

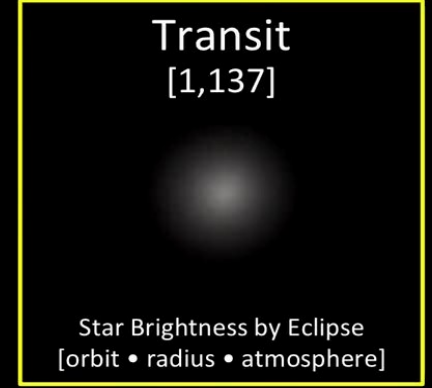
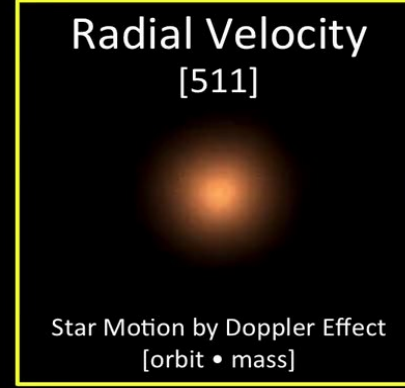
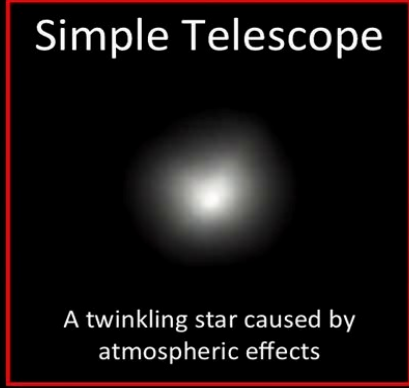
AST413

Gezegen Sistemleri
ve Oluşumu

Ders 7 : Ötegezegen Araştırmalarında
Ulaşılan Sonuçlar



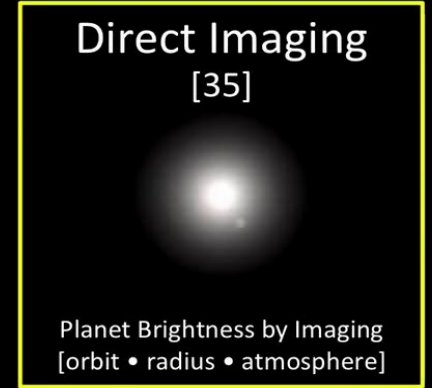
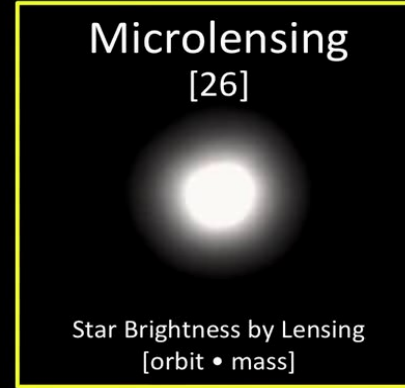
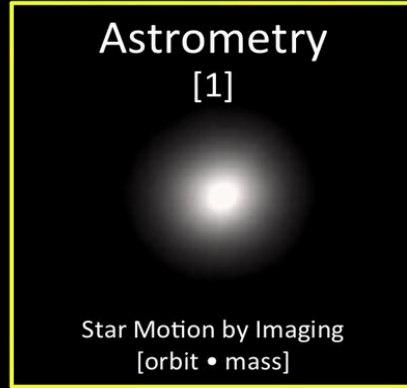
Exoplanet Detection Methods Visualized



Stars appear to twinkle with many colors as observed by the naked eye or simple telescopes.

Precise instruments were required to remove this atmospheric effect and reveal planets.

Since 1992 we know of over 1,800 planets around other stars detected by six main methods.



Planet effects on stars are exaggerated for clarity. Numbers correspond to the number of planets detected so far by each method.

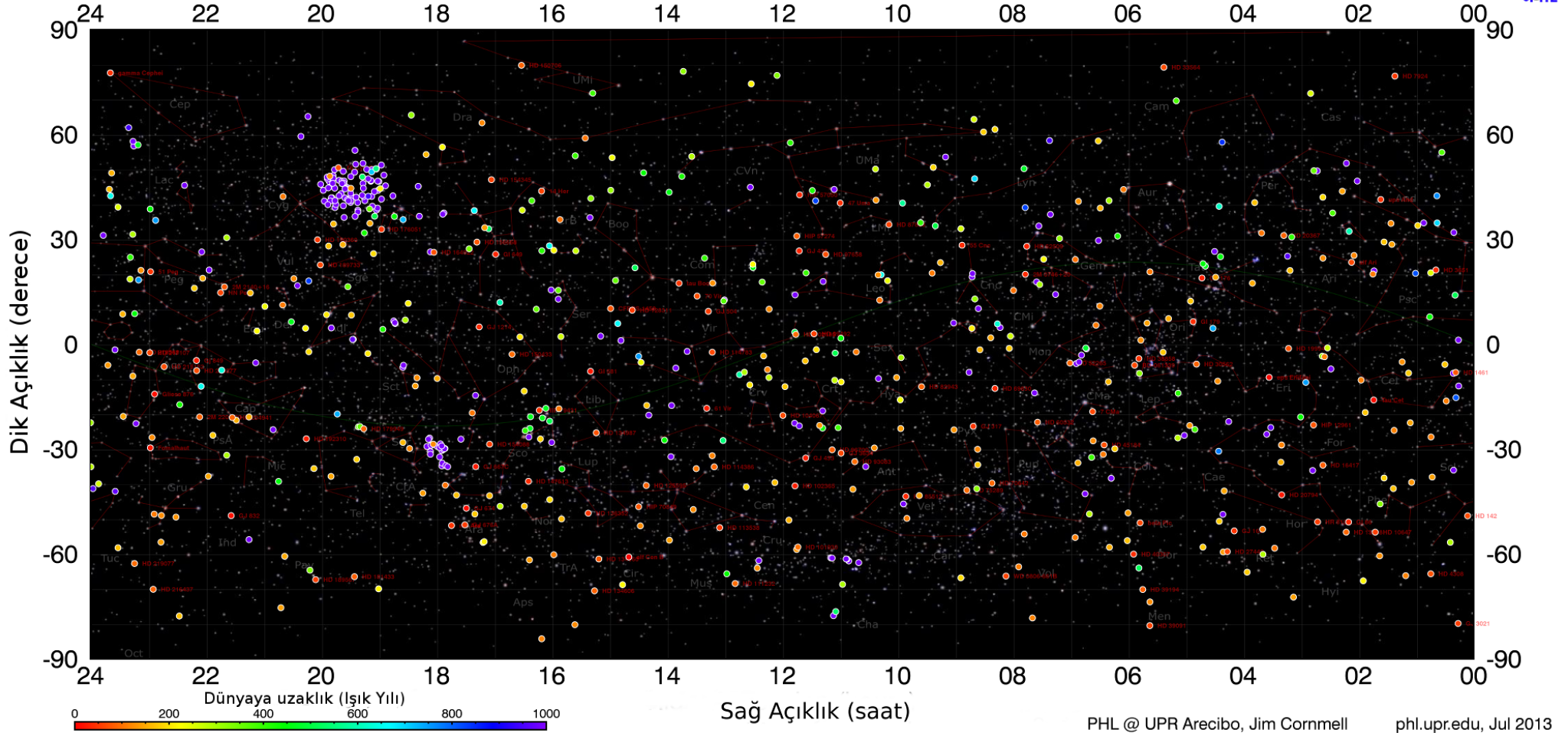
CREDIT: PHL @ UPR Arcibo

Güncel Keşif Sayıları

1. Geçiş Yöntemi:	2167 (472 çoklu) sistemde	2889 gezegen (+109)	%73.2
2. Dikine Hız Yöntemi:	593 (144 çoklu) sistem	798 gezegen (+57)	%20.2
3. Doğrudan Görüntüleme:	90 (3 çoklu) sistem	110 gezegen (+18)	%2.8
4. Kütleçekimsel Mercek:	82 (3 çoklu) sistem	87 gezegen (+22)	%2.2
5. Zamanlama Yöntemi:	49 (7 çoklu) sistem	57 gezegen (+22)	<%2
6. Astrometri Yöntemi:	-	-	%0

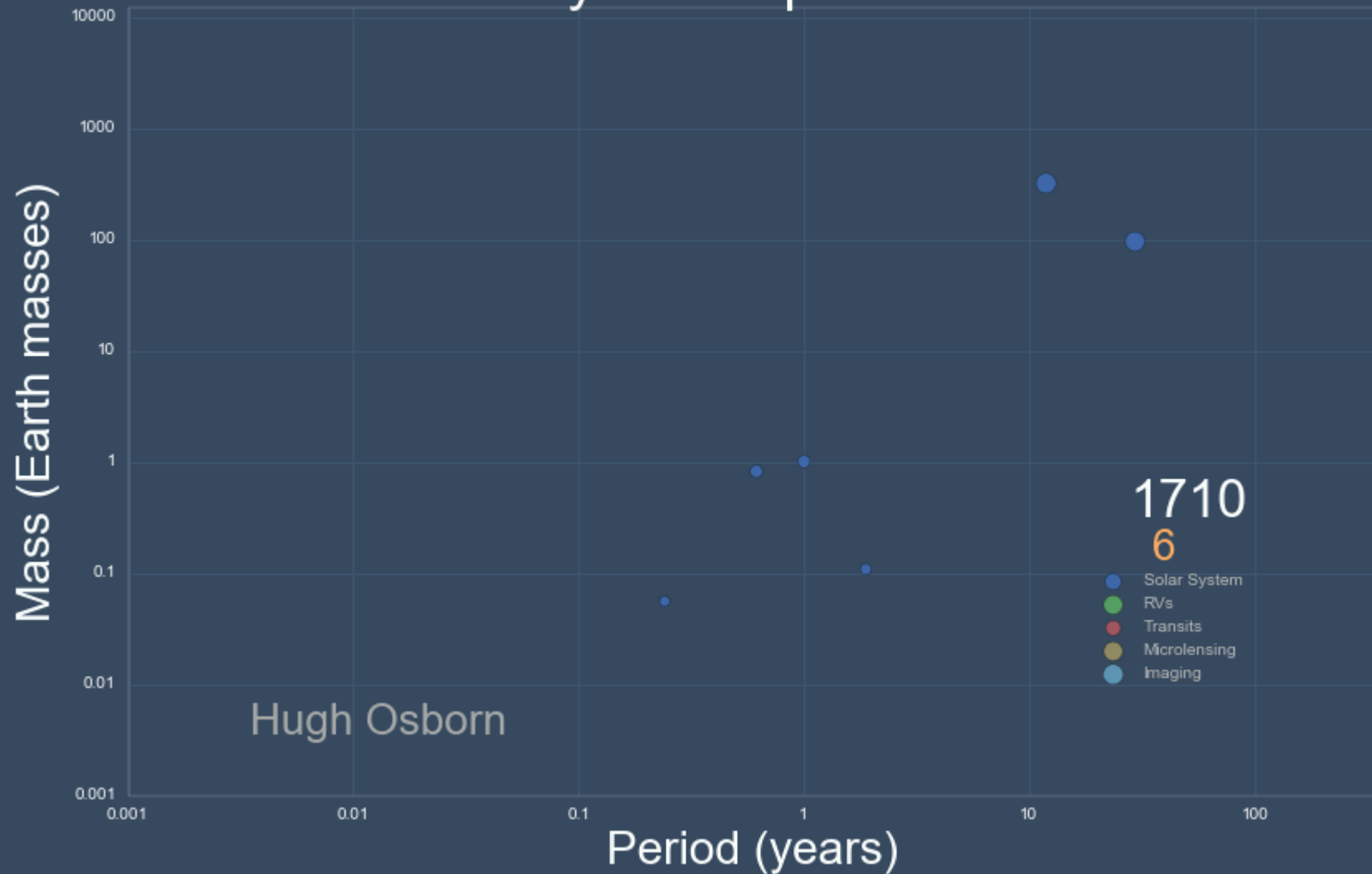
Birinci sütun yöntem, ikinci sütun gezegen bulunan sistem (parantez içinde çoklu), üçüncü sütun toplam keşfedilen gezegen (parantez içinde geçen seneki toplam sayıyla farkı, son sütun ise o yöntemle keşfedilen gezegen sayısının toplam gezegen sayısına yüzdesini göstermektedir.

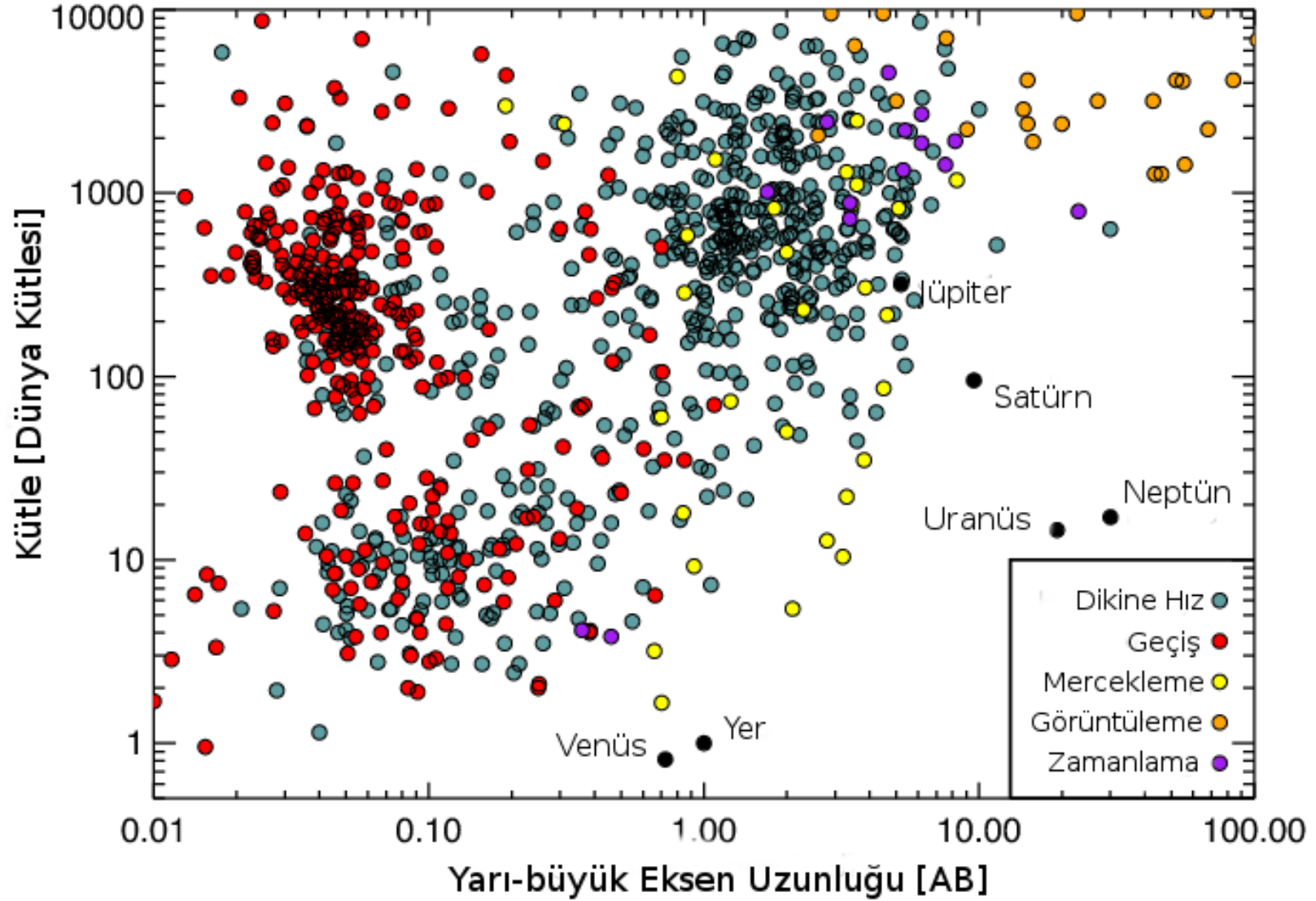
Gezegen barındırdığı bilinen tüm yıldızların gökyüzündeki konumları



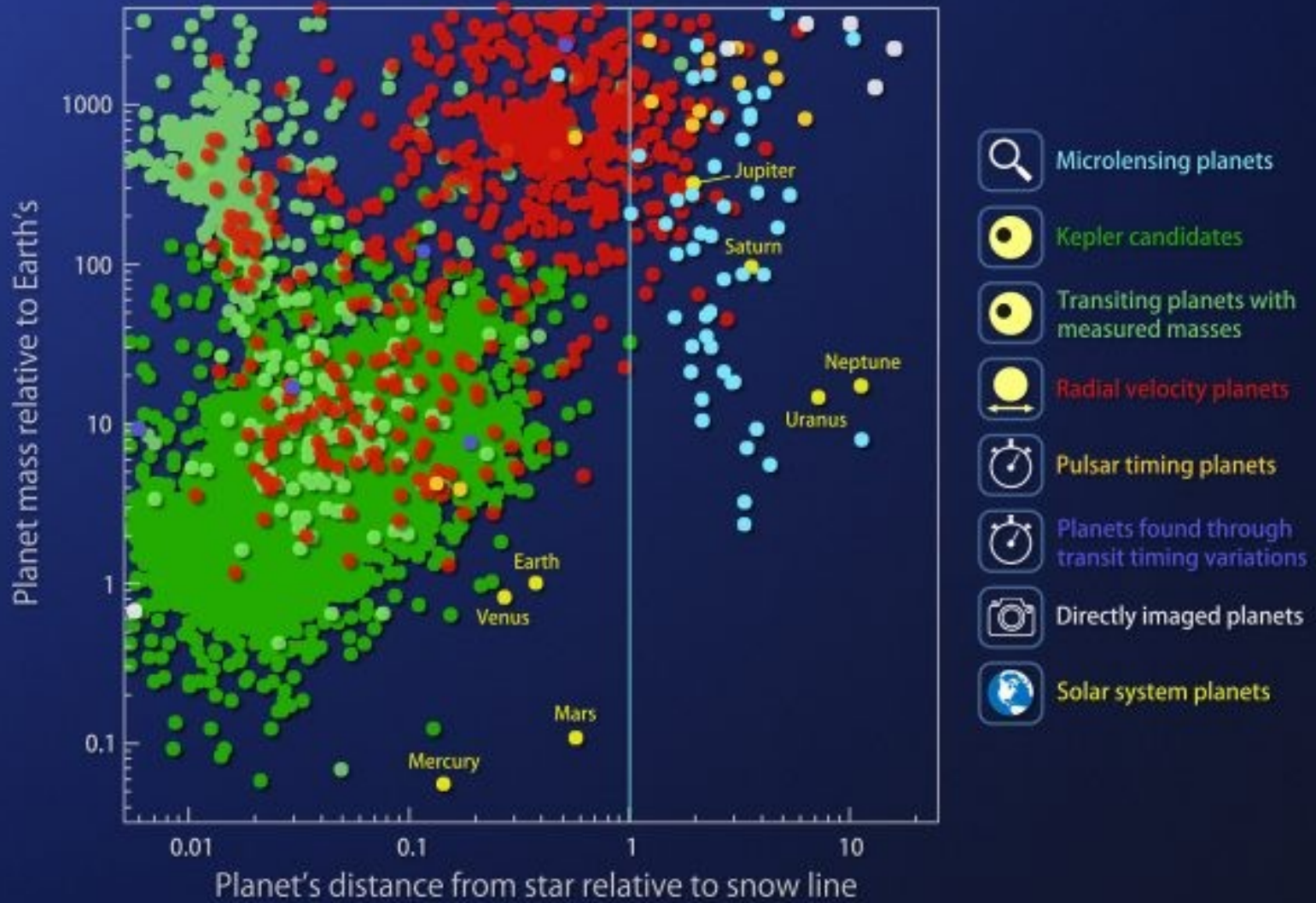
Görüldüğü üzere gezegenli yıldızlar neredeyse her yerdedir. Çok sayıda gezegen keşfi yapan Kepler uzay teleskobunun baktığı bölge çıkarıldığında ($\sim 19-20^{\text{sa}} - 45^{\text{d}}$) gökyüzüne dağılımları da tekdüze (homojen) olmaya çok yakındır. Burada önemli bir nokta olarak gezegen araştırmalarının galaktik diskten (özellikle de galaksi merkez doğrultusu) buradaki yıldız yoğunluğu nedeniyle kaçındıklarını belirtmekte fayda vardır.

The History of Exoplanet Detection

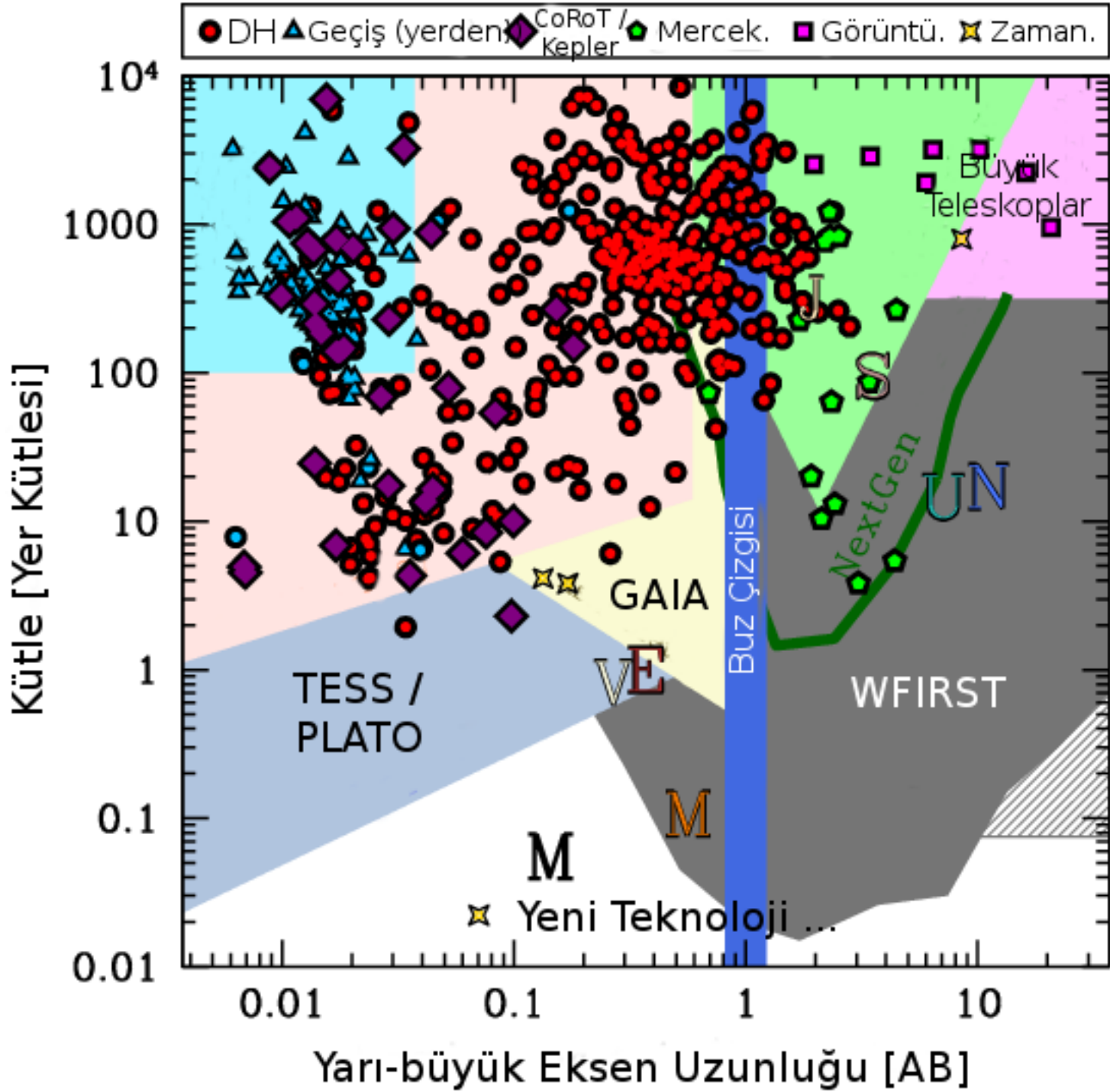




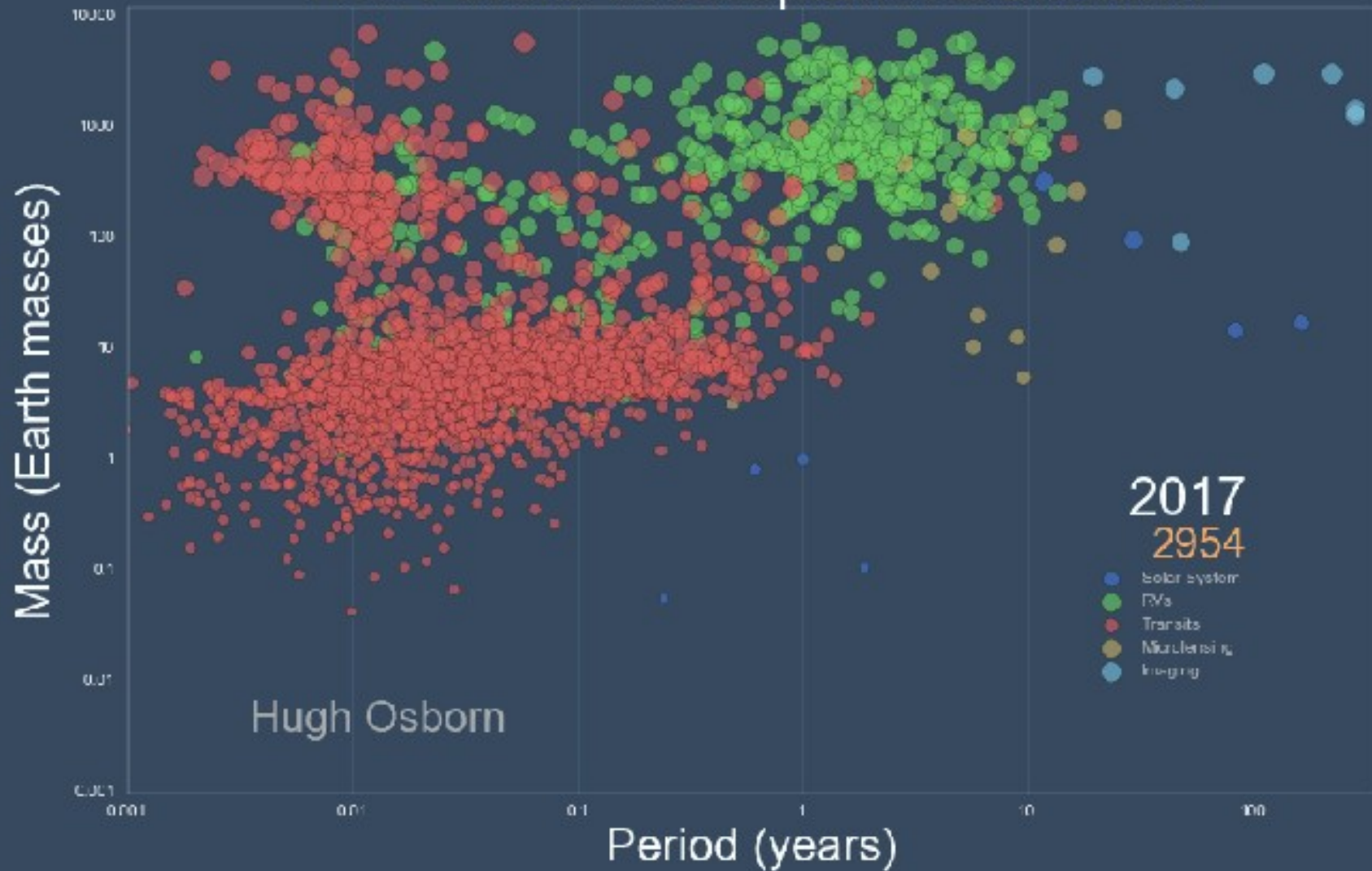
Dikine hız ve geçiş yöntemleri gözlemsel yanlılıkları nedeniyle yıldızına yakın, büyük gezegenleri bulmaya daha elverişli iken, merceklenme, görüntüleme ve zamanlama daha uzakta ve daha küçük gezegenleri bulmaya daha elverişli gözlemsel yanlılıklara sahiptir. Sonuç olarak tüm bu teknikler parametre uzayında daha homojen dağılmış bir örnek uzayına sahip olmamıza katkıda bulunmaktadır.



4769 ötegezegenin bulunduğu bu daha güncel grafikte de **geçiş** ve **dikine hız** yöntemlerinin yıldızına yakın büyük kütleli gezegenleri bulmaya yanlı oldukları, geçen zaman içinde **dikine hızın** daha büyük gezegenleri, yıldızlarından daha uzakta bulabildiği; **kütleçekim merceği yönteminin** yıldızlarından uzak gezegenleri bulmakta, **doğrudan görüntüleme**yle benzer başarımda olduğu ancak doğrudan görüntülemenin büyük gezegenleri bulmaya daha yanlı olduğu görülmektedir. (©NASA Goddard Space Flight Center)



The Future of Exoplanet Detection



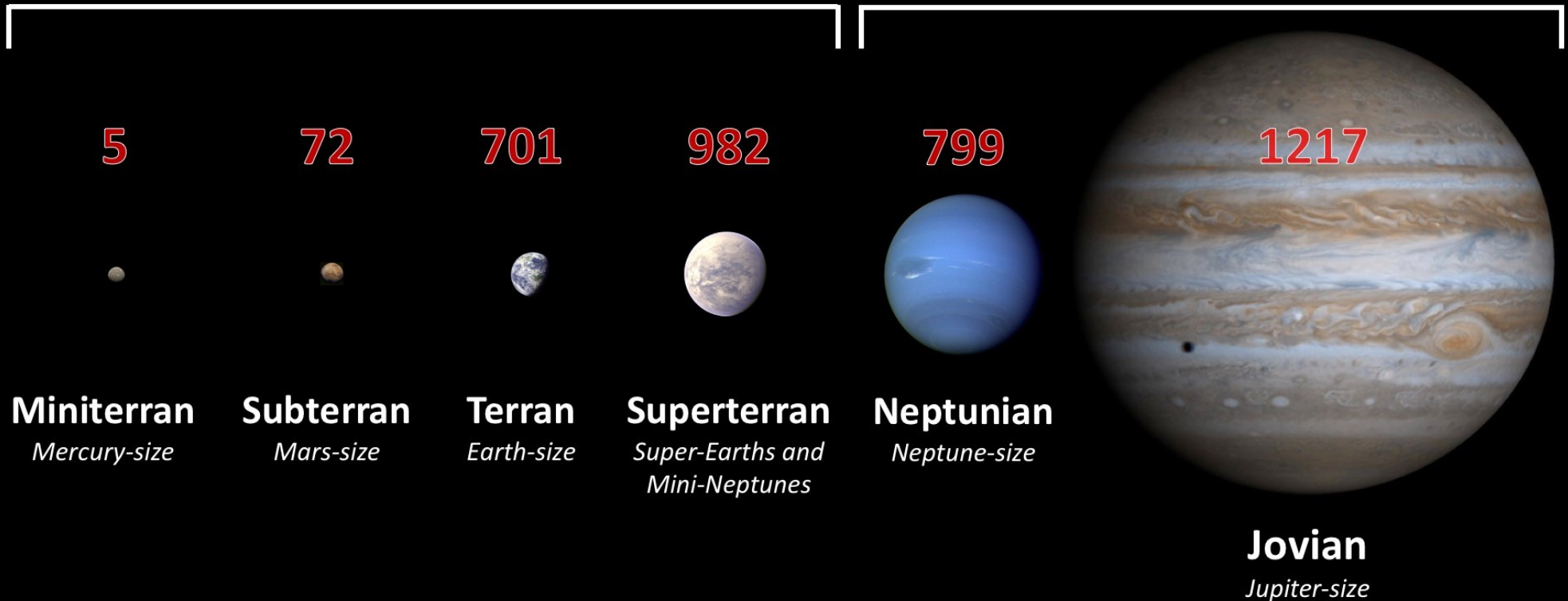
Ötegezegen Türleri

- ✓ **Dünya Benzeri (ing. Earth-like, Earth analog):** Yaklaşık Dünya kütlelerinde ($0.8 M_{\text{yer}} < M_{\text{gez.}} < 1.2 M_{\text{yer}}$) karasal gezegenlerdir.
- ✓ **Dünya İkizi (ing. Earth Twin):** Dünya'yla aynı özelliklere (kütle, yarıçap, yıldızından uzaklık, atmosfer) sahip gezegenlerdir.
- ✓ **Gaz Devi (ing. Gas Giant):** Büyük ölçüde hidrojen ve helyumdan oluşan büyük yarıçaplı gezegenlerdir (örn. Jüpiter, Satürn).
- ✓ **Buz Devi (ing. Ice Giant):** Yıldızına uzaklığı nedeniyle genellikle gaz formunda gözlenen materyali (metan gibi) buz formuna dönüşmüş gezegenlerdir (örn. Uranüs, Neptün)
- ✓ **Sıcak Jüpiter (ing. Hot Jupiter):** Yıldızına yakın ($0.015-0.5 \text{ AB}$) ve bu nedenle sıcak, kısa yörünge dönemli dev gaz gezegenlerdir (örn. 51 Peg b).
- ✓ **Sıcak Neptün (ing. Hot Neptune):** Yıldızına yakın ($< 1 \text{ AB}$) ve bu nedenle sıcak, Uranüs-Neptün büyüklüğündeki gaz gezegenlerdir (örn. Gliese 436 b).
- ✓ **Mini Neptün (ing. Mini Neptune):** Karasal gezegenlerle gaz devleri arasında, ($5 - 10 M_{\text{yer}}$) kütleli geçiş cisimleridir. Hidrojen ve Helyumca zengin atmosfereler; buz, kaya yüzeylere hatta sıvı okyanuslara sahip yüzeyleri olabilecekleri düşünülmektedir.
- ✓ **Süper Dünya (ing. Super Earth):** $2 - 5 M_{\text{yer}}$ kütleli gezegenlerdir (örn. PSR B1257+12 b, Gliese 876 d).
- ✓ **Serbest Gezegenler (ing. Free Floating, Nomad, Rogue, Interstellar, Starless, Orphan Planets):** Herhangi bir yıldızın etrafında dolanmayan ancak gezegen kütle limitleri dahilindeki cisimlerdir. Bu cisimlere gezegen tanımının bir yıldızla ortak kütle merkezi etrafında hareket eden cisimleri kapsadığını düşünen araştırmacılar **kahverengi cüce altı** (ing. Sub-brown dwarf) cisimler de demektedirler.

Over 3,700 Confirmed Exoplanets

Terrans

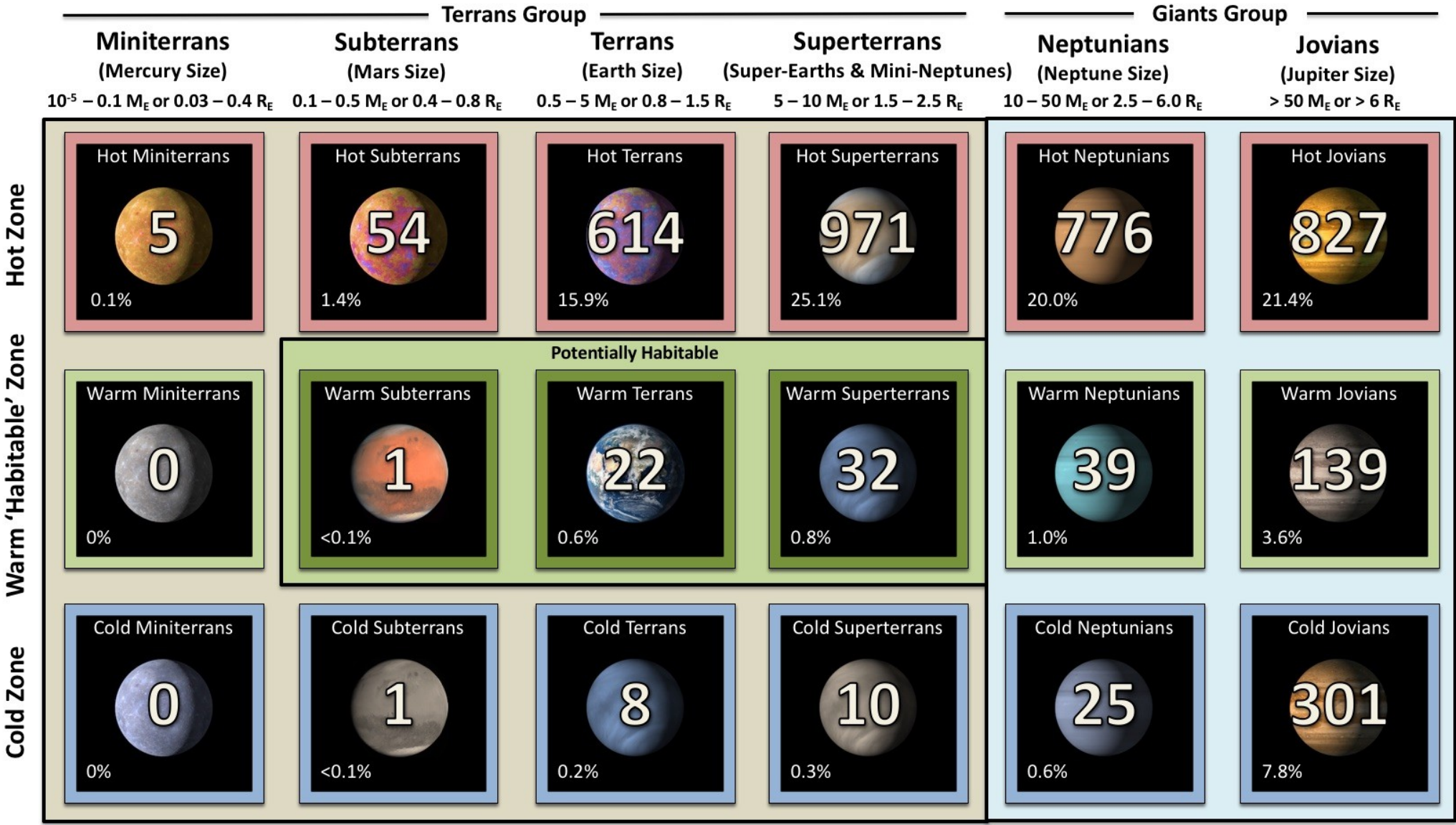
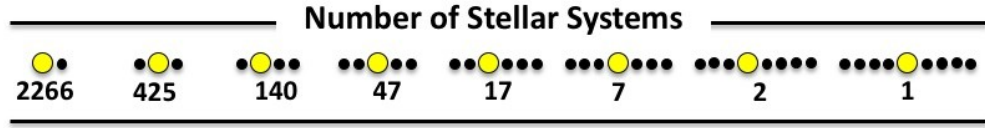
Giants





The Periodic Table of Exoplanets

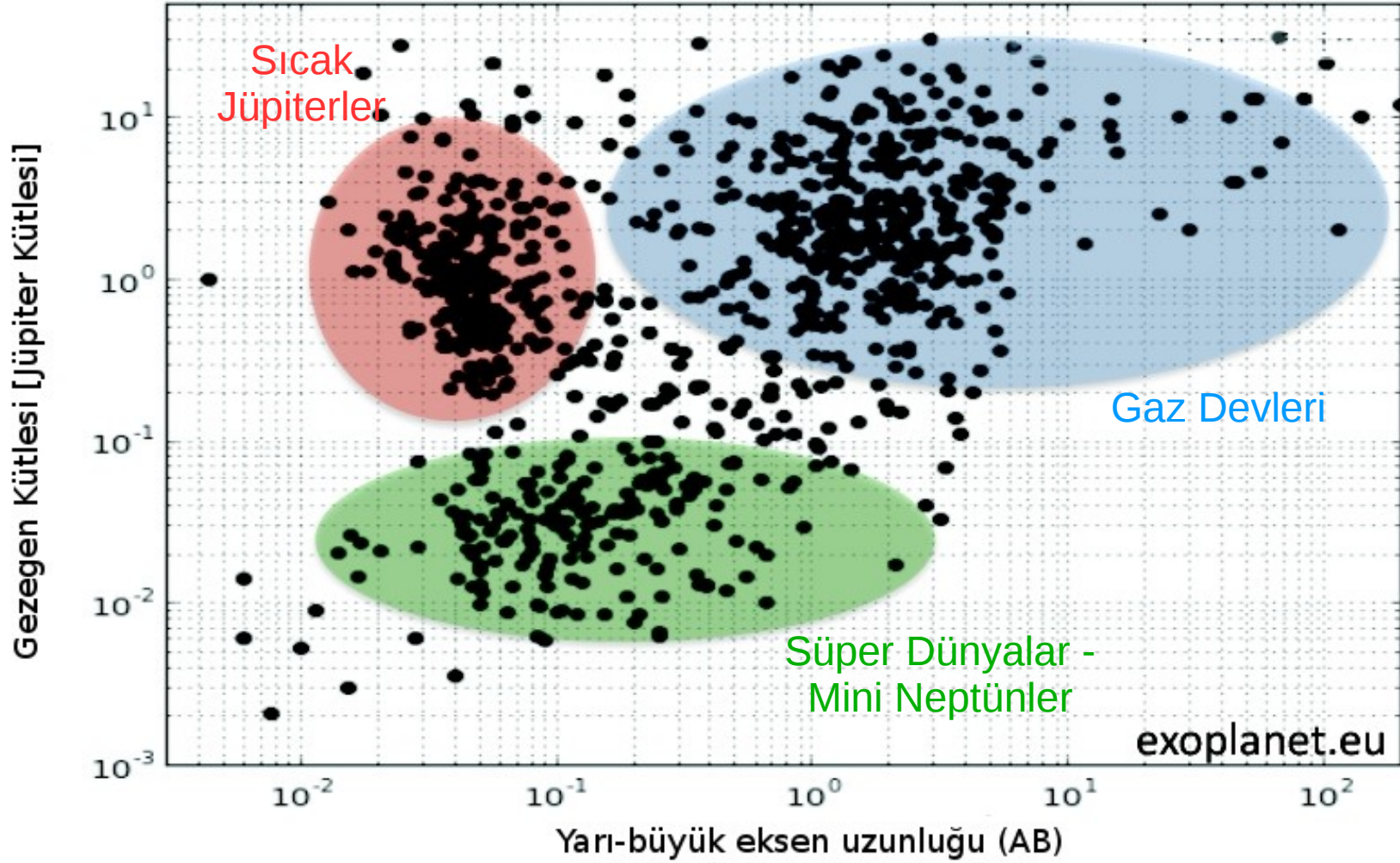
Over 3800 Exoplanets



M_E = Earth Mass, R_E = Earth Radius

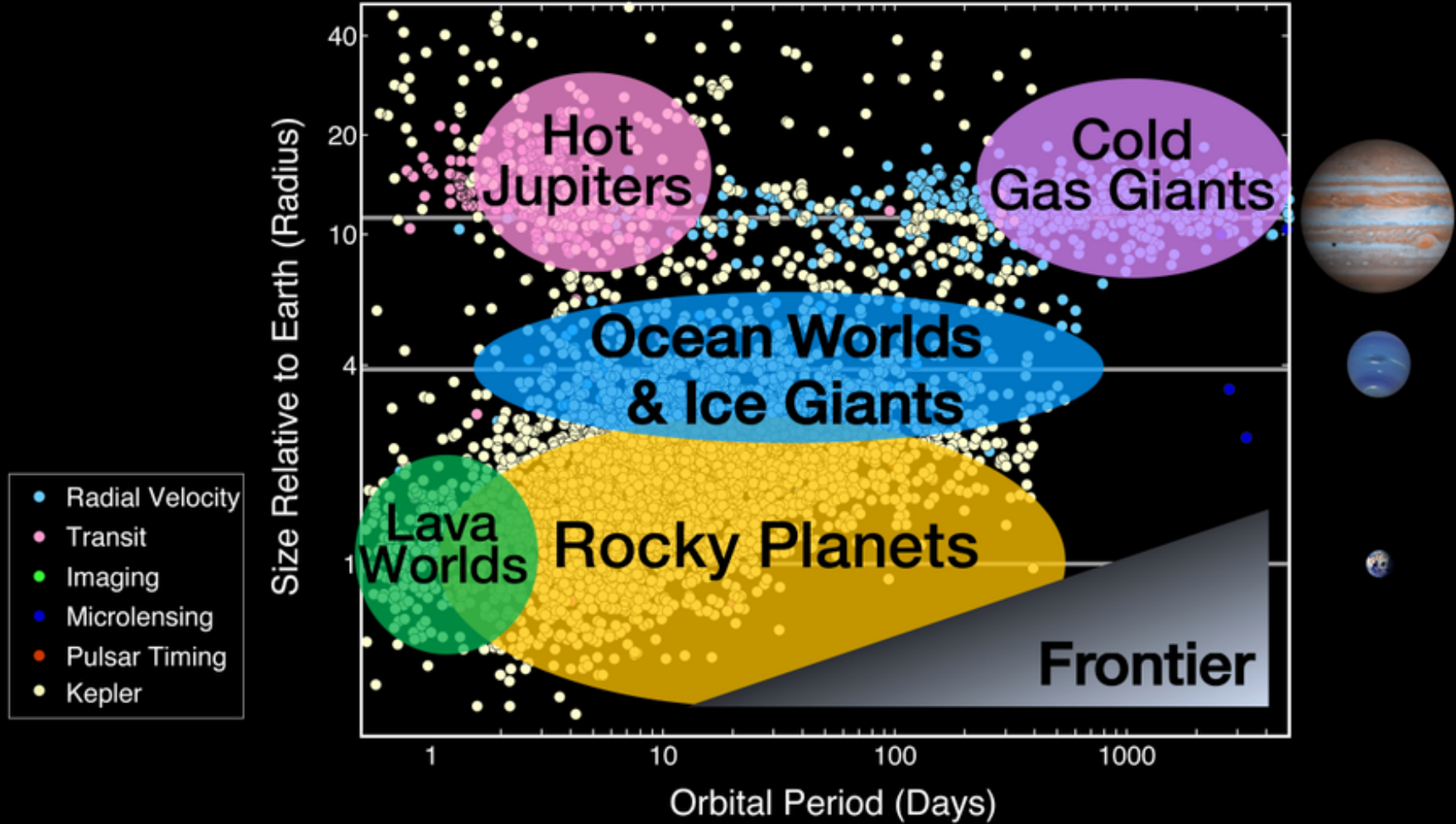
CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Jul 2018

Gezegen Çeşitliliği



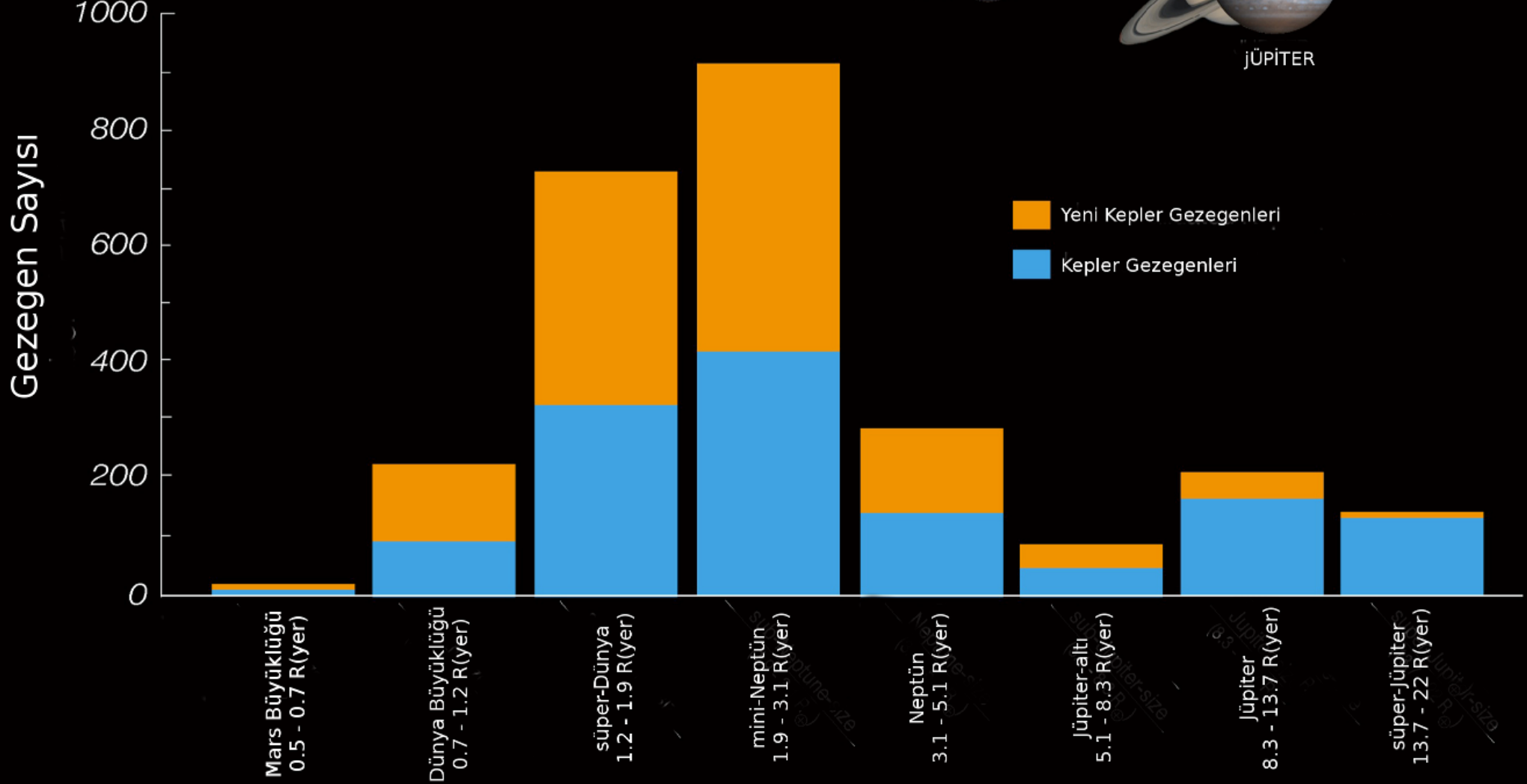
Exoplanet Populations

nineplanets.org



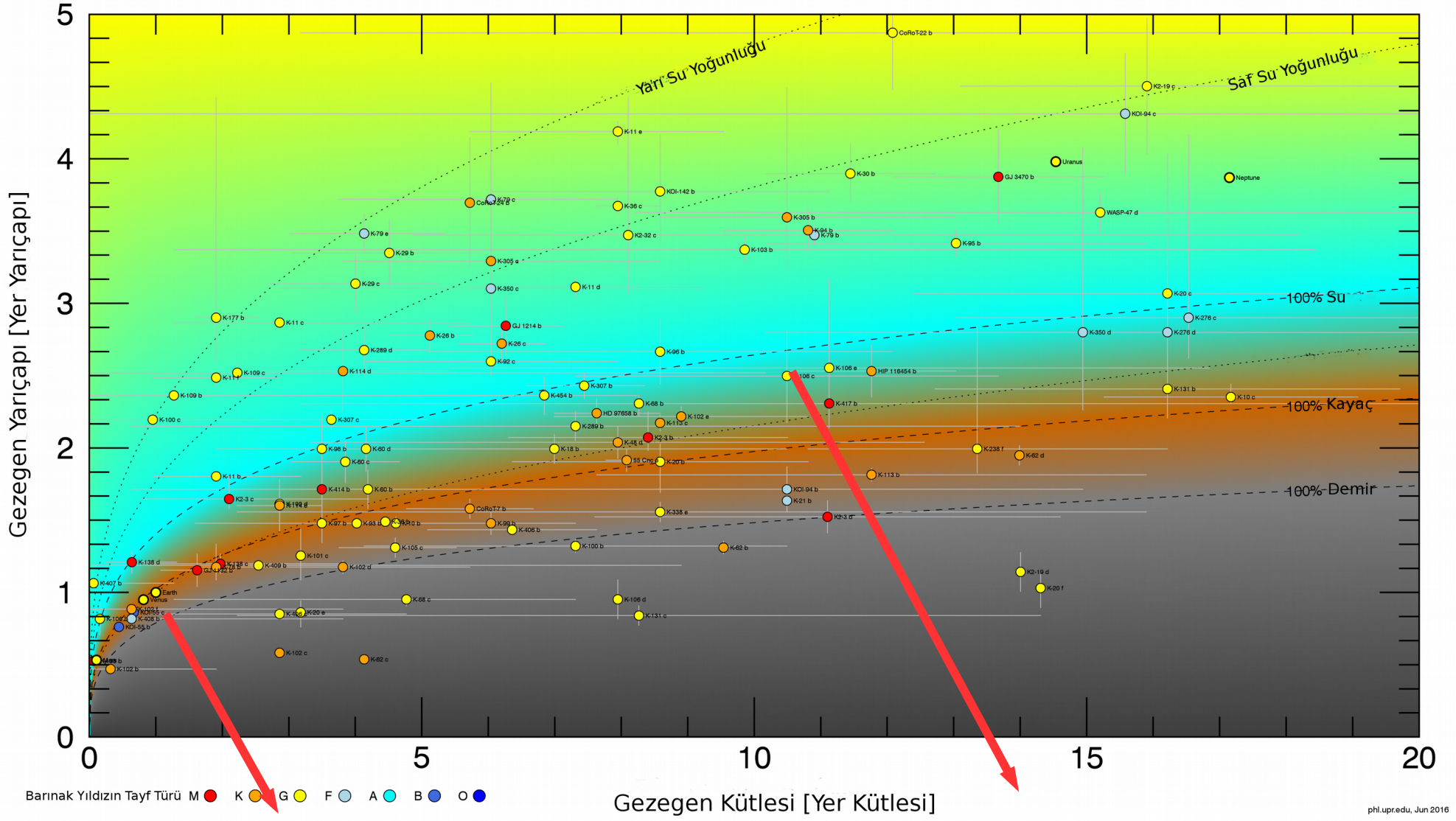
Keşif yöntemlerinin her birinin de farklı tür ötegezegenleri bulmaya yanlı olduğu görülmektedir. Geçiş ve Dikine Hız sıcak-Jüpiterleri bulmaya duyarlı iken; doğrudan görüntüleme yıldızından uzak dev gaz gezegenleri, mikromercek yöntemi yine yıldızına uzak soğuk gezegenleri bulmaya yanlıdır. Geçiş yöntemindeki hassasiyet arttıkça sayıca ağırlıktaki mini-Neptün ve süper-Dünyalar da bu yöntemle daha çok bulunmuştur.

GÜNEŞ SİSTEMİ GEZEGENLERİNİN BÜYÜKLÜKLERİ



Keşif yönteminin yanlılıklardan arındırılmamış Kepler'le keşfedilen gezegenlerin büyüklükleri geçiş yöntemindeki duyarlılık arttıkça sayıca ağırlıktaki süper-Dünya ve mini-Neptünler'in daha çok bulunduğunu göstermektedir.

Geçiş Gözlemleri İle Ulaşılan Sonuçlar



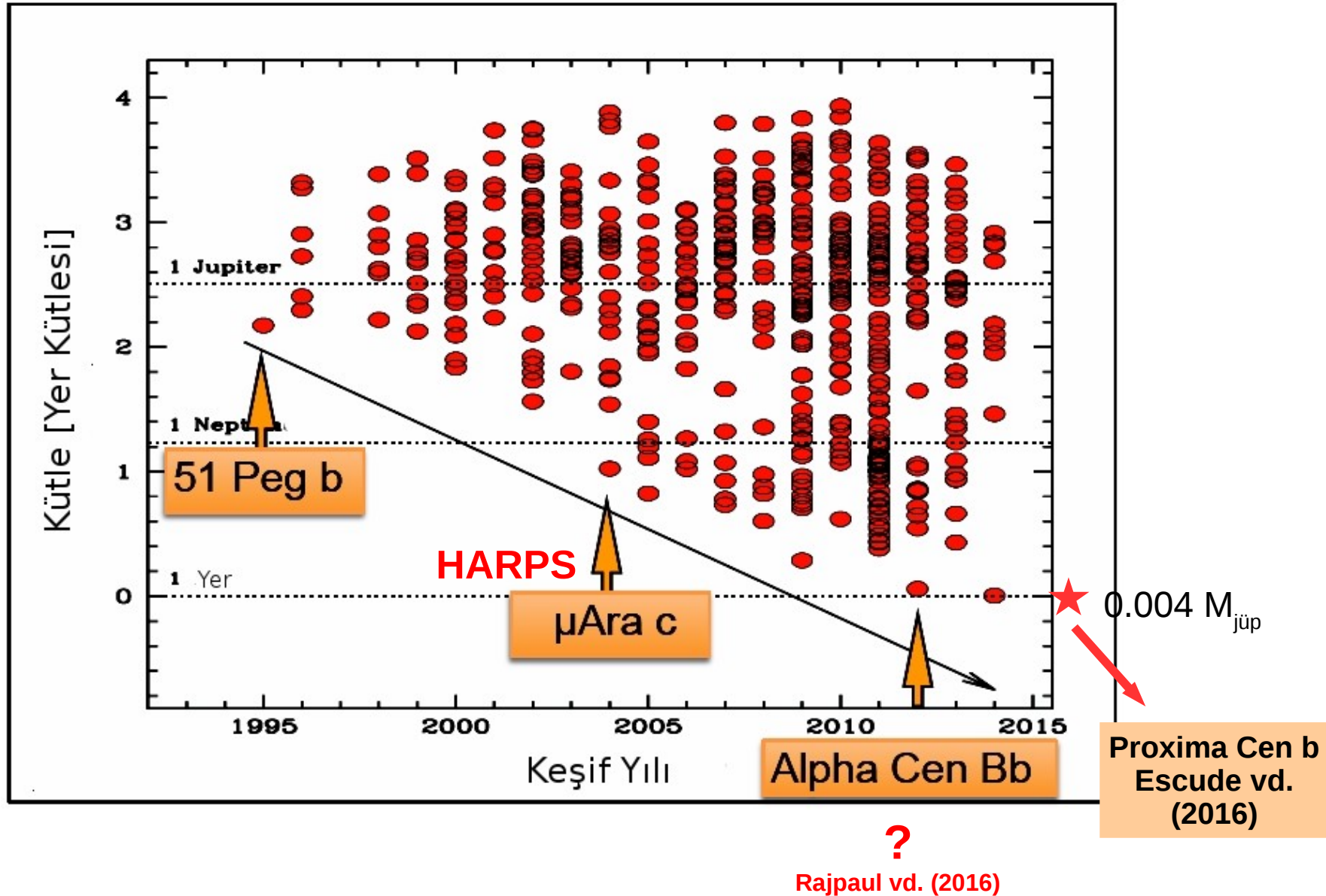
Karasal gezegenlerin bulunduğu bu bölgede ise hala yeterli örneğe sahip değiliz. Bu nedenle bu bölgedeki cisimlerin nasıl oluştuğu ve Güneş Sistemi'ndeki bu tür gezegenlerle, başka sistemlerdekililer arasında nasıl bir ilişki bulunduğunu henüz yeterince anlayamıyoruz!

Geçiş gözlemleriyle bu bölgeyi neredeyse doldurmuş durumdayız. Artık bu cisimleri topluca değerlendirebilmek ve aralarındaki ilişkileri kurabilmek için yeterli veriye sahibiz!

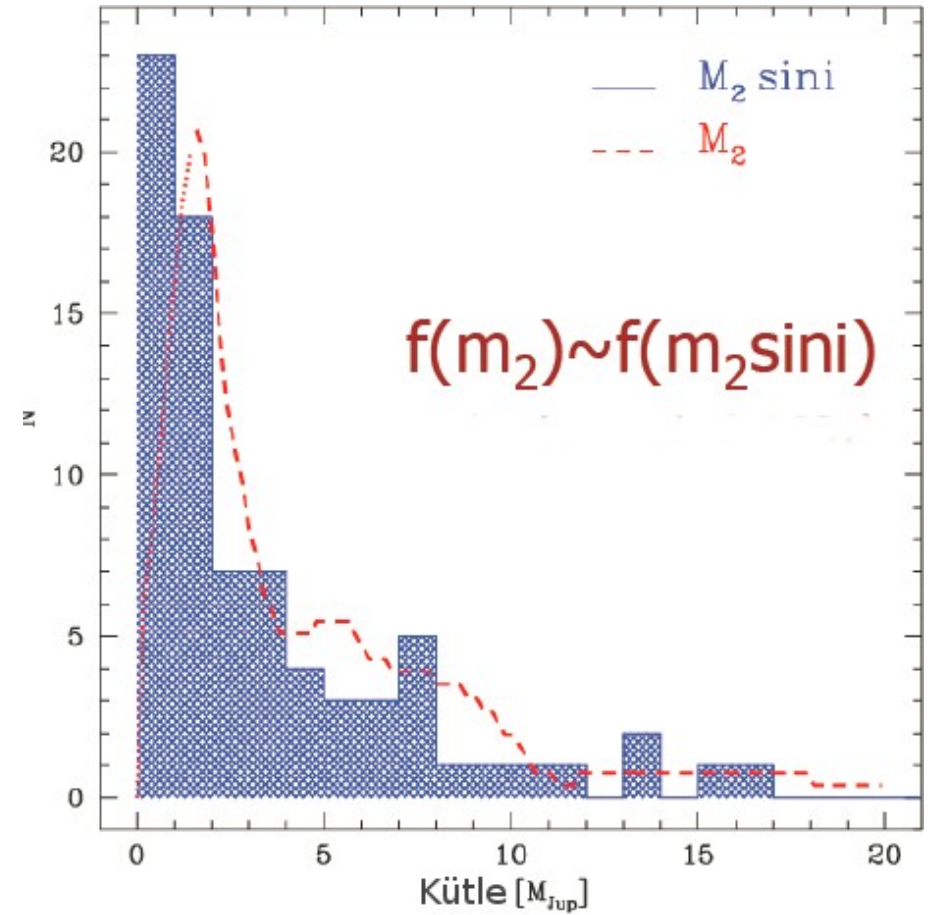
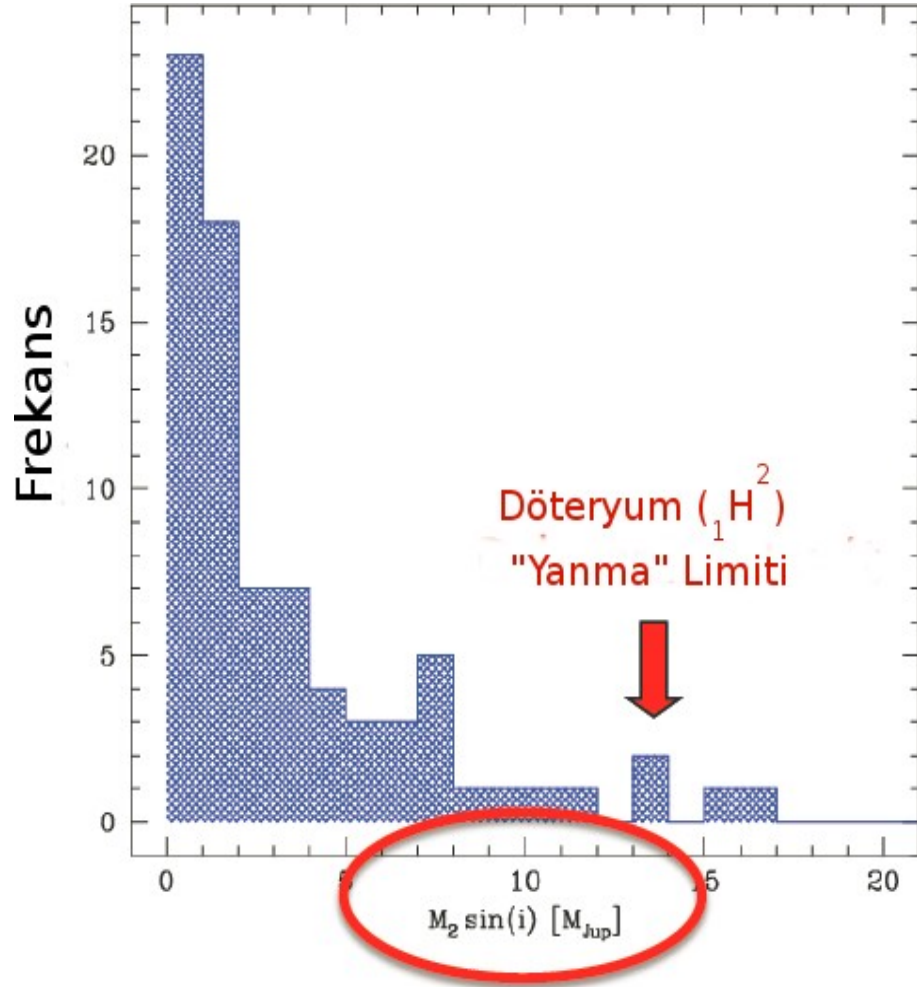
Sonuçların Bize Sordurduğu Sorular

- ✓ Sıcak Jüpiterler çok sayıda mı yoksa sadece bu bir seçim etkisi mi?
- ✓ Sıcak Jüpiter'ler nasıl oluşmuş olabilir?
- ✓ Şu ana kadar karşılaştığımız sistemler bizimkine pek benzemediği için acaba Güneş Sistemi'miz aslında bir istisna mı? (Yoksa “Kopernik (sıradanlık) ilkesi” işlemiyor mu?)
- ✓ Ötegezegenler ne kadar yaygın? Herhangi bir yıldızın etrafında gezegen bulma olasılığımız nedir?
- ✓ Gezegen sistemi oluşum kuramlarımız gözlediğimiz çeşitliliği açıklamakta ne derece başarılı?

Teknolojinin Gelişimi - Dikine Hız Tekniğiyle Bulunan Gezegen Kütleleri

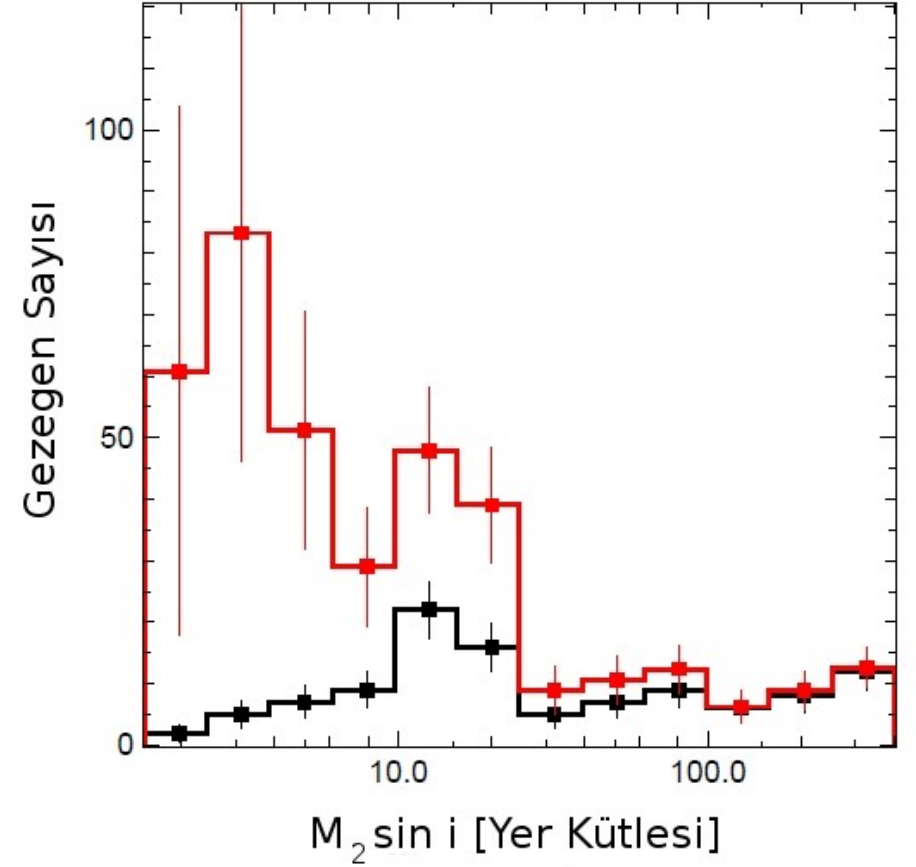
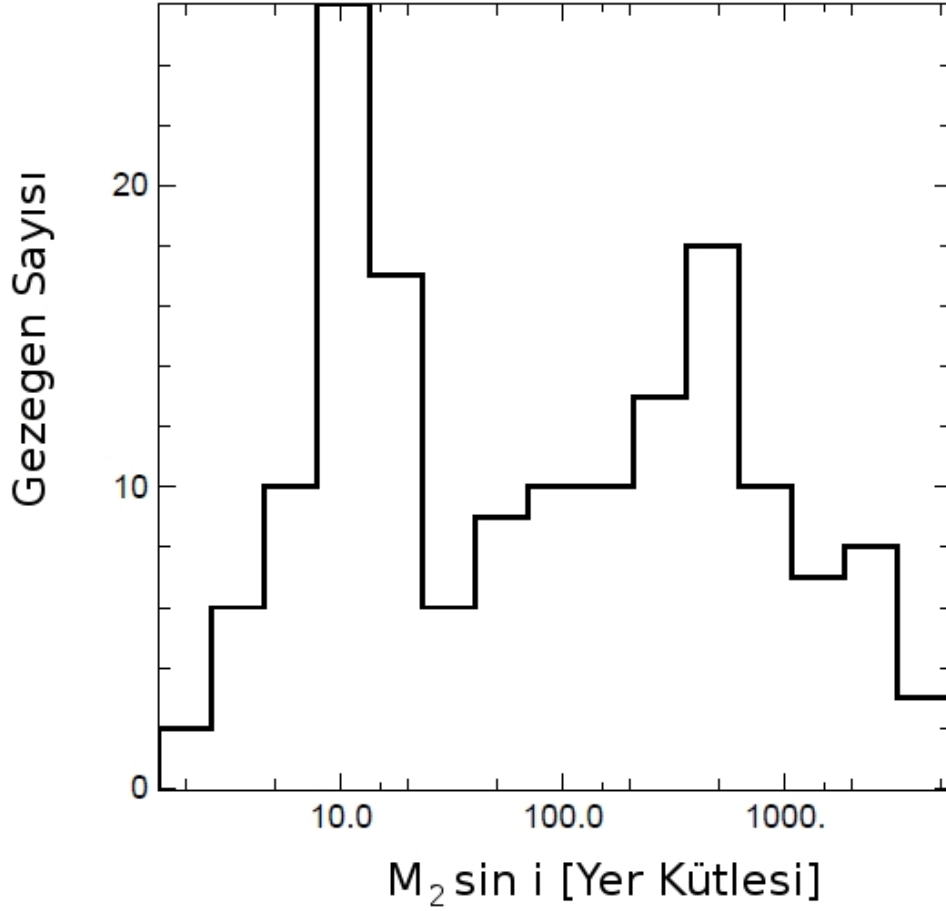


Kütle Dağılımı



İstatistiksel algoritmalarla yörünge eğim açısına bağlılık giderildikten sonraki dağılım (kırmızı kesikli eğri)
(Jorissen vd. 2011)

HARPS / CORALIE Dikine Hız Araştırmaları'nın Sonuçları Kütle Dağılımı

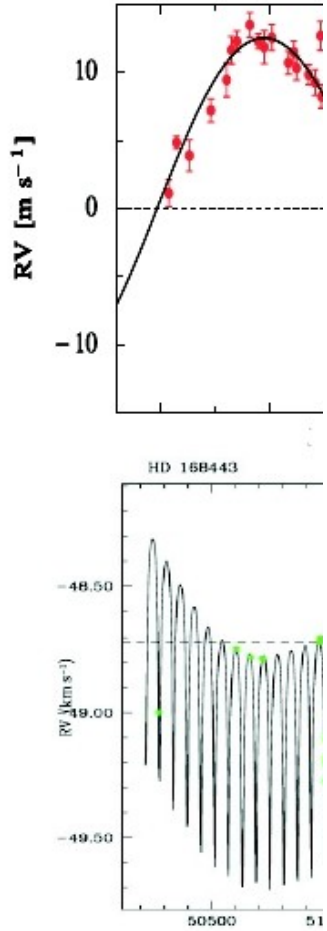


HARPS/CORALIE araştırmalarında keşfedilen gezegenlerin kütle dağılımı. Dikine hız yönteminin ‘Sıcak Jpiterleri’ bulmak konusundaki yanlılığına ve bu grafikte herhangi bir yanlılık düzeltmesi yapılmamış olmasına karşın küçük kütleli gezegenlerin sayıca baskın olması dikkat çekici! (Mayor vd. 2011)

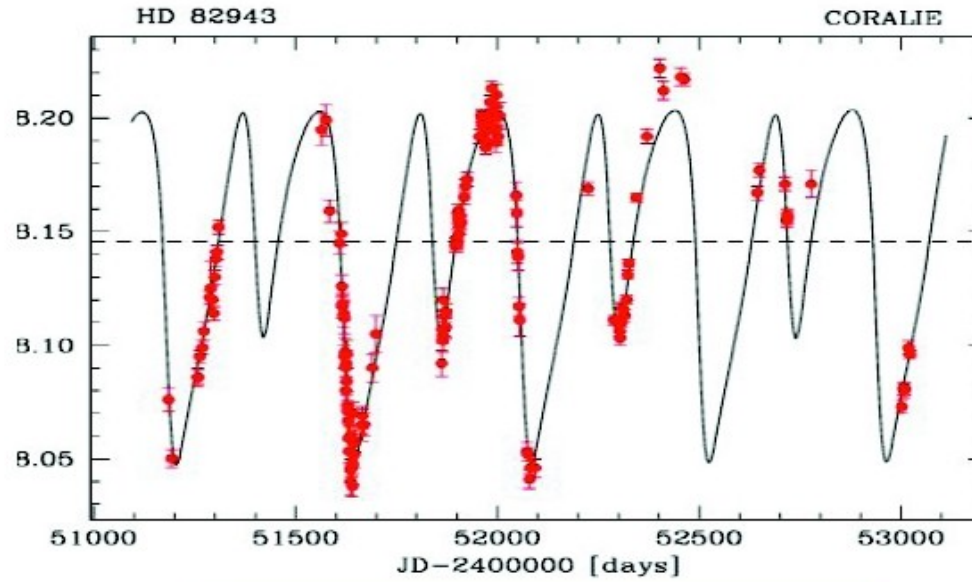
HARPS/CORALIE araştırmalarında keşfedilen gezegenlerin gözlemsel yanlılıklar istatistiksel algoritmalarla giderildikten sonraki kütle dağılımı (kırmızı). Siyah histogram soldaki şekille aynıdır ve yanlılıkları da barındırmaktadır (Mayor vd. 2011).

SONUÇ: Gezegen popülasyonunu ktelece küçük gezegenler domine etmektedir.

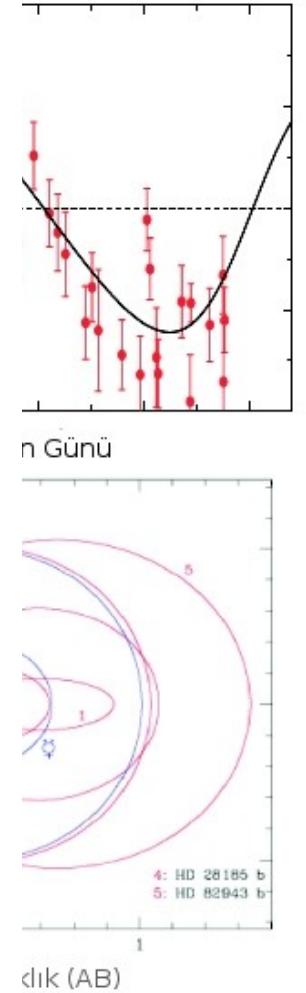
Gezegen Çeşitliliği: Dikine Hız Gezegenlerinin Yörünge Çeşitliliği



Rezonans Sistemleri
Yörünge dönemleri arasında iyi tanımlanmış
bir ilişki bulunan sistemler

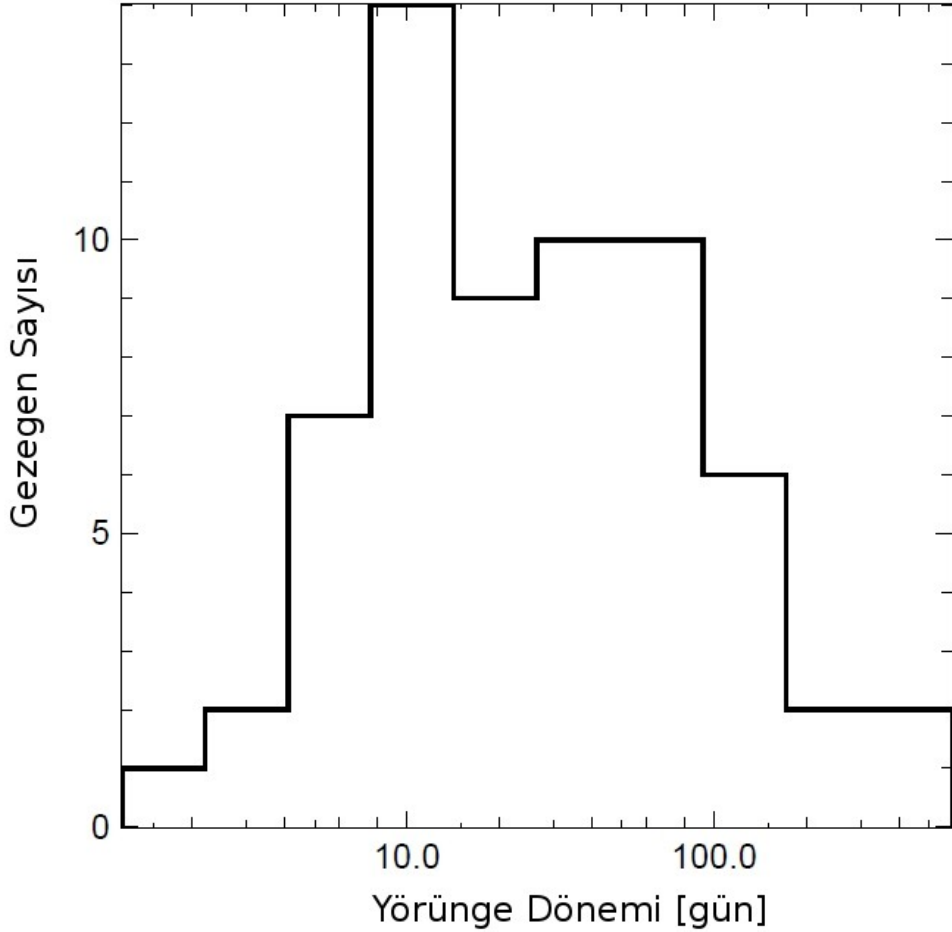


$$P2/P1 = 440d/220d = 2$$

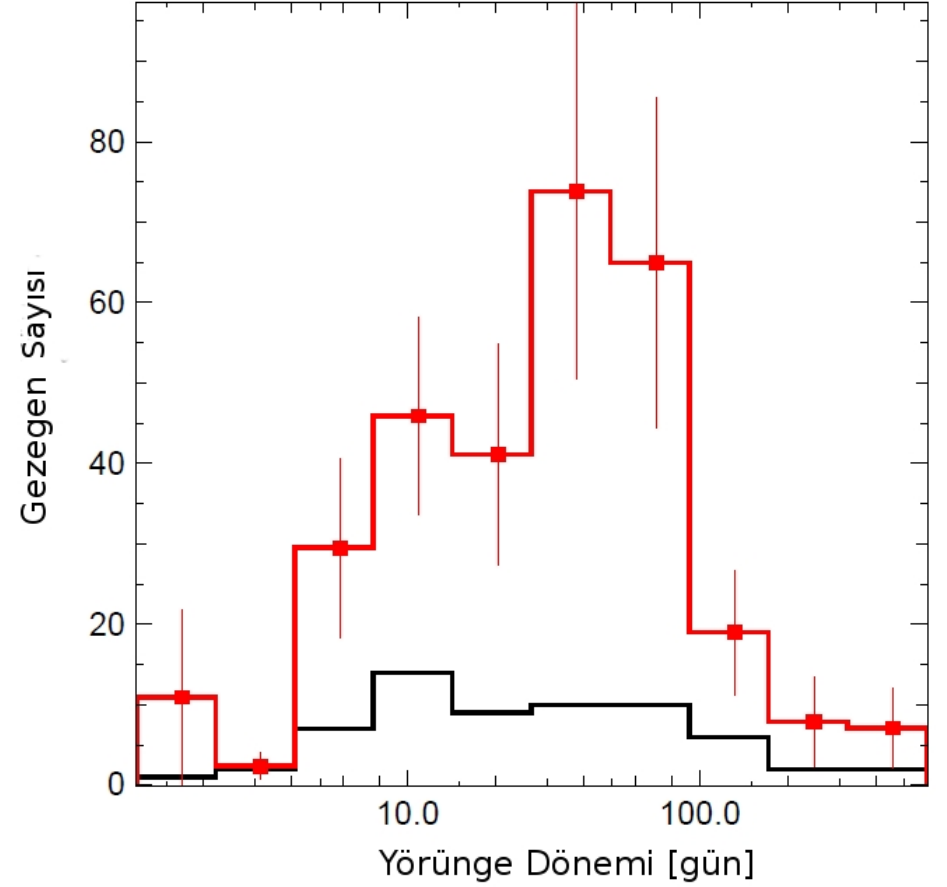


HARPS / CORALIE Dikine Hız Araştırmaları'nın Sonuçları - II

Yörünge Dönemi Dağılımı



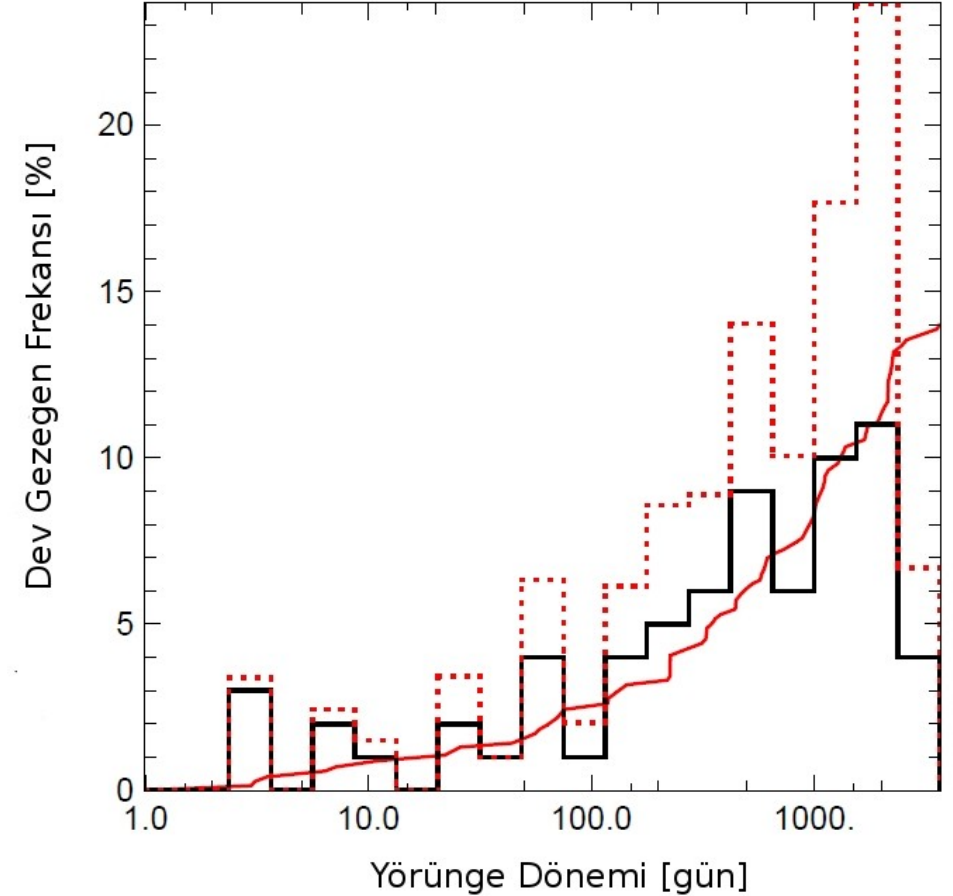
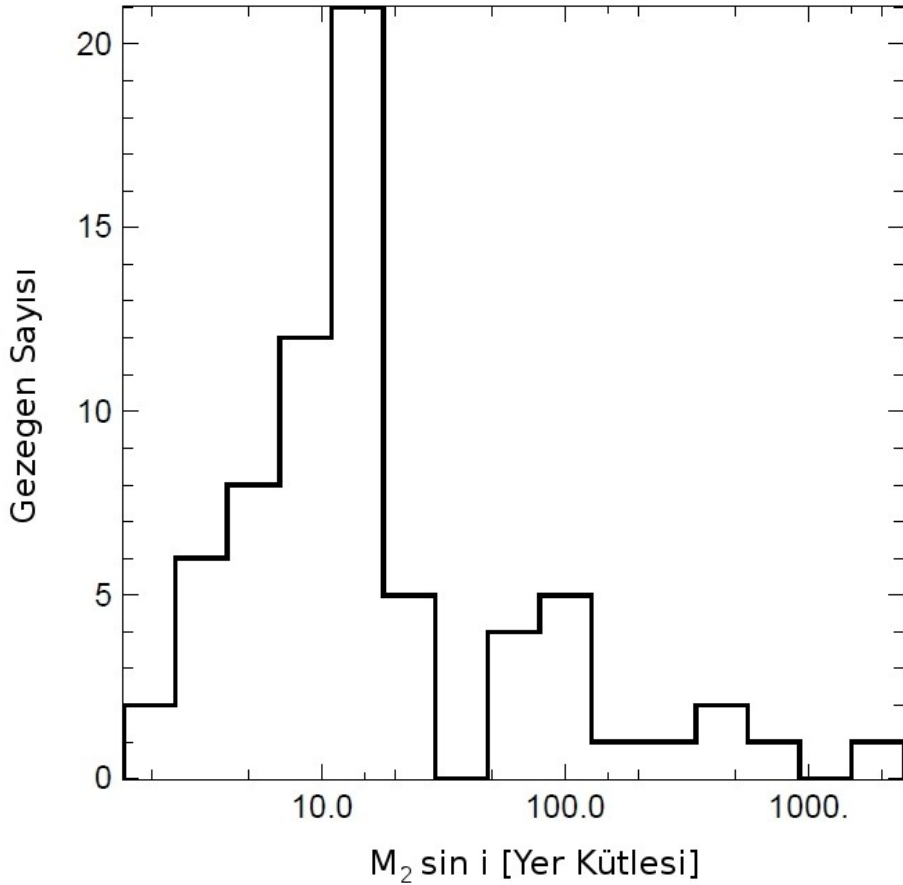
HARPS/CORALIE araştırmalarında keşfedilen $M_2 \sin i < 30 M_{\text{yer}}$ kütleli gezegenlerin (Süper Dünya ve Mini Neptünler) dönem dağılımı (Mayor vd. 2011)



HARPS/CORALIE araştırmalarında keşfedilen $M_2 \sin i < 30 M_{\text{yer}}$ kütleli gezegenlerin gözlemsel yanlıklar giderildikten sonraki dönem dağılımı (Mayor vd. 2011)

HARPS / CORALIE Dikine Hız Araştırmaları'nın Sonuçları - III

Kütle - Yörünge Dönemi Dağılımı: Değerlendirme



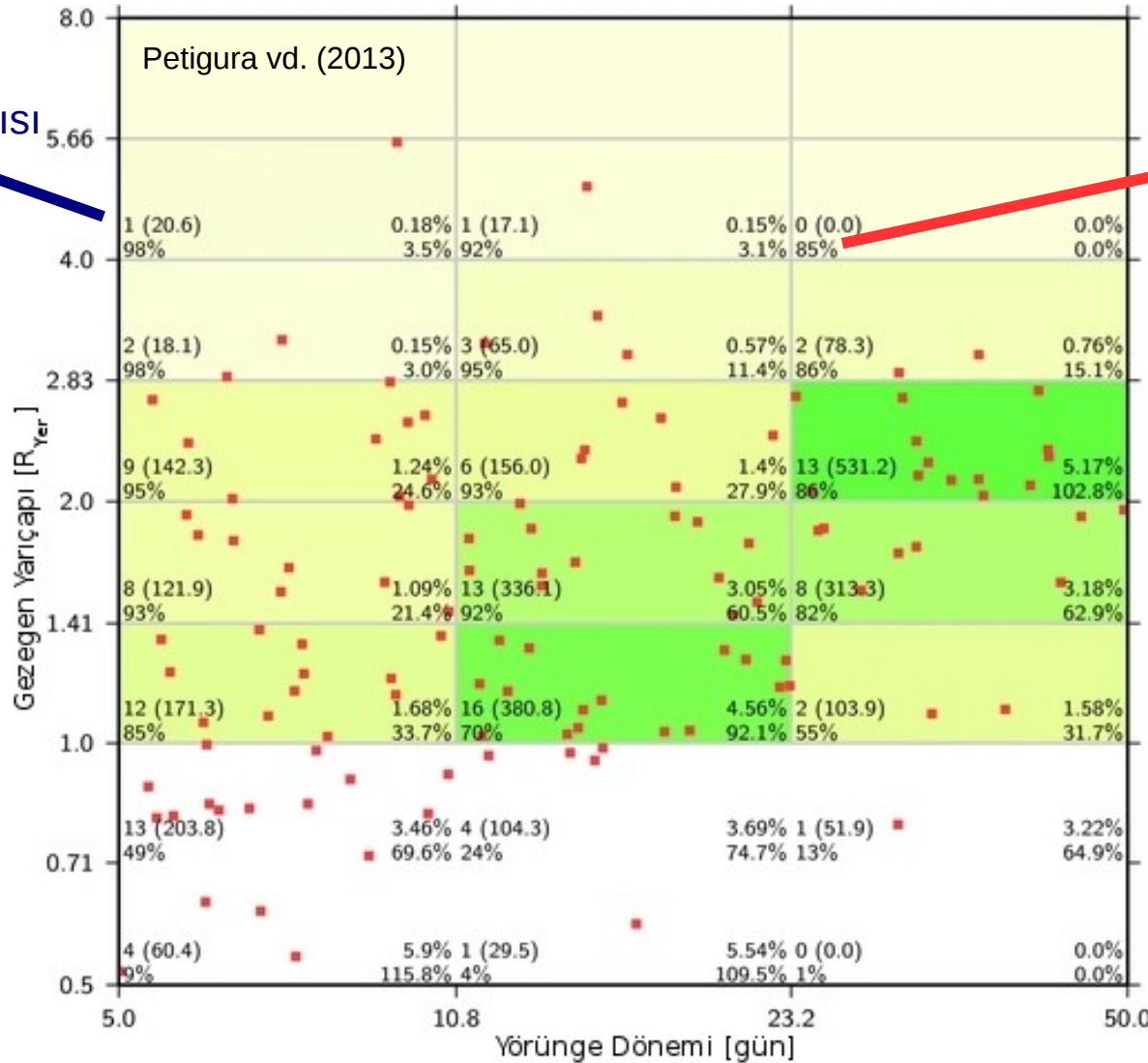
HARPS/CORALIE araştırmalarında keşfedilen $P < 100$ gün dönemli gezegenlerin kütle dağılımı. Kısa yörünge dönemli gezegenler arasında küçük kütleli gezegenler hiçbir yanlılık düzeltilmese de oldukça baskın! (Mayor vd. 2011)

HARPS/CORALIE araştırmalarında keşfedilen $M_2 \sin i > 50 M_{\text{yer}}$ kütleli dev gaz gezegenlerin (siyah histogram) ve gözlemsel yanlıklar giderildikten sonraki (kırmızı histogram ve eğri) dönem dağılımı (Mayor vd. 2011)

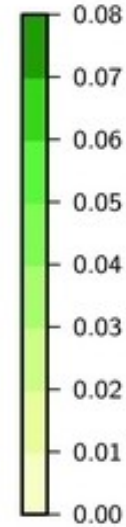
SONUÇ: Kütlece küçük gezegenler kısa yörünge dönemlerine sahipken, dev gaz gezegenler için kütle büyüdükçe yörünge dönemi artmaktadır. Bu sonuç merkezi yığılma teorisini destekler niteliktedir!

Gözlemsel Yanlılıkların Giderilmesi

Keşfedilen
gezegen sayısı

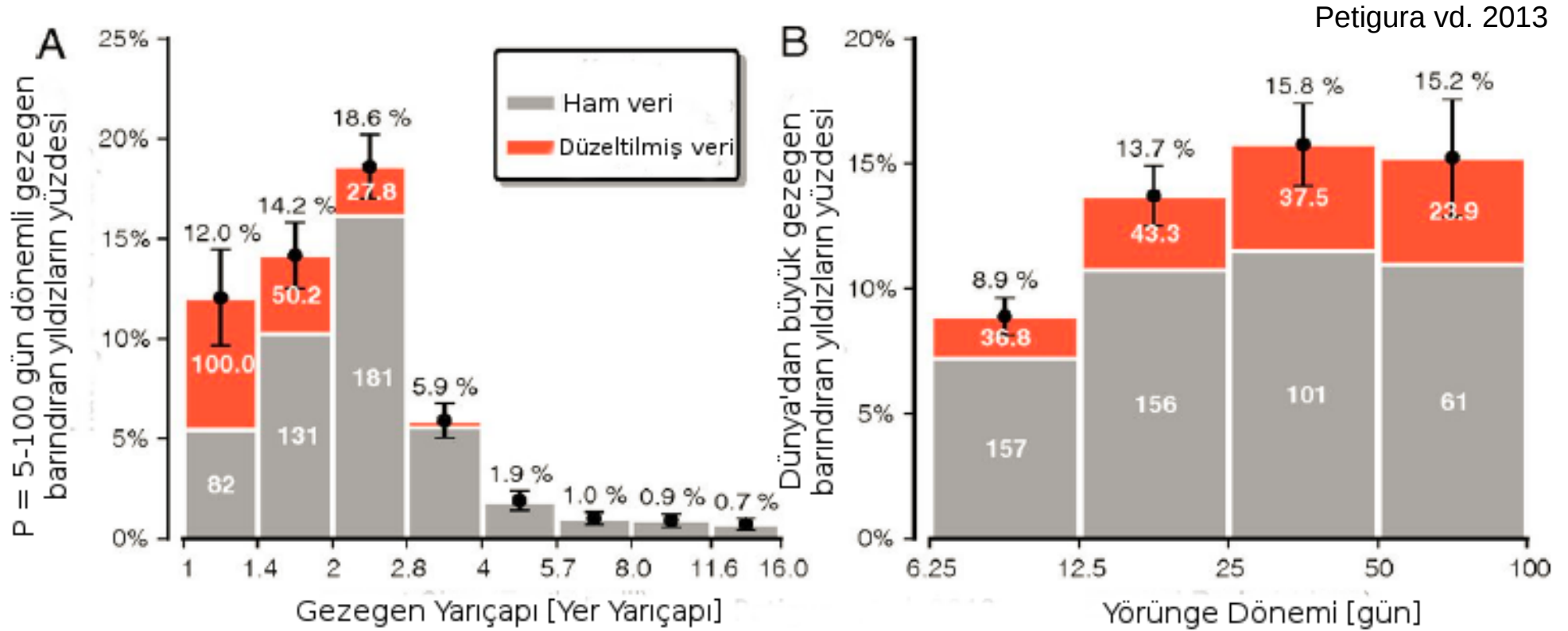


başarım
(ing.completeness)



Geçiş yönteminin yanlılıkları iyi bilindiği için herhangi bir araştırmanın (örn. Kepler) hangi dönemlerde hangi büyüklükte gezegenleri, hangi olasılıkla “yakalayabileceği” hesaplanabilir. Yukarıdaki grafikteki gibi, tüm örnek uzayı dönem-yarıçap bölgelerine ayrılır, her bir bölgedeki keşifler sayılıp, “yakalama” olasılığına bölünürse o bölge için gerçekte ne kadar gezegenin var olabileceği ve araştırmanın bu gezegenlerden ne kadarını “yakalayamadığına” dair bir bilgiye ulaşılmış olur. Böylelikle gözlemsel yanlılıklar bir nebze giderilebilir, ancak gözlemsel yanlılıkların giderilmesi yine de gezegen bulunabilecek tüm bölgelerde anlamlı sayıda gezegen içeren geniş bir örnek uzayına ulaşılmasına bağlıdır!

Gezegen Geçişi Araştırmalarının Sonuçları - I



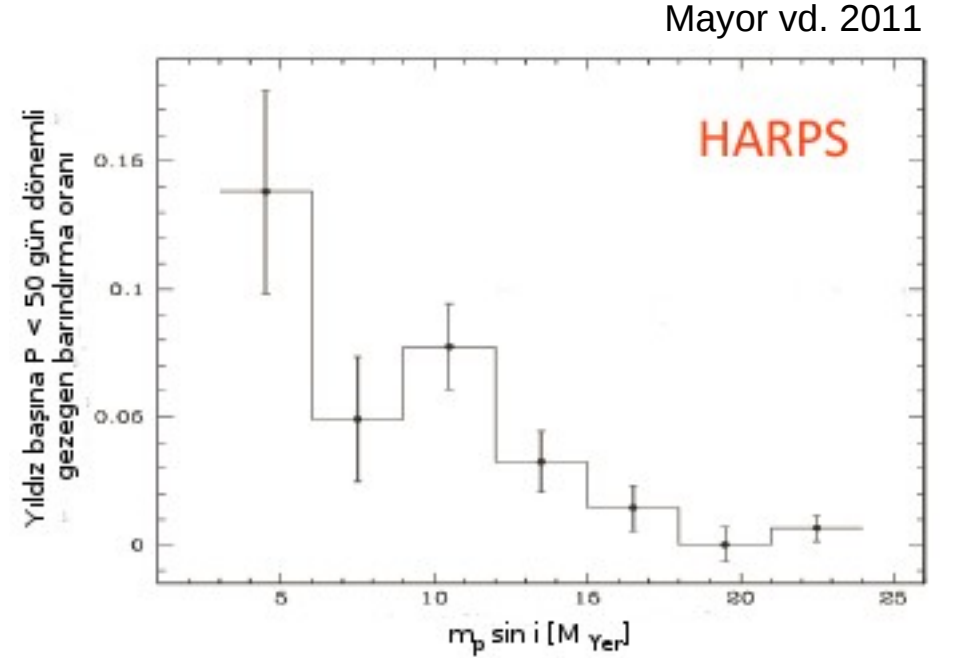
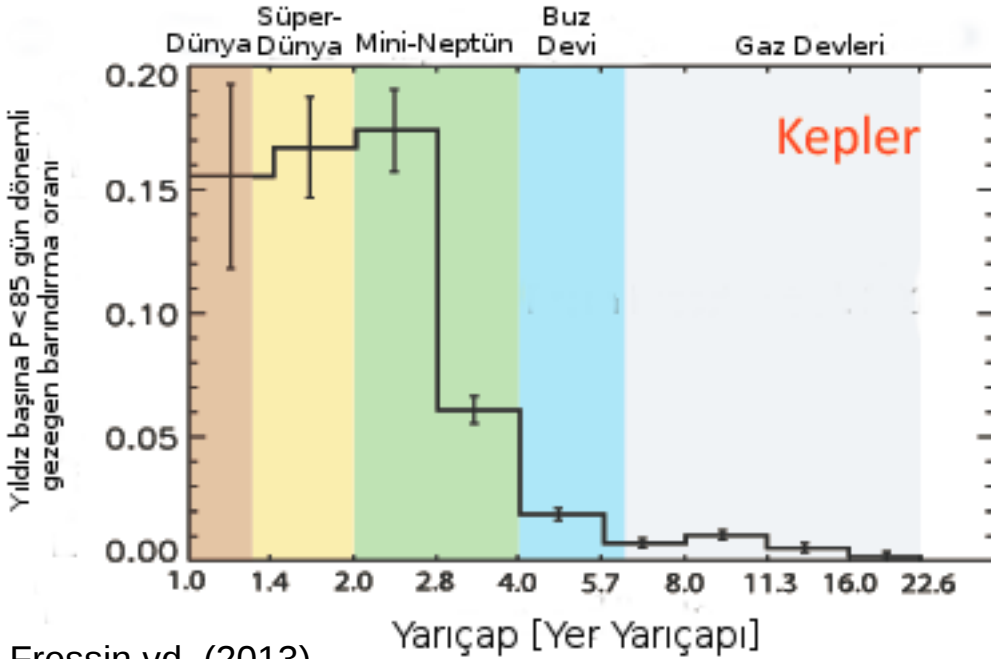
A. Görüldüğü gibi gözlemsel yanlışlıklar giderildikten sonra 2.8 R_{yer} 'den daha küçük gezegenler yüzdece neredeyse tüm gezegenlerin yarısını oluşturmaktadır. Yanlılığın en çok küçük gezegenler için düzeltilmiş olması bu gezegenlerin küçük olmaları nedeniyle geçiş sırasında yarattıkları ışık değişim genliğinin düşük olması, dolayısı ile tespit edilmelerinin zorluğundan kaynaklanmaktadır. Bu gözlemsel yanlışlık büyük gezegenler için ters yöndedir. Dikine hız gezegenlerinde kütle dağılımından bahsederken burada büyüklük dağılımından bahsediyor olduğumuza dikkat ediniz!

B. Yanlılık bu kez kısa yörünge dönemli gezegenlerin daha kolay bulunması yönündedir, zira gözlem süresi içinde daha çok geçiş yaparlar! Dolayısı ile düzeltmeden en az onlar etkilenmiştir. En önemlisi sonuçlar dikine hız tekniğiyle ulaşılan sonuçlarla paralellik göstermektedir. **Kısa yörünge dönemli gezegenler çoğunluktadır ve bu gezegenlerin büyük bölümü de küçüktür!**

Kepler / HARPS Sonuçları - I

- ✓ HARPS (dikine hız tekniği) 50 günden kısa yörünge dönemli sistemler için $m_p \sin i \sim 3 M_{\text{Yer}}$ minimum kütleye kadar gözlemsel yanlışlıklardan arındırılmış, normalize bir dağılım sağlamaktadır.
- ✓ Kepler 100 günden kısa yörünge dönemli sistemler için $R_p \sim 1 R_{\text{Yer}}$ minimum yarıçapa kadar gözlemsel yanlışlıklardan arındırılmış, normalize bir dağılım sağlamaktadır.
- ✓ İki araştırma projesinin ortak metriği (ölçütü) kütle (dikine hız) ve büyüklüğün (geçiş) fonksiyonu olarak yıldız başına ortalama gezegen sayısıdır.

Kepler / HARPS Sonuçları - II



P < 50 gün yörünge dönemli R = 1.25 - 6 R_{Yer} aralığında gezegen barındıran yıldız sıklığı:

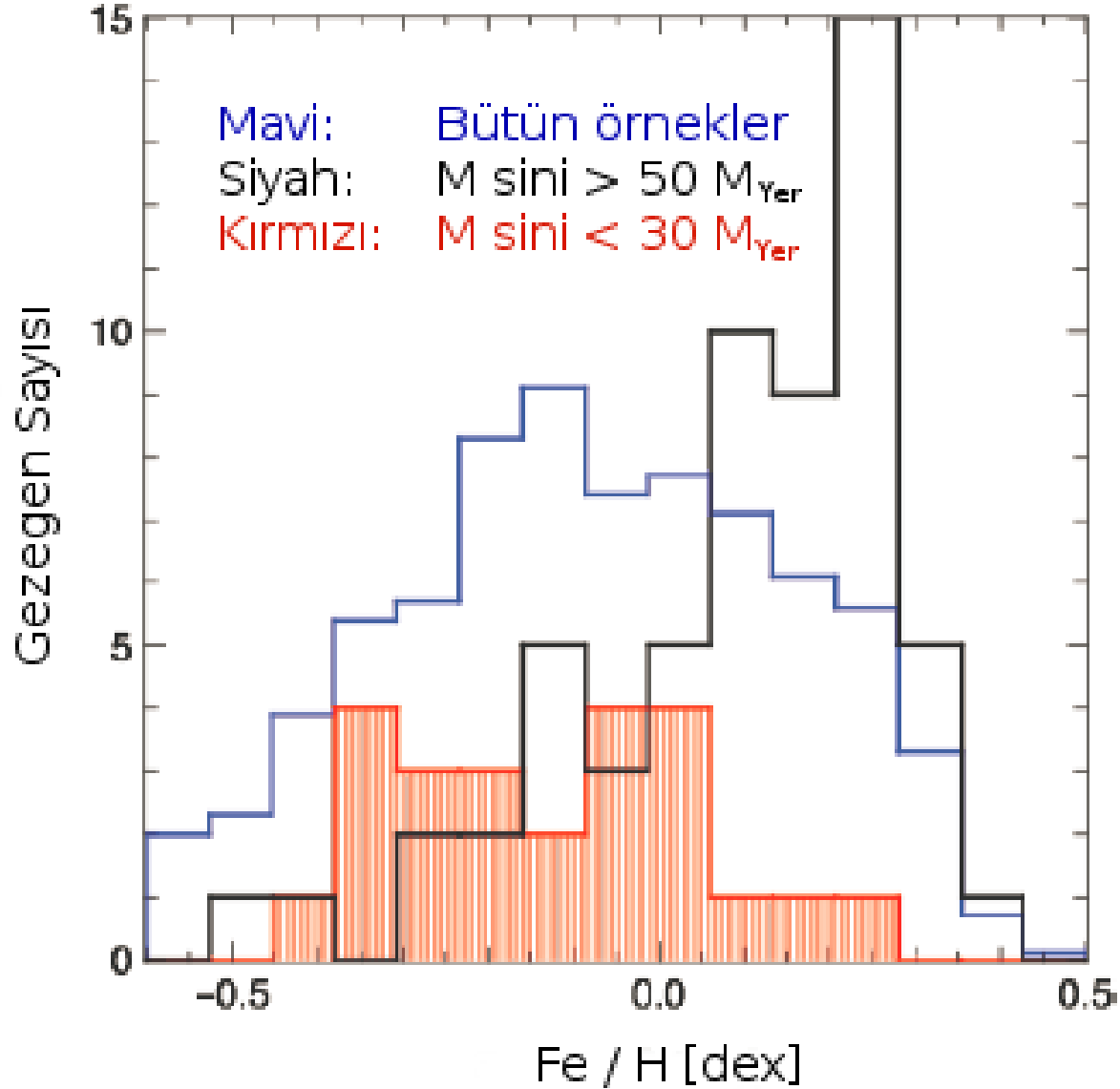
$$F = 0.39 \pm 0.02 \text{ gezegen / yıldız}$$

P < 50 gün yörünge dönemli $m_p \sin i = 3 - 30 M_{\text{Yer}}$ aralığında gezegen barındıran yıldız sıklığı:

$$F = 0.33 \pm 0.05 \text{ gezegen / yıldız}$$

Her ne kadar geçiş yöntemi gezegenin büyüklüğü, dikine hız yöntemi ise minimum kütlesi konusunda bilgi verse de her ikisinden elde edilen sonuçlar, küçük yarıçaplı ve küçük kütleli gezegenlerin tüm gözlemsel yanlılıkların giderilebileceği kadar veri elde edilebilen P < 50 gün dönemli gezegenler için oldukça baskın olduğu yönünde ve birbirleriyle tutarlıdır.

Barınak Yıldızların Metal Bolluğu



Sonuç: Açık ki dev gezegen barındıran yıldızlar (siyah) tüm yıldızlarla (gezegen barındıran:kırmızı ya da barındırmayan: mavi) ile karşılaştırıldığında metalce önemli ölçüde zenginler!

Kepler / HARPS Sonuçları - III

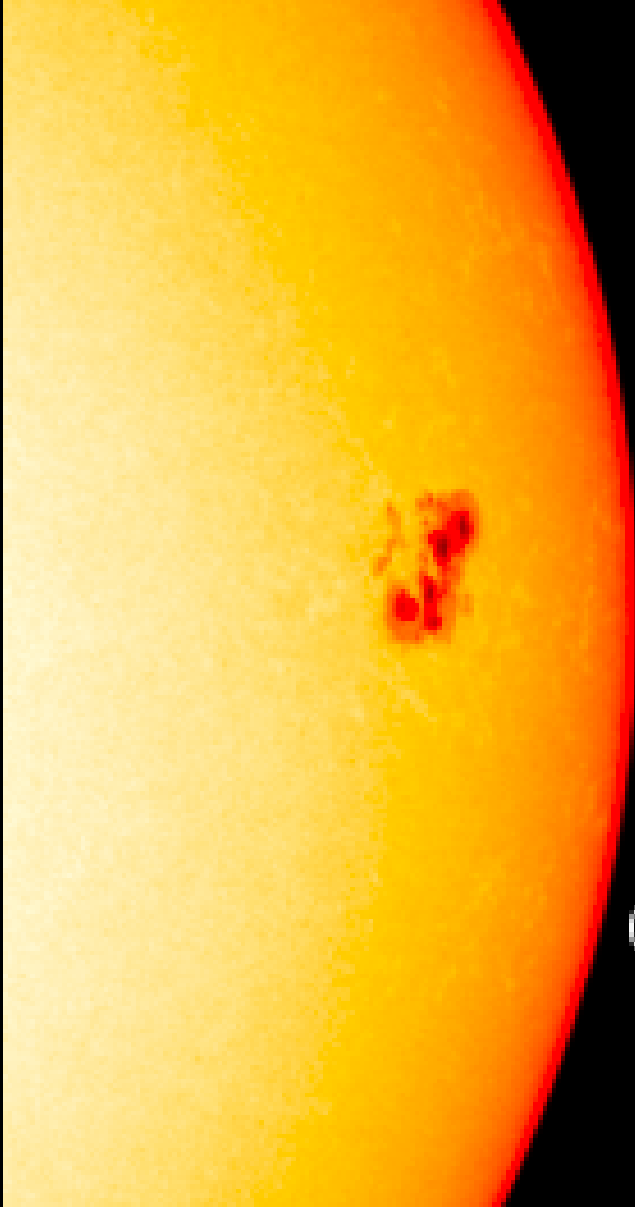
Etrafında gezegen araştırması yapılan (FGKM yıldızları)

- ✓ tüm yıldızların %1'i bir sıcak Jüpiter barındırmaktadır ve bu yıldızlar metalce diğer yıldızlara göre daha zengindir,
- ✓ tüm yıldızların %10'u herhangi bir yörünge dönemine sahip bir gaz gezegen barındırmaktadır ve bu yıldızlar metalce diğer yıldızlara göre daha zengindir.
- ✓ “küçük” yıldızlar (K,M cüceleri!) nadiren dev gaz gezegen barındırmaktadır,
- ✓ tüm yıldızların %80'i şu ya da bu türden en az bir gezegen barındırmaktadır,
- ✓ tüm yıldızların %30'u 100 günden küçük yörünge dönemine ve (m_g sini) $30 M_{yer}$ 'den küçük kütleye sahip en az bir gezegen barındırmaktadır.
- ✓ Küçük yarıçap ve küçük kütleli gezegenlerin çoğunluğu çoklu gezegen sistemlerinde bulunmaktadır.
- ✓ $30 M_{yer}$ 'den küçük kütleye sahip en az bir gezegen barındıran yıldızların %70'i en az bir gezegen daha barındırmaktadır.
- ✓ Çoklu gezegen sistemleri yörünge kararlılığının izin verdiği ölçüde kompakt (sıkışık) olabilmektedir.

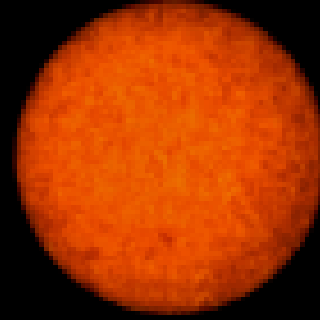


Kütle - Yarıçap İlişkisi

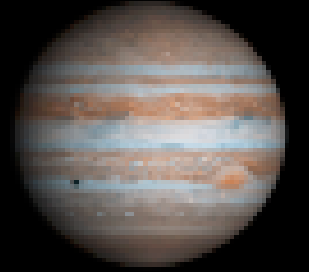
Kırmızı cüce yıldızlarla dev gaz gezegenler benzer yarıçaplara sahiptir ancak kütleleri önemli ölçüde farklıdır!



Güneş



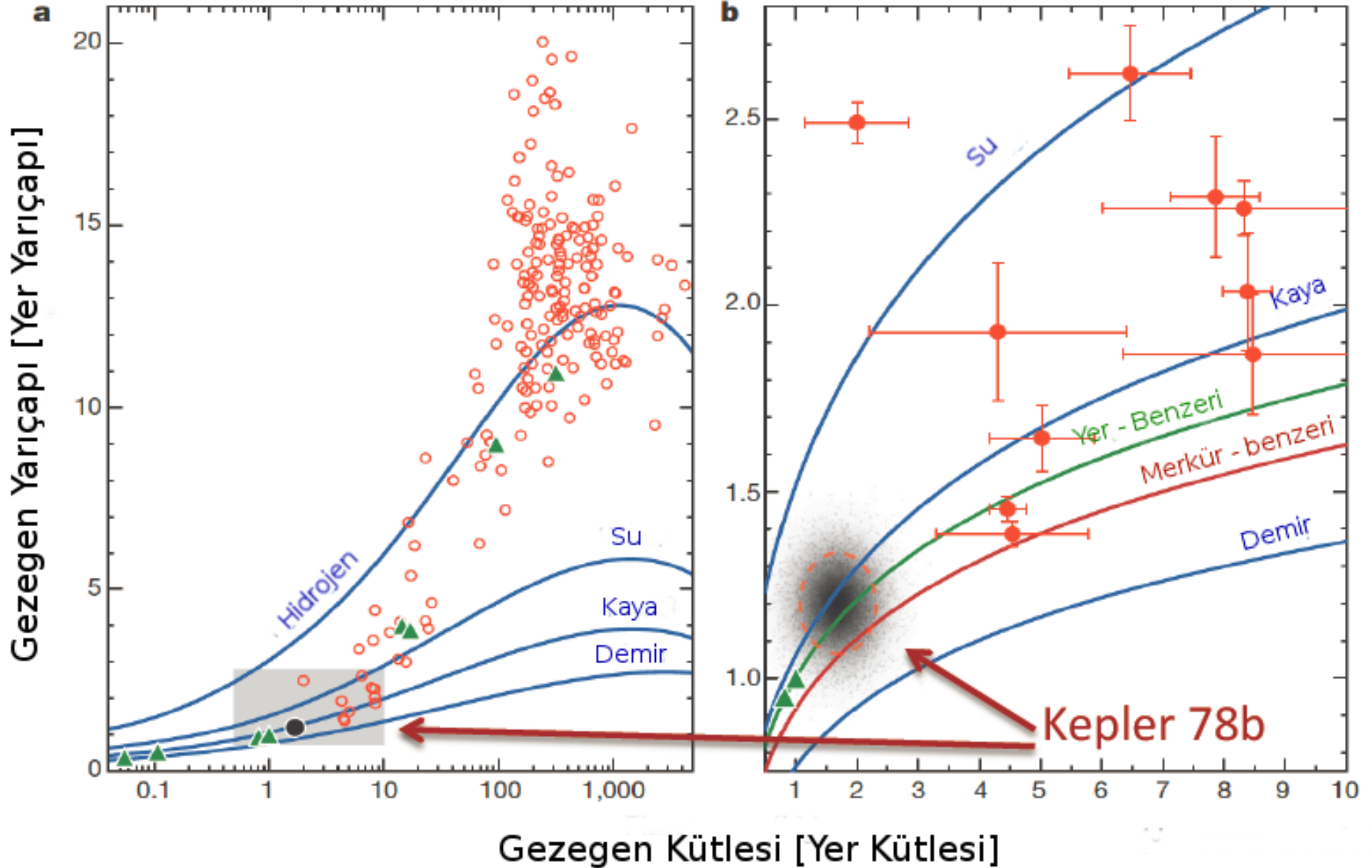
OGLE-TR-122



Jüpiter

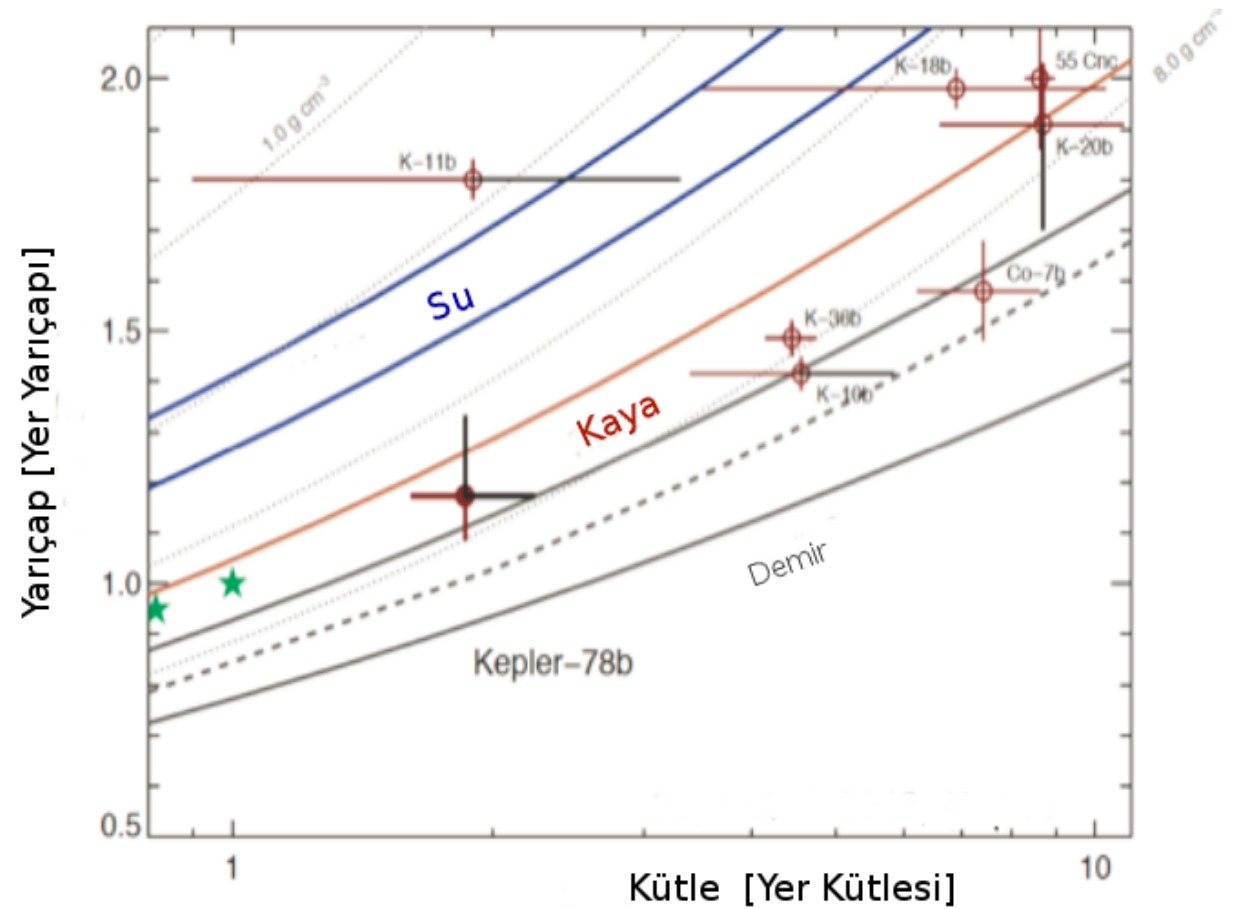
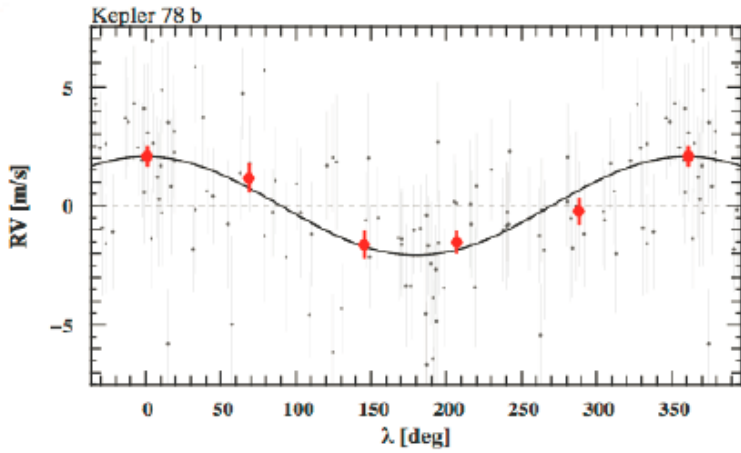
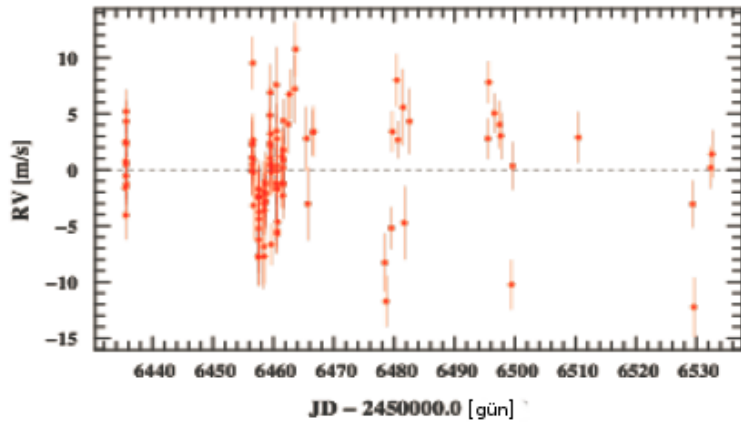
Ötegezegenler İçin Kütle / Yarıçap İlişkisi

Howard vd. (2013)



Kepler - 78b

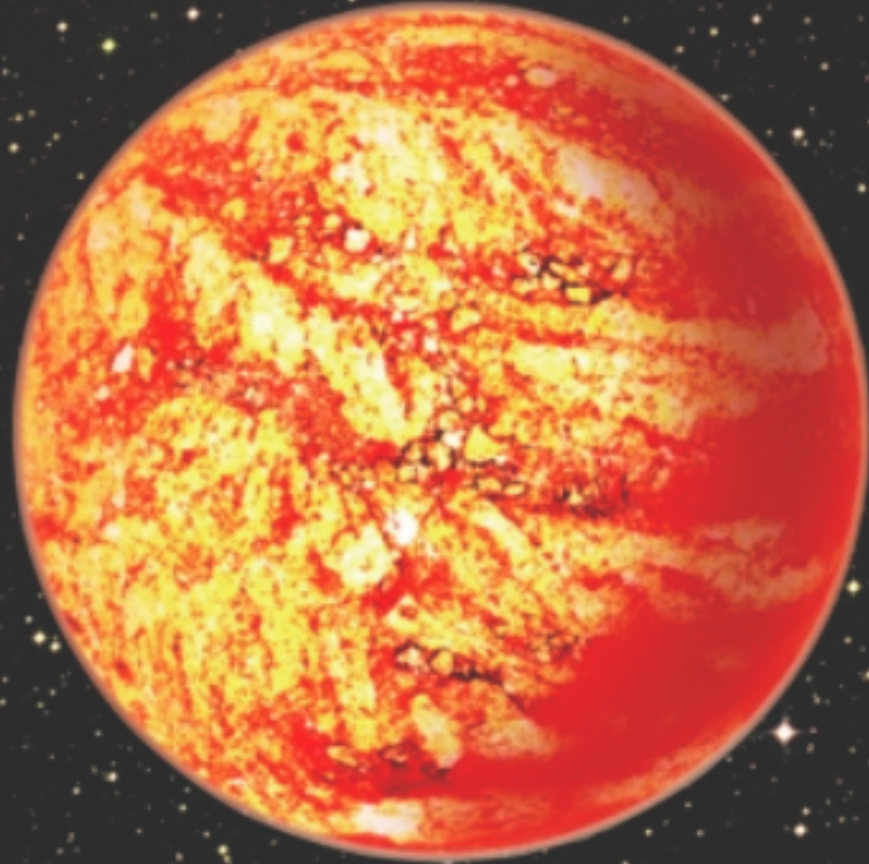
Pepe vd. (2013)





Dünya

1 Yer Kütlesi
1 Yer Yarıçapı

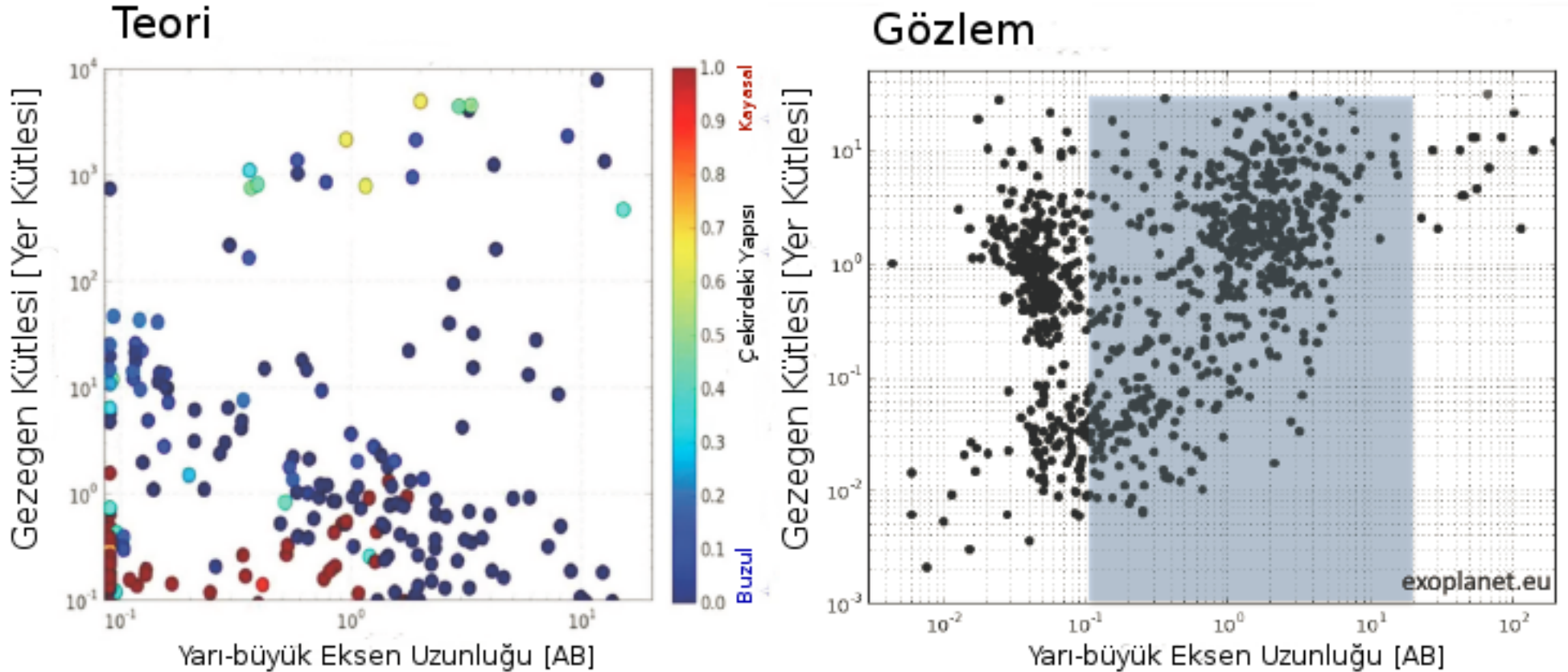


Kepler-78b

1.7 Yer Kütlesi
1.2 Yer Yarıçapı

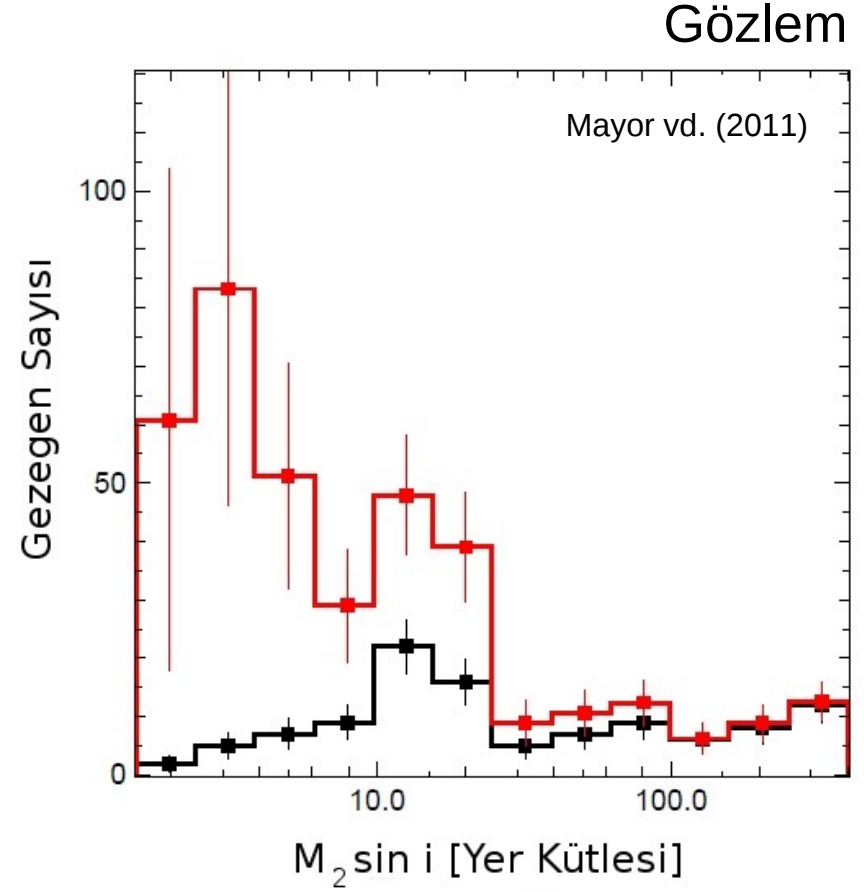
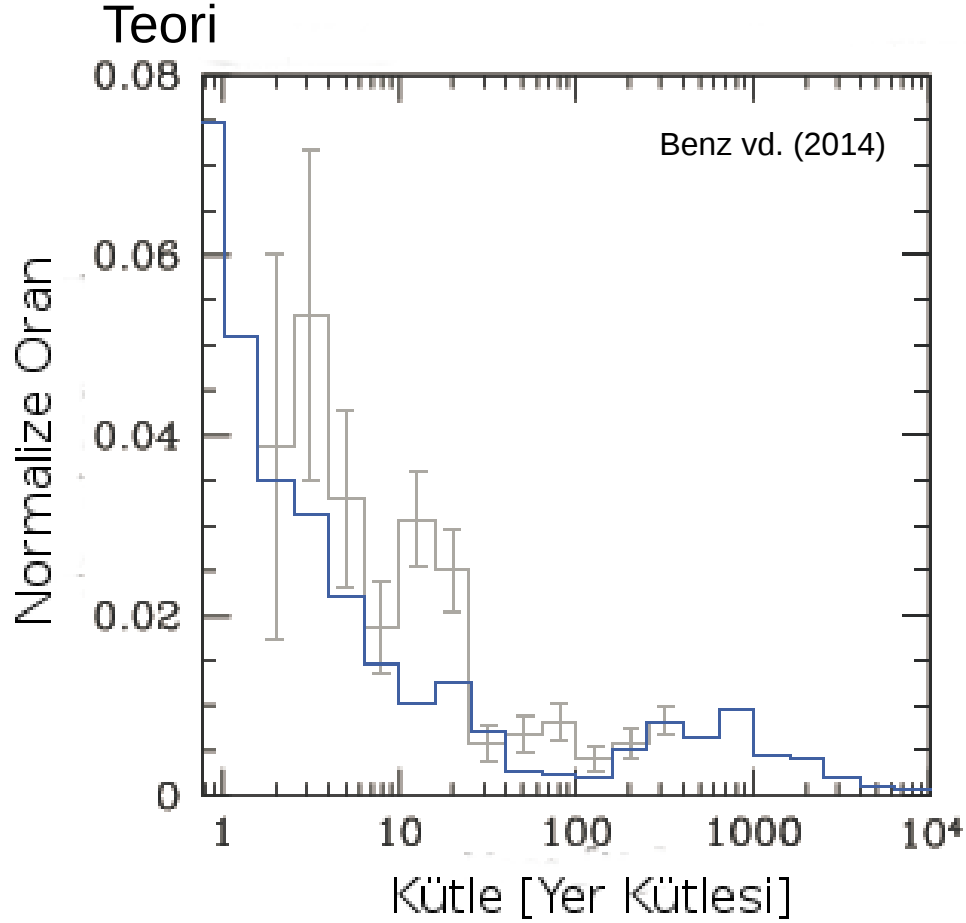
Kepler-78b büyüklük ve kütle itibarı ile Dünya'ya benzeyen karasal bir gezegendir. Ancak yıldızına yakınlığı nedeniyle oldukça sıcak, dolayısıyla yaşanabilir değildir!

Popülasyon Sentezi: Gözlem-Teori Karşılaştırması - I Kütle-Uzaklık İlişkisi



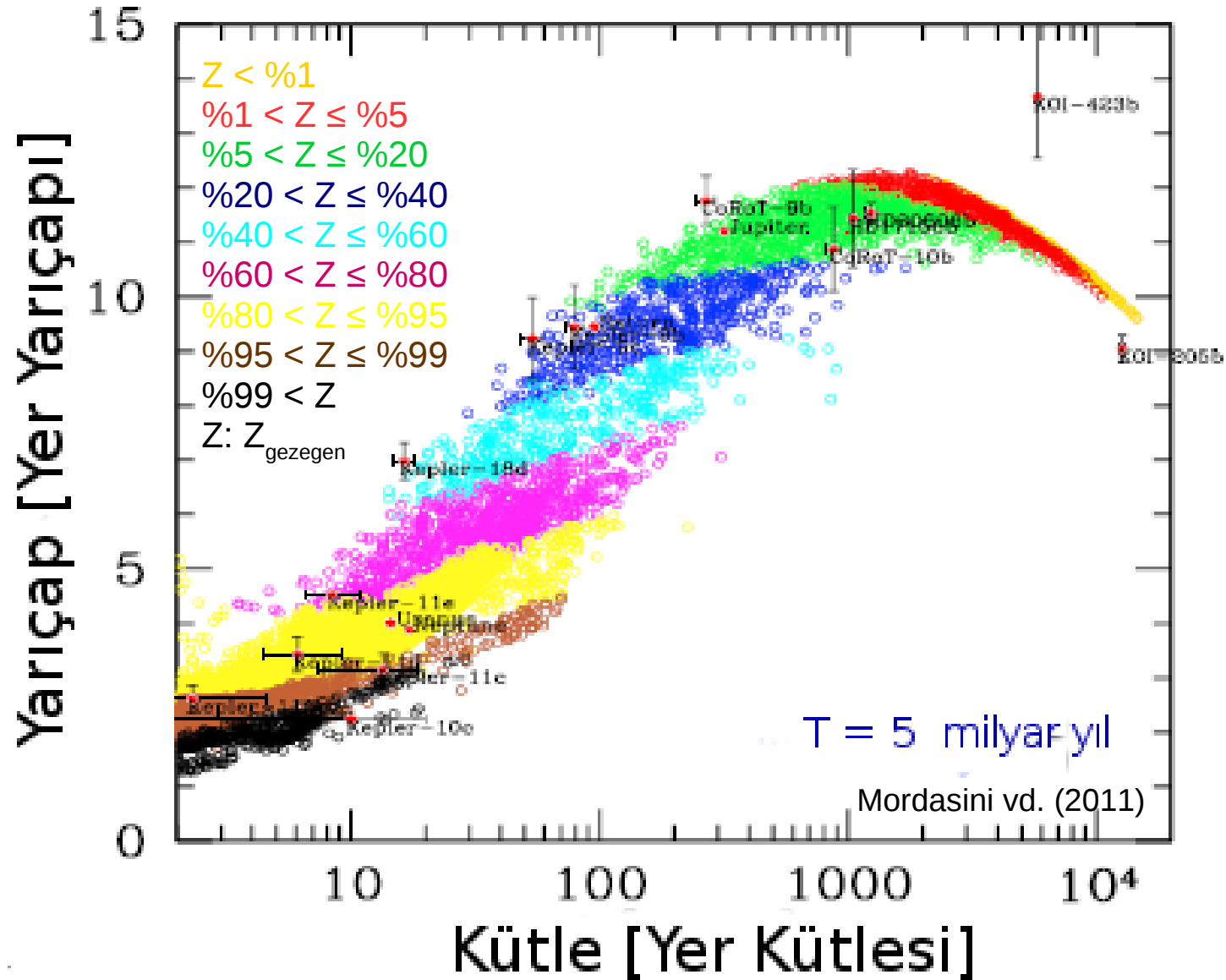
Solda. Alibert vd. (2013) tarafından Merkezi Yığılma Senaryosu esas alınarak üretilen modelin 5.8 milyon yıl için öngördüğü gezegen popülasyonu
Sağda. exoplanet.eu verileri kullanılarak oluşturulan gözlemsel gezegen popülasyonu. Teorik popülasyonla aynı parametre aralığını içeren bölge maviyle gösterilmiştir.

Popülasyon Sentezi: Gözlem-Teori Karşılaştırması - II Kütle Dağılımı

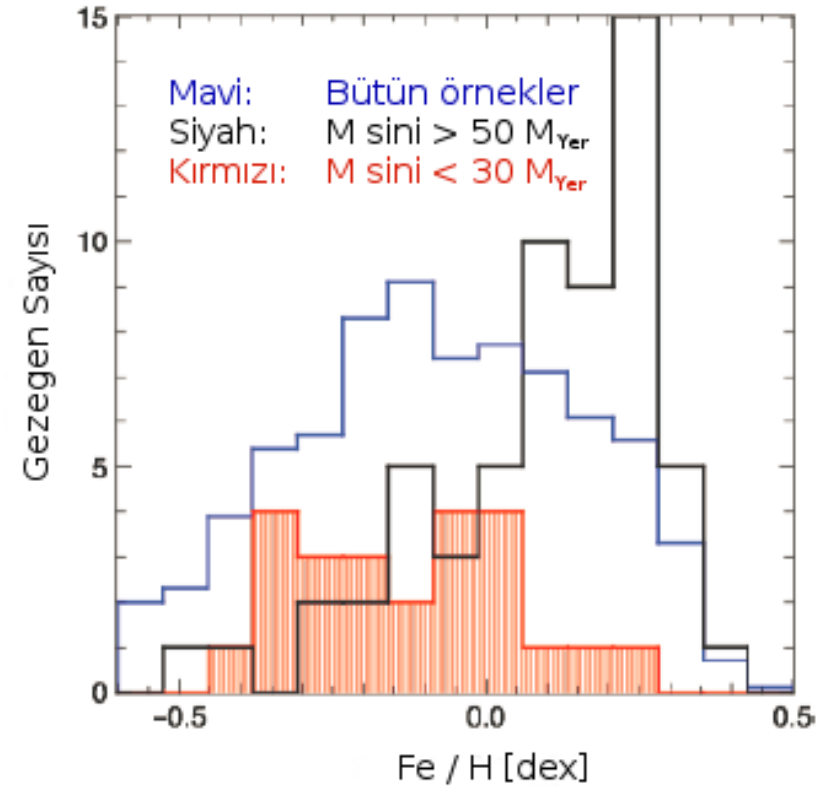
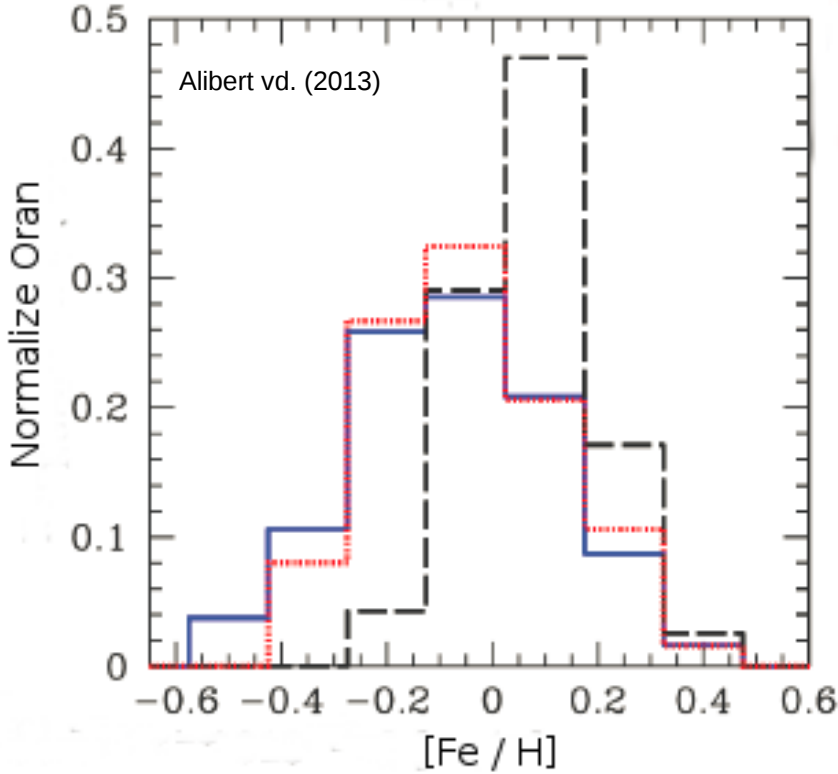


Teorik çalışmalar sonucu elde edilen gezegen popülasyonlarında kütle dağılımı (solda) ile dikine hız gözlemleriyle ulaşılmış ve gözlemsel yanlışlıklardan arındırılmış gözlemsel kütle dağılımı karşılaştırması (sağda, kırmızı). $\sim 50 M_{\text{yer}}$ kütesinden sonra beklenen sayıca azalma ve küçük kütleli gezegenlerde yoğunlaşma gerçekten de gözlenmiştir. En düşük kütleli gezegen oranları arasındaki fark, her ne kadar gözlemsel yanlışlıklar istatistiksel algoritmalarla giderilmeye çalışılsa da bunun ancak belirli oranda başarılı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu başarımın arkasındaki neden ise dikine hız gözlemlerinde ulaşılan hassasiyetle ancak az sayıda küçük kütleli gezegenin keşfedilebilmiş olmasıdır!

Popülasyon Sentezi: Gözlem-Teori Karşılaştırması - III Kütle-Yarıçap İlişkisi

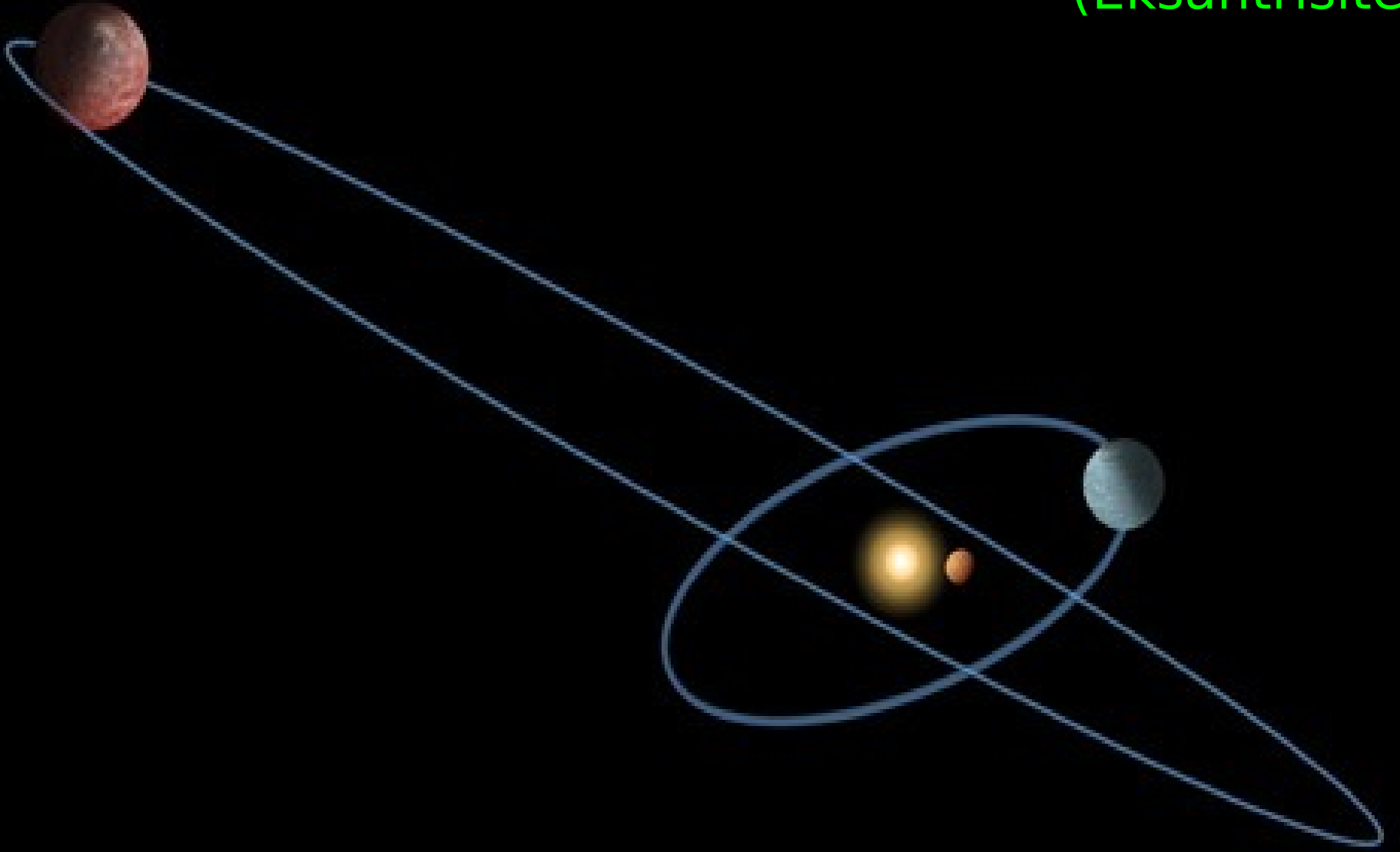


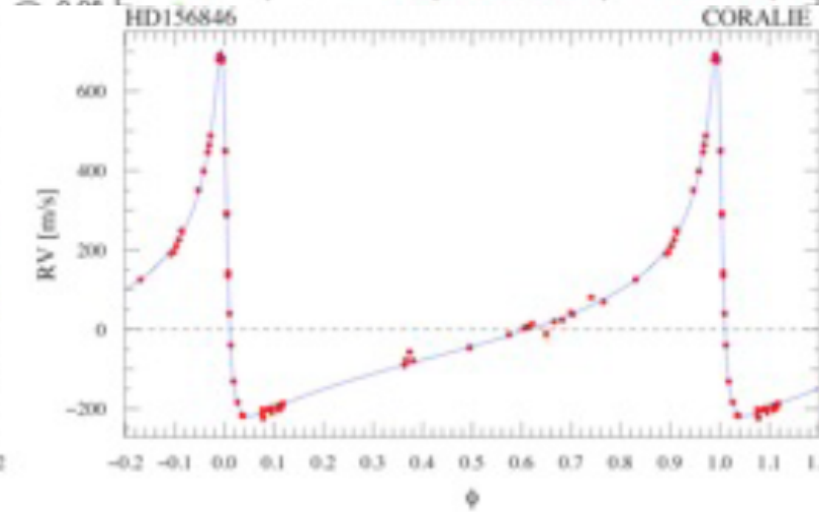
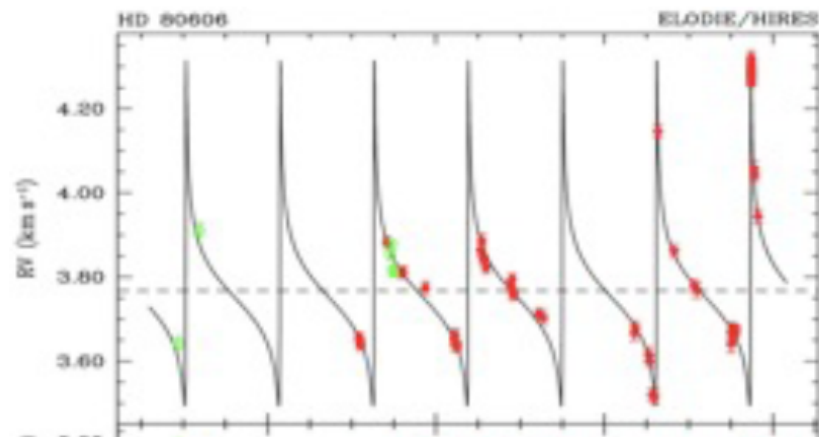
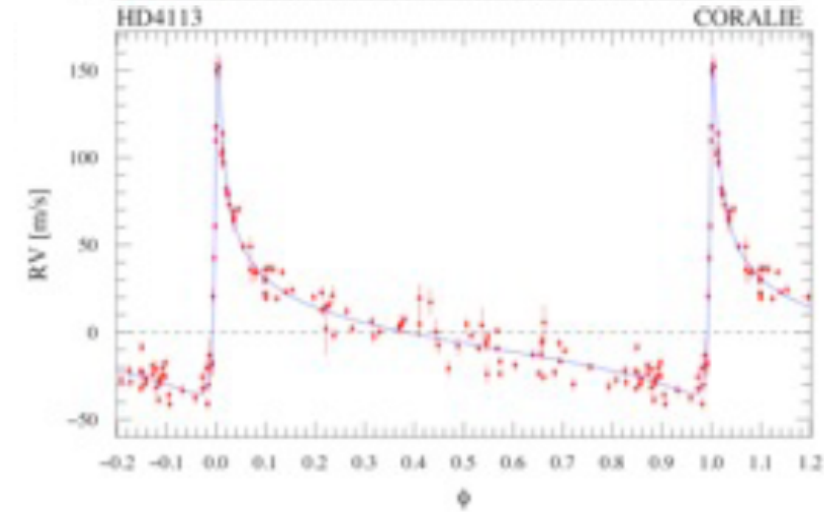
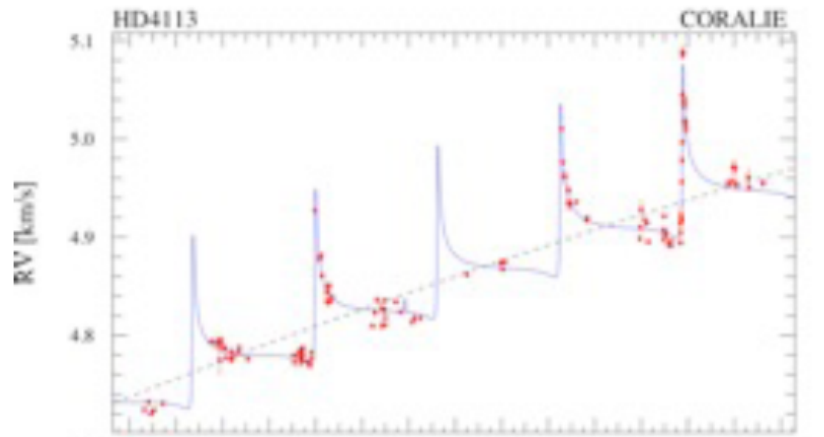
Popülasyon Sentezi: Gözlem-Teori Karşılaştırması - IV Metal Bolluğu Dağılımı



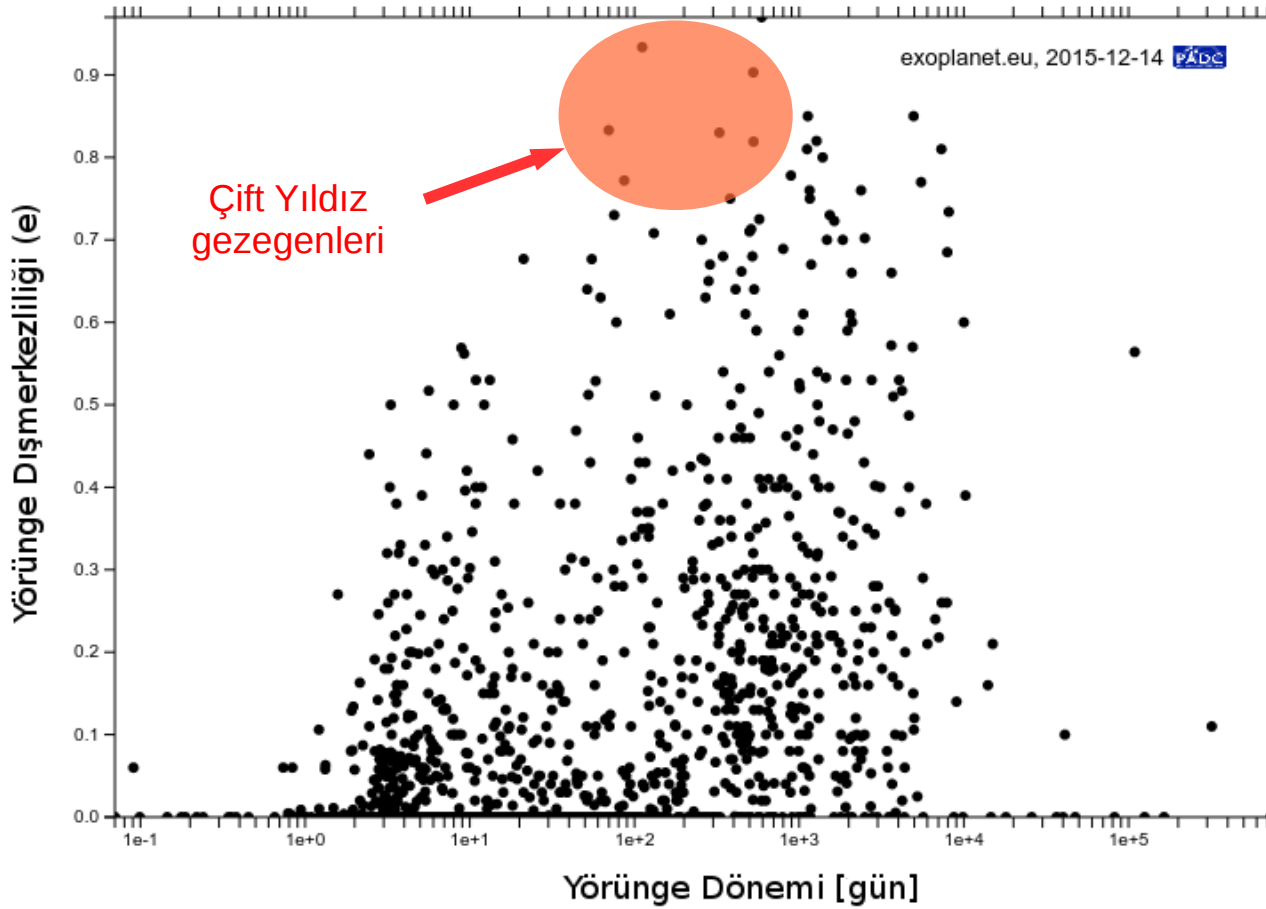
Alibert vd. (2013) tarafından üretilen modelle (solda), gözlemsel sonuçların karşılaştırması (sağda). Küçük kütleli gezegenler dışında uyumun oldukça iyi olduğu görülmektedir. Yine dikine hız gezegenleri ile ulaşılabilen kütle değerlerinin dikine hız hassasiyetine bağlılığı teori ile gözlemsel sonuçlar arasındaki görece küçük de olsa var olan uyumsuzluğu bu kütle aralığı için açıklayabilmektedir.

Yörünge Dış Merkezlilikleri (Eksantrisite)





HD 80606 b
 $e = 0.93$
 $p = 112d$,
 $m_2 \sin i = 4M_{Jup}$
 (Naef et al. 2001)

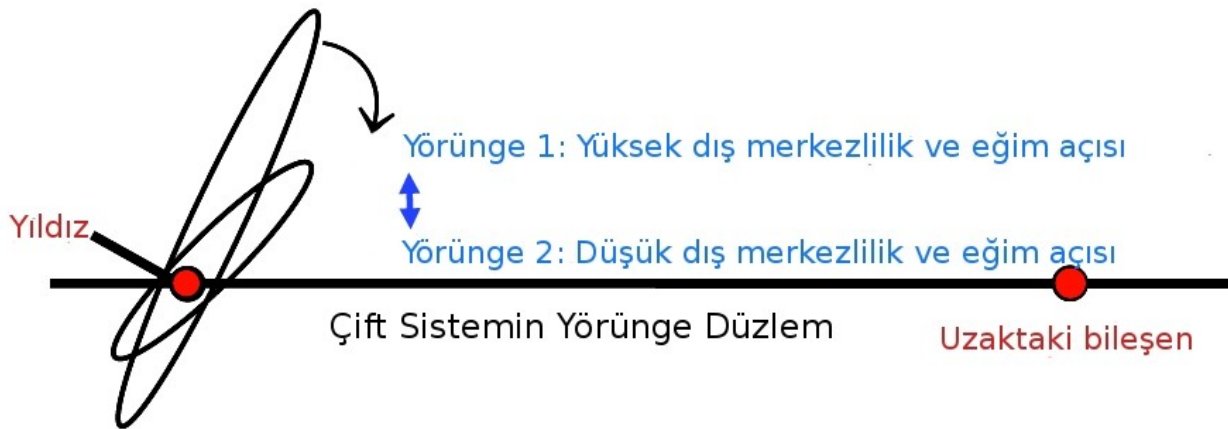


Ortalama eksantrisite $\langle e \rangle$: 0.28

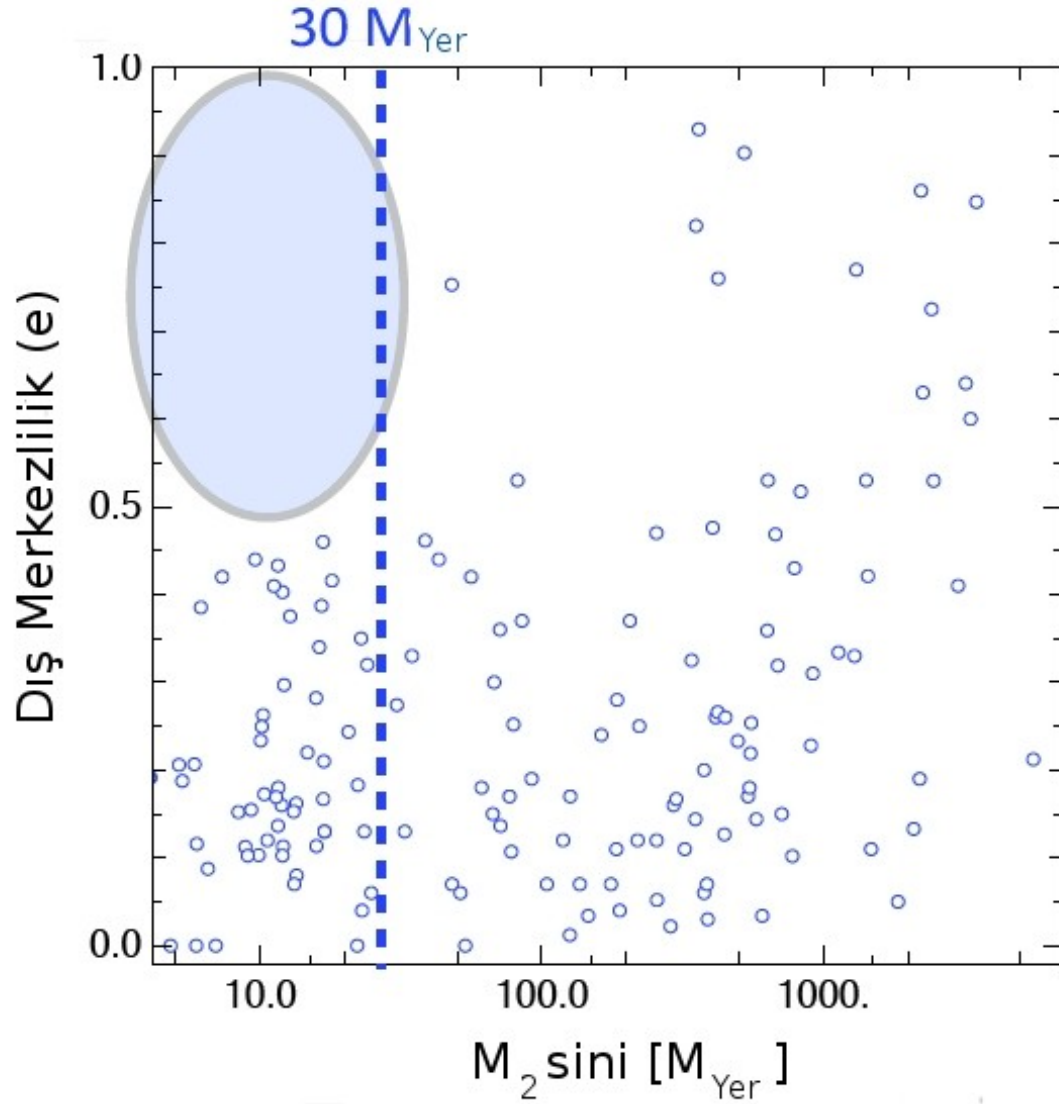
Olası Kaynakları:

- ✓ Gezegen-gezegen etkileşmeleri
- ✓ Gezegen-disk etkileşmeleri
- ✓ Çoklu gezegen göçü
- ✓ Yakın yıldız, kahverengi cüce ya da gezegen kütlelerinde bir bileşenin etkisi (Kozai mekanizması)
- ✓ Yıldız kümeleri içerisindeki dinamik etkileşmeler
- ✓ Diğer...

Kozai Mekanizması



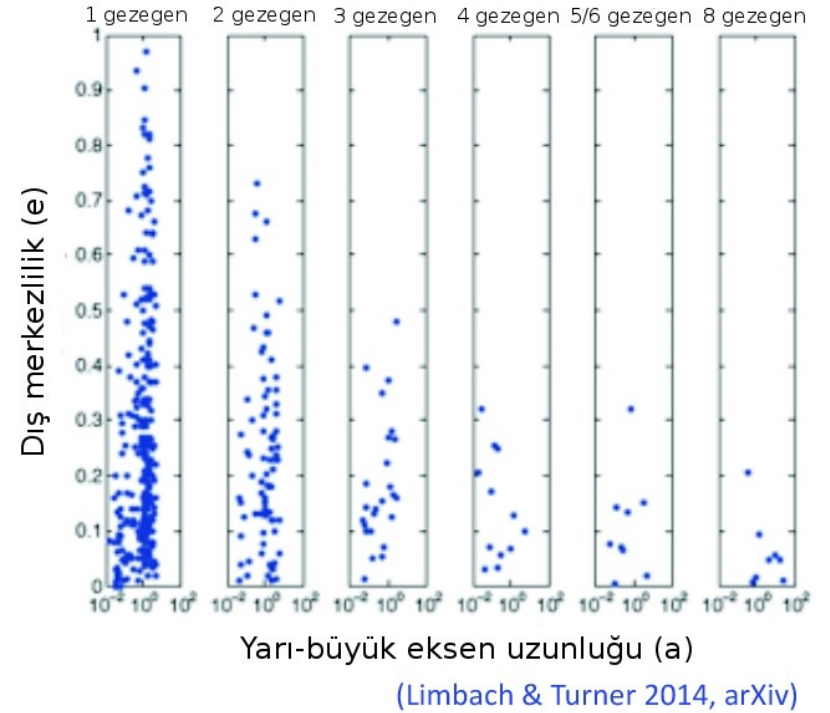
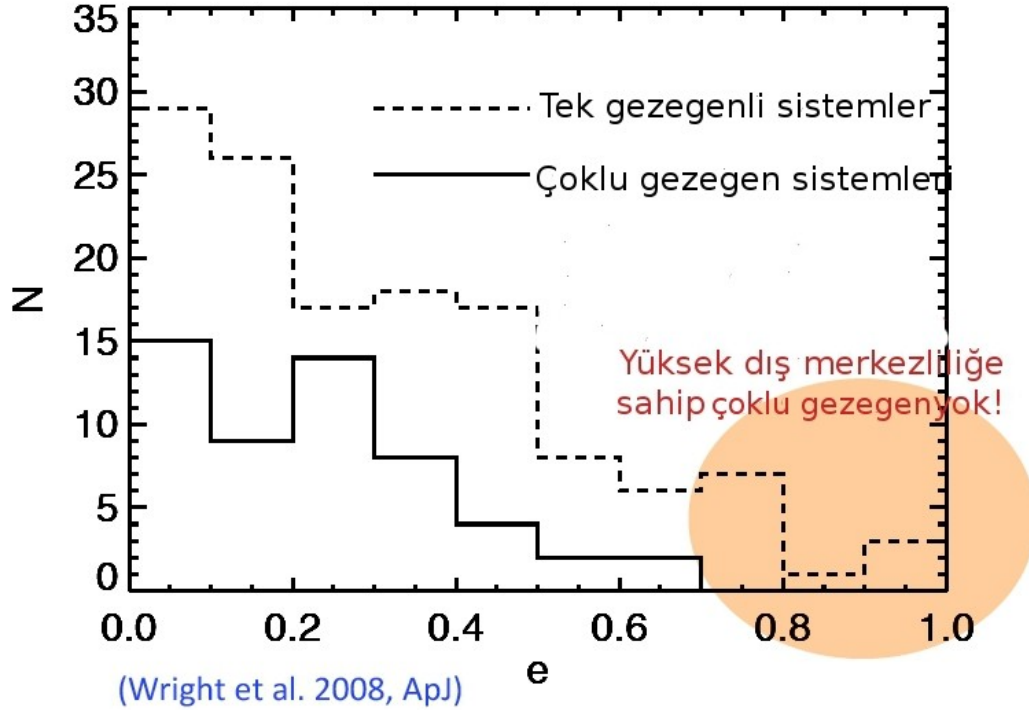
Eğer gezegenin yıldız etrafındaki yörüngesi diğer bileşenle yörüngesine göre büyük bir eğim açısına ($> 40^\circ$) sahipse açısal momentumun korunumu gereği gezegenin yörüngesi yüksek dış merkezlilik ve eğim açısıyla, düşük dış merkezlilik ve eğim açısı arasında salınır. Bu mekanizma **Kozai (-Lidov) mekanizması** olarak adlandırılır. Bu salınım gezegenin yörüngesinin giderek çembere yaklaşmasına ve küçülerek gezegenin yıldıza yaklaşmasına neden olur. Bu olguya **Kozai göçü** adı verilir.



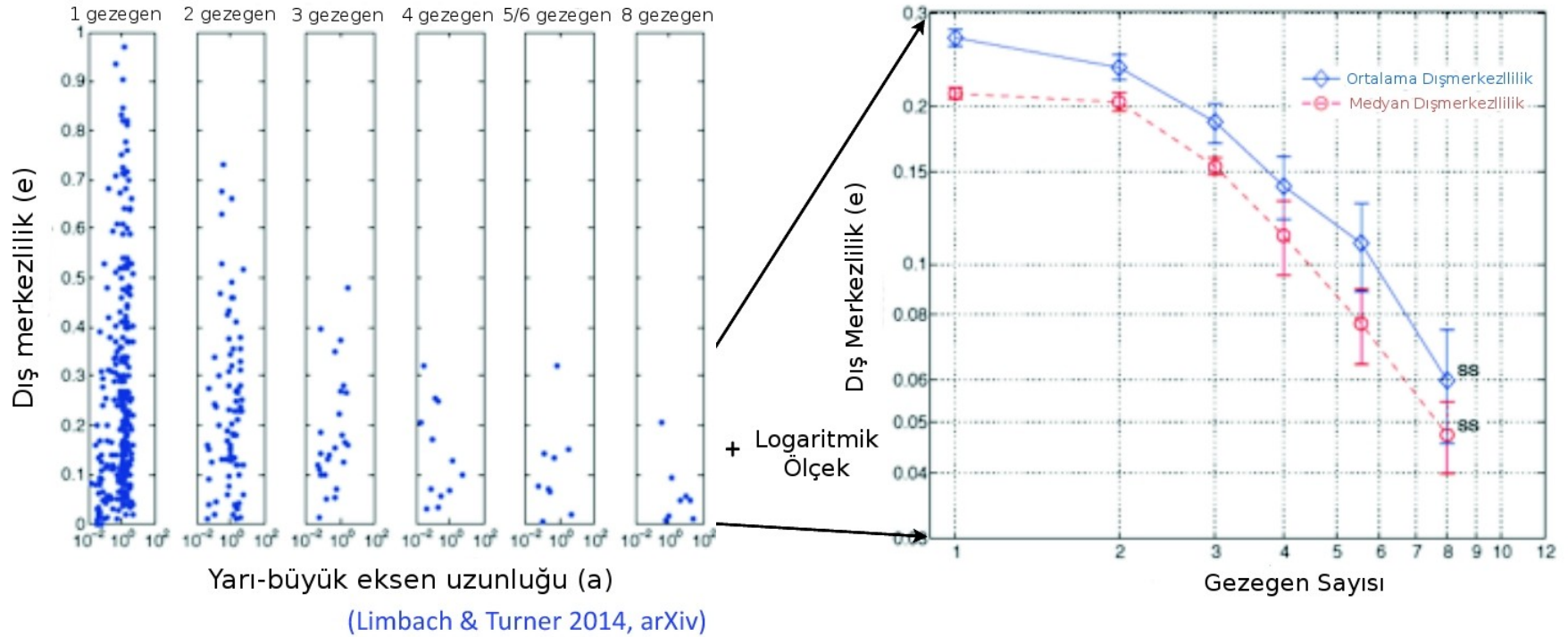
Sonuç: Küçük kütleli gezegenlerin dış merkezlilikleri de küçük!

- Acaba bu oluşumları mı ile ilgili?
- Yoksa bir şekilde yörüngeleri mi kararlı değil?

Bu sorulara küçük kütleli gezegenlerin daha çok çoklu gezegen sistemlerinde bulunduğunu da dikkate alarak cevap aramalıyız!



Solda dışmerkezliliğe (e) karşılık gezegen sayıları gösterilmektedir. Çoklu gezegenlerin bulunduğu sistemlerin düşük dış merkezliliğe doğru evrildikleri ve bu nedenle çoklu sistemlerdeki gezegenlerin yörüngelerinin daha çok çembersel olduğu açıkça görülmektedir. **Sağda** 1 gezegenli sistemlerde dış merkezliliğin çok geniş bir aralığa dağılırken, gezegen sayısı arttıkça dış merkezliliğin daha dar ve $e = 0$ civarında bir aralığa dağıldığı görülmektedir. Tek gezegenli sistemlerde dış merkezlilik yıldızdan uzaklığa bağlı olarak da artmaktadır.



Soldaki şeklin her bir dilimindeki gezegenlerin yörünge dış merkezliliklerinin ortalama ve medyanları (logaritmaları) alınarak dilimdeki gezegen sayılarına karşı çizildiğinde **sağdaki** şekil edilmiştir.

Sonuç : Çoklu sistemlere gidildikçe yörünge dışmerkezliliğinin azaldığı açıktır!

Bu sonuç iki nedenden kaynaklanıyor olabilir:

1. Çoklu sistemlerin kompakt yapıları nedeniyle gezegenlerin fazlaca gidebileceği yerleri yoktur. Yörüngelerin dışmerkezlilikleri yoğun gezegen-gezegen etkileşimleri sonucu azalır.
2. Çoklu sistemlerde daha çok küçük kütleli gezegenler oluşur. Bu gezegenlerin oluştukları disk gezegenlerin tümünü çembersel yörüngelere zorlar.

Kaynaklar

- ✓ Alibert, Y., vd., 2013, *"Theoretical models of planetary system formation: mass vs. semi-major axis"*, Astronomy & Astrophysics, 558, 109
- ✓ Benz, W.; Ida, S.; Alibert, Y.; Lin, D.; Mordasini, C., 2014, *"Planet Population Synthesis"*, Protostars and Planets VI
- ✓ Fressin, F., vd., 2013, *"The False Positive Rate of Kepler and the Occurrence of Planets"*, The Astrophysical Journal, 766, 81
- ✓ Gonzalez, G., 1997, *"The stellar metallicity-giant planet connection"*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 285, 403
- ✓ Howard, A.W., 2007, *"Observed Properties of Extrasolar Planets"*, Science, 340, 572
- ✓ Kozai, Y., 1962, *"Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity"*, The Astronomical Journal, 67, 591
- ✓ Lagrange, A.M., vd., 2010, *"A Giant Planet Imaged in the Disk of the Young Star β Pictoris"*, Science, 329, 57
- ✓ Lidov, M., 1962, *"The evolution of orbits of artificial satellites of planets under the action of gravitational perturbations of external bodies"*, Planetary and Space Science, 9, 719
- ✓ Limbach, Mary Anne; Turner, Edwin L., 2015, *"Exoplanet orbital eccentricity: Multiplicity relation and the Solar System"*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 112, 20
- ✓ Lovis, C.; Mayor, M., 2007, *"Planets around evolved intermediate-mass stars. I. Two substellar companions in the open clusters NGC 2423 and NGC 4349"*, Astronomy and Astrophysics, 472, 657
- ✓ Mardling, R., <http://users.monash.edu.au/~ro/>
- ✓ Marois, C. vd., 2006, *"Angular Differential Imaging: A Powerful High-Contrast Imaging Technique"*, The Astrophysical Journal, 641, 556

Kaynaklar

- ✓ Mayor, M., vd., 2011, *"The HARPS search for southern extra-solar planets XXXIV. Occurrence, mass distribution and orbital properties of super-Earths and Neptune-mass planets"*, arXiv:1109.2497
- ✓ Mordasini, C.; Alibert, Y.; Klahr, H.; Benz, W., 2011, *"Theory of planet formation and comparison with observation"*, Detection and Dynamics of Transiting Exoplanets
- ✓ Naef, D., vd., 2001, *"HD 80606 b, a planet on an extremely elongated orbit"*, Astronomy and Astrophysics, 375, .L27
- ✓ Pepe, F., vd., 2013, *"An Earth-sized planet with an Earth-like density"*, Nature, 503, 377
- ✓ Petigura, Erik A.; Marcy, Geoffrey W.; Howard, Andrew W., 2013, *"A Plateau in the Planet Population below Twice the Size of Earth"*, The Astrophysical Journal, 770, 69
- ✓ Rajpaul, V.; Aigrain, S.; Roberts, S., 2016, *"Ghost in the time series: no planet for Alpha Cen B"*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 456, .L6
- ✓ Wright, J.,T., 2008, *"Multiple-Planet Systems and a Jupiter Analog"*, Extreme Solar Systems, ASP Conference Series, Vol. 398