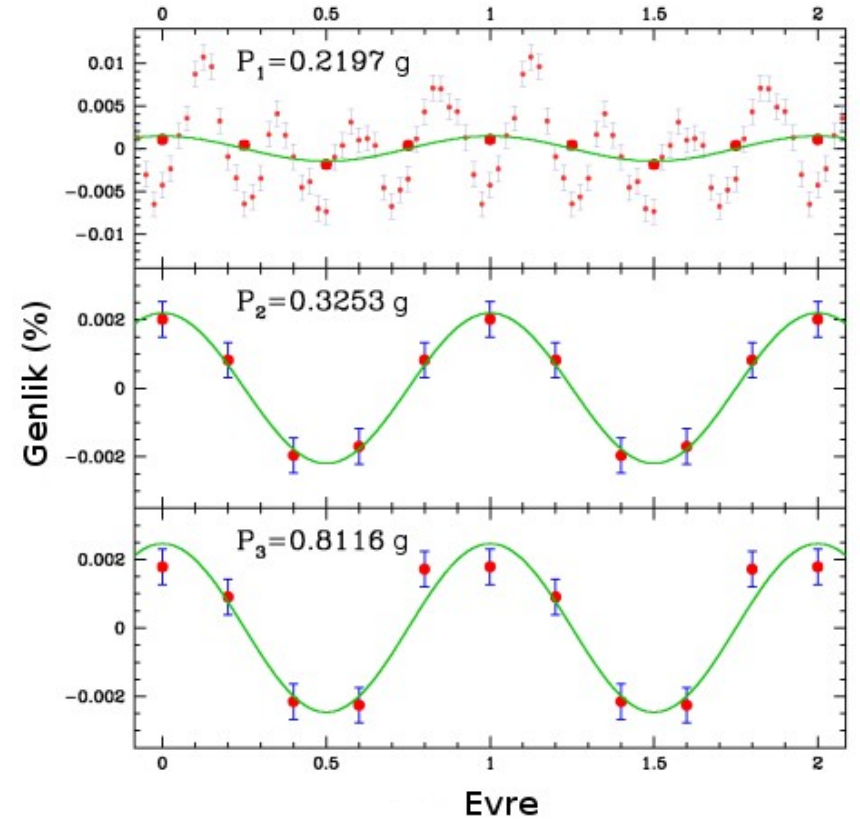


V391 Peg'in Işık-Zaman Etkisi kaynaklı O-C değişimi (Silvotti vd. 2007)

Zarflarının önemli bir bölümünü kaybettikleri için Helyum'un yandığı çekirdeklerinin üzerindeki ince kabukta Hidrojen'i tutuşturamayan sdB yıldızlarının zarflarını nasıl kaybettikleri de önemli bir tartışma konusudur (Podsiadlowski vd. 2008a). Bu yıldızların etrafındaki gezegenlerin, yıldızın erken evrim aşamalarında oluşmuş ve evrim süreci boyunca yıldızla bağlı kalmış olup olmadıkları önemli bir sorudur. Bu gezegenlerin, yıldızın evrimi sırasında kaybedilen zarfın oluşturduğu bir disk içerisinde oluşmuş olabilecekleri de düşünülmektedir. Ayrıca bu gezegenlerin zarfın soyulmasına katkısının olup olmadığı da tartışılmaktadır (Schuh 2010).



KIC 10001893'ün frekans – genlik dağılımı (güç spektrumu). En düşük frekanstaki (4 μHz) pik görüntüde sisteme yakın bir yıldıza ilişkin iken kırmızı ile işaretlenen üç düşük frekanslı pikin sistemin etrafında dolaşan iki gezegene ait olduğu düşünülmektedir (Silvotti vd. 2014). Üstteki iki grafikte sarıyla işaretlenen bölge g-modu zonklamaları bölgesidir. En altta ise sadece sisteme yakın yıldızın bulunduğu 1 piksel için frekans analizi gösterilmiştir.



Sistemde önerilen Dünya kütlesi civarındaki 3 gezegenden yansıyan ışığın yörünge evresiyle değişimi (Silvotti vd. 2014). Gezegenlerin kütleleri ve yarıçaplarına ilişkin ancak yörünge dönemleri ve olası yansıtma güçleri dikkate alınarak verilebilir.

Çift yıldız gezegenlerinin büyük çoğunluğunun sdB türünden üst katmanlarını bir şekilde kaybetmiş evrimleşmiş bileşenler içeren çift sistemlerde zamanlama yöntemiyle bulunması (ve başka yöntemlerle onaylanmamış olmaları) bu cisimlerin varlığı üzerinde kuşku uyandırmaktadır. Bir sdB yıldızından teorik modellerle beklenmeyen bir değişimin gözlenmiş olması doğrudan sisteme bağlı bir gezegenin yüzeyinden yansıyan ışığa bağlanabilir mi sorusu açık bir soru olarak önümüzde durmaktadır!

Kaynaklar

- ✓ Bailes, M., Bates, S. D.; Bhalerao, V., vd., 2011, "Transformation of a Star into a Planet in a Millisecond Pulsar Binary", Science, 333, 1717
- ✓ Beuermann, K. vd, 2010, "Two planets orbiting the recently formed post-common envelope binary NN Serpentis", Astronomy & Astrophysics, 521L, 60
- ✓ Deeg, H.J., vd., 2008, "Extrasolar planet detection by binary stellar eclipse timing: evidence for a third body around CM Draconis", Astronomy & Astrophysics, 480, 563
- ✓ Doyle, L.R., vd., 2011, "Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet", Science, 333, 1602
- ✓ Golovin, A.V., Pavlenko, E.P., 2005, "On The question of the Behavior of O-C Residuals of the Active Algol-Like Binary RZ Cassiopeiae", he Journal of the American Association of Variable Star Observers, 34, 46
- ✓ Hinse, T.C., vd., 2014, "Revisiting the proposed circumbinary multiplanet system NSVS 14256825", Monthly Notices of The Royal Astronomical Society, 438, 307
- ✓ Horner, J., vd., 2012, "A dynamical analysis of the proposed circumbinary HW Virginis planetary system", Monthly Notices of The Royal Astronomical Society, 427, 2812
- ✓ Lee, J.-W., vd., 2009, "The ddb+M Eclipsing System HW Virginis And Its Circumbinary Planets", The Astronomical Journal, 137, 3181
- ✓ Mazeh, T., vd. 2013, "Transit Timing Observations from Kepler. VIII. Catalog of Transit Timing Measurements of the First Twelve Quarters", The Astrophysical Journal Supplement, 208, 16
- ✓ Nesvorný, D., vd., 2013, "KOI-142, The King of Transit Variations, is a Pair of Planets near the 2:1 Resonance", The Astrophysical Journal, 777, 3
- ✓ Sigurdsson, S., Thorsett, S. E., 2005, "Update on Pulsar B1620-26 in M4: Observations, Models, and Implications", Binary Radio Pulsars, ASP Conference Series, Vol. 328, p213
- ✓ Steffen, J.H., vd., 2011, "The architecture of the hierarchical triple star KOI 928 from eclipse timing variations seen in Kepler photometry", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 417, 31
- ✓ Silvotti, R., vd., 2007, "A giant planet orbiting the 'extreme horizontal branch' star V 391 Pegasi", Nature, 449, 189-191
- ✓ Wolf, M., Zejda, M., 2005, "Apsidal motion in southern eccentric eclipsing binaries: V539 Ara, GG Lup, V526 Sgr and AO Vel", Astronomy and Astrophysics, 437, 545
- ✓ Wolszczan, A., Frail, D. A., 1992, "A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12", Nature, 355, 145-147
- ✓ Wolszczan, A., 2008, "Fifteen years of the neutron star planet research", Physica Scripta, Volume 130, Issue , id. 014005