

AST418

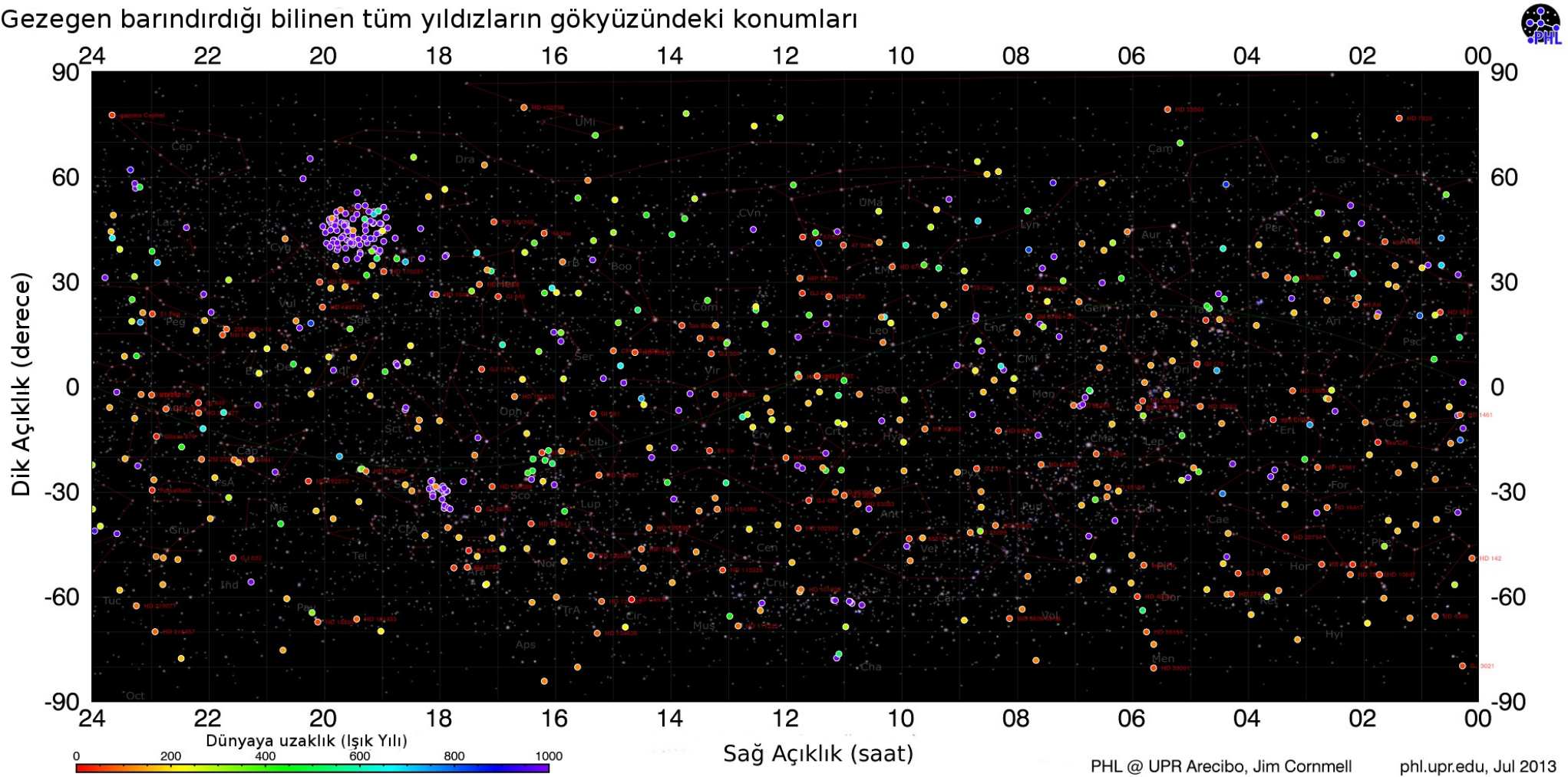
Gezegen Sistemleri ve Oluřumu

Ders 8 : Ötegezegen Araştırmalarında Ulaşılan Sonuçlar

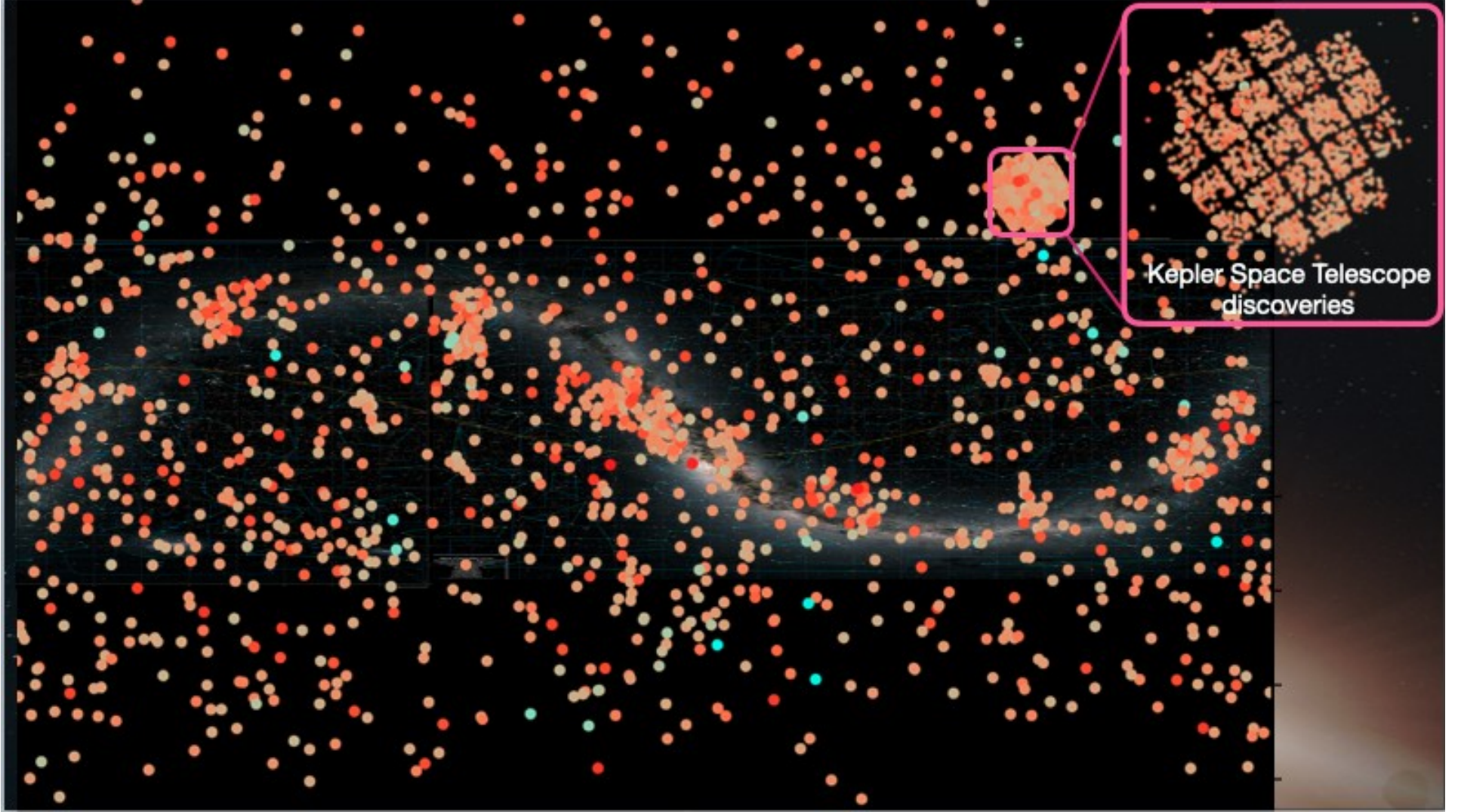


Ötegezegenlerin Gökyüzündeki ve Galaksideki Konumları

Gezegen barındırdığı bilinen tüm yıldızların gökyüzündeki konumları



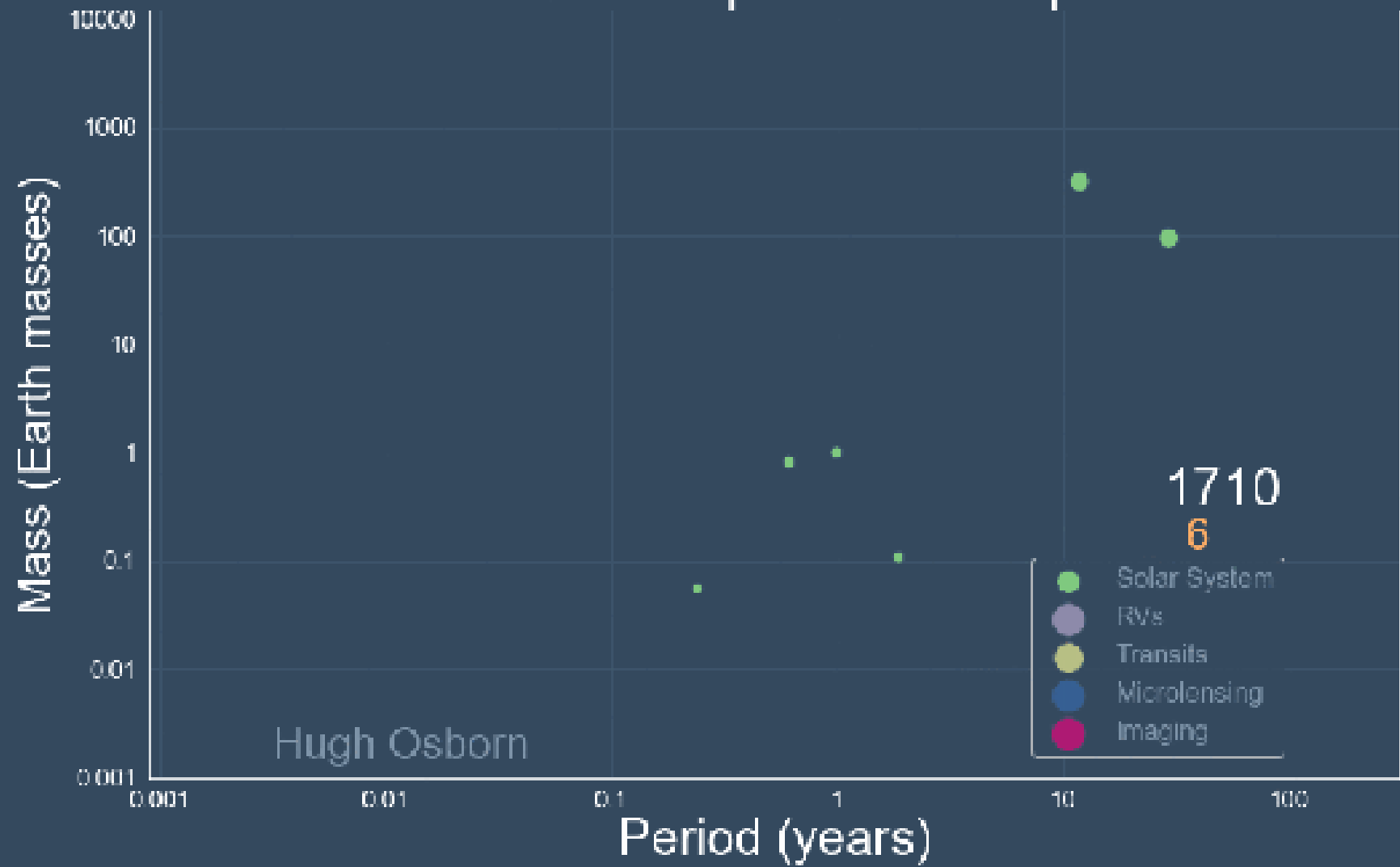
Görüldüğü üzere gezegenli yıldızlar neredeyse her yerdedir. Çok sayıda gezegen keşfi yapan Kepler uzay teleskobunun baktığı bölge çıkarıldığında ($\sim 19-20^{\text{sa}} - 45^\circ$) gökyüzüne dağılımları da tekdüze (homojen) olmaya çok yakındır. Burada önemli bir nokta olarak kütleçimsel mercek dışında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

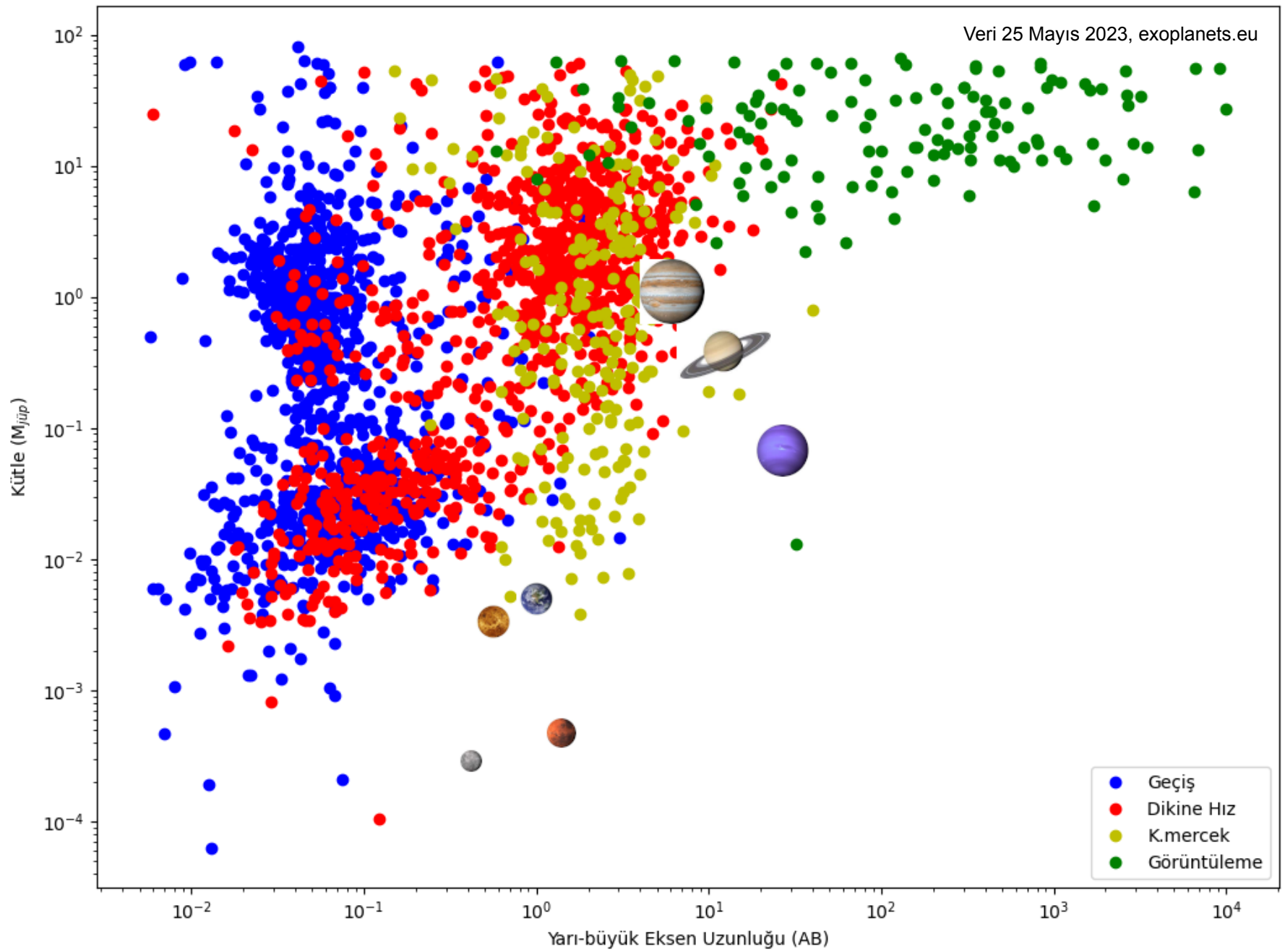


Credit: Hannah Wakeford

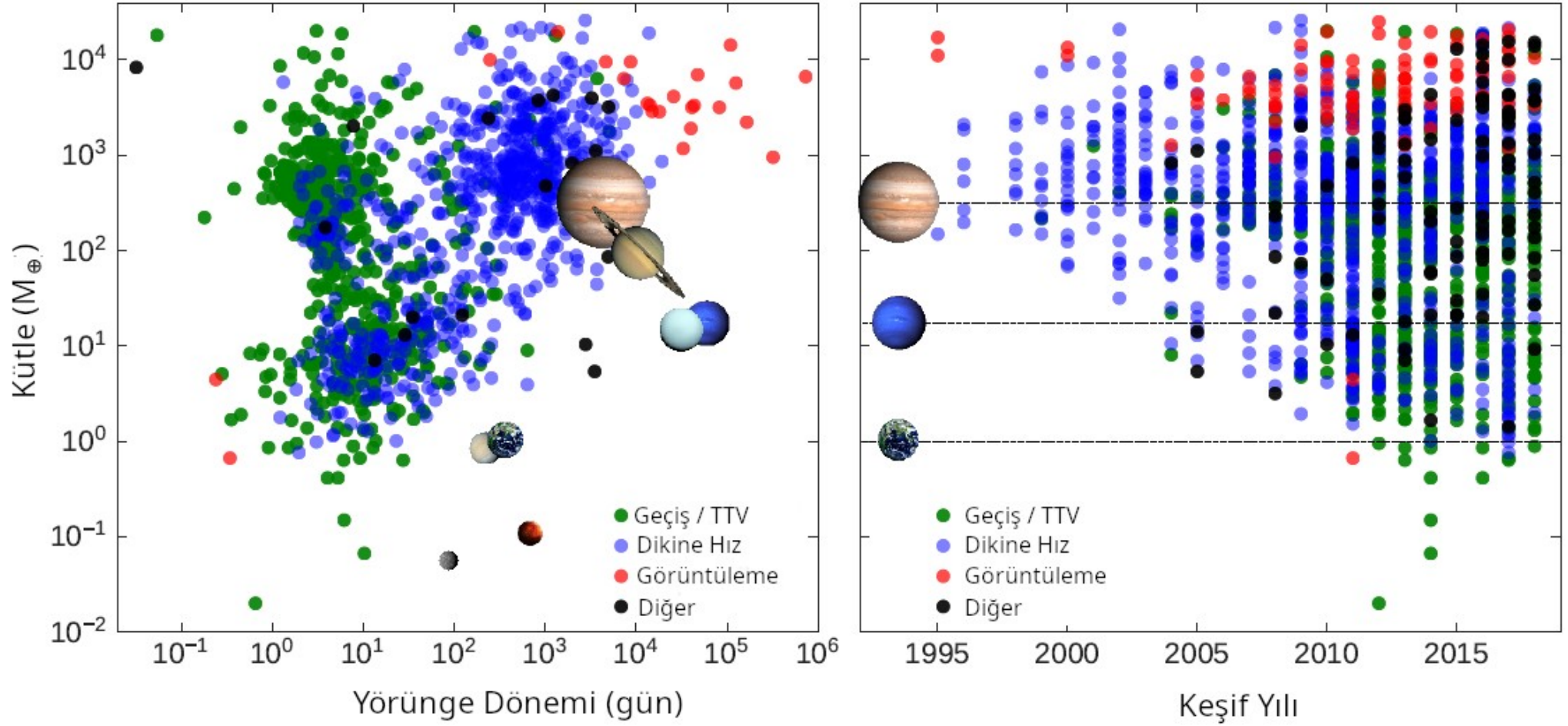
Kepler'in baktığı alan ve galaktik diskteki yıldız sayısının fazlalığının neden olduğu yanlışlıklar dikkate alınmazsa gezegenli yıldızların gökyüzünün her bölgesine neredeyse tekdüze bir şekilde dağıldığı görülmektedir. **Sonuç 1:** Gezegenler galaksinin her yerinde farklı sayı ve yoğunlukta olsa da var!

The detection of planets & exoplanets



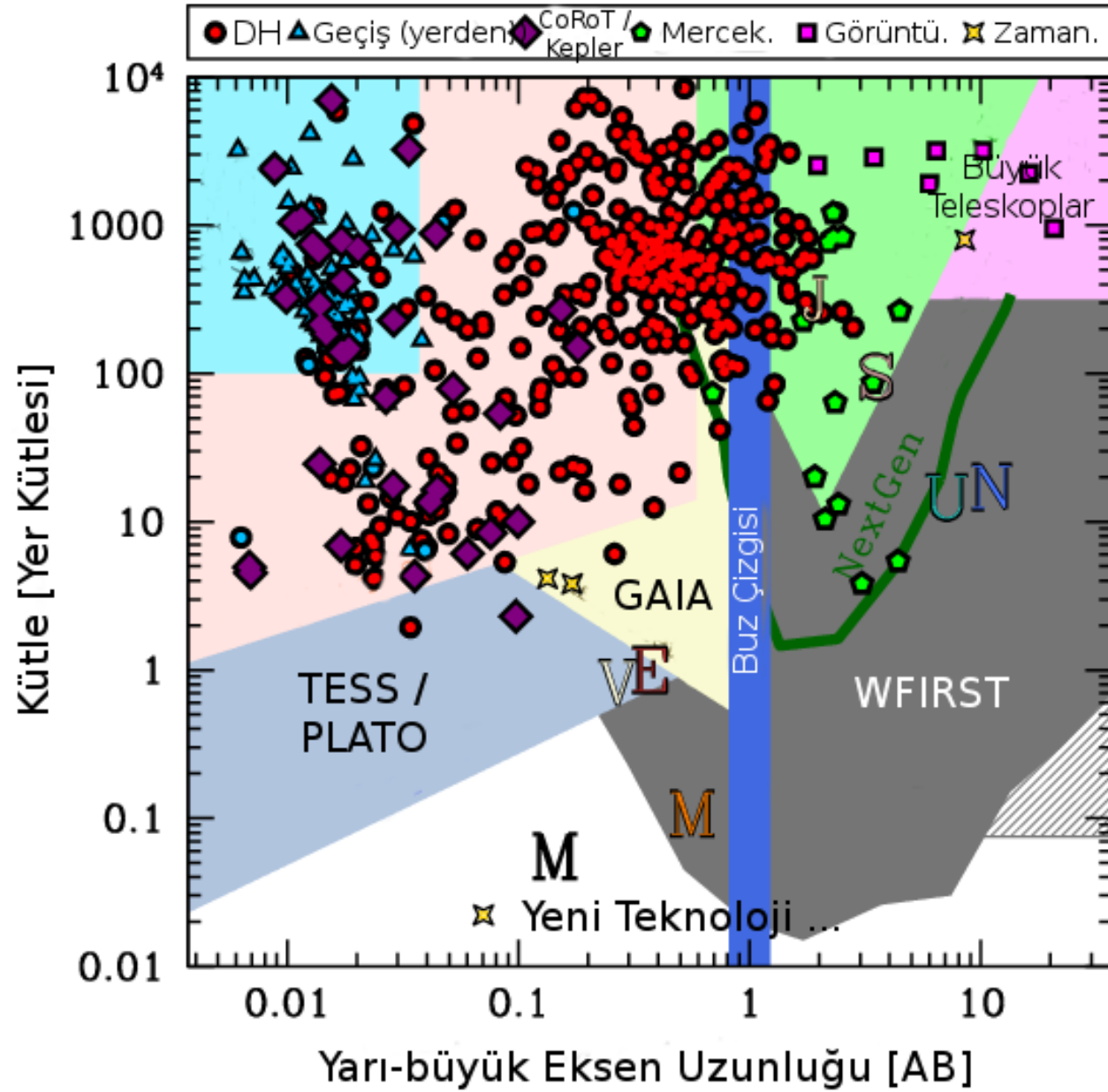


Dikine hız ve geçiş yöntemleri gözlemsel yanlışlıkları nedeniyle yıldızına yakın gezegenleri bulmaya daha elverişli iken, merceklenme orta uzaklıkta, geniş bir kütle aralığına dağılmış, görüntüleme ise daha uzakta ve büyük gezegenleri bulmaya daha elverişli gözlemsel yanlışlıklara sahiptir. Sonuç olarak tüm bu teknikler parametre uzayında daha homojen dağılmış bir örnek uzayına sahip olmamıza katkıda bulunmaktadır.



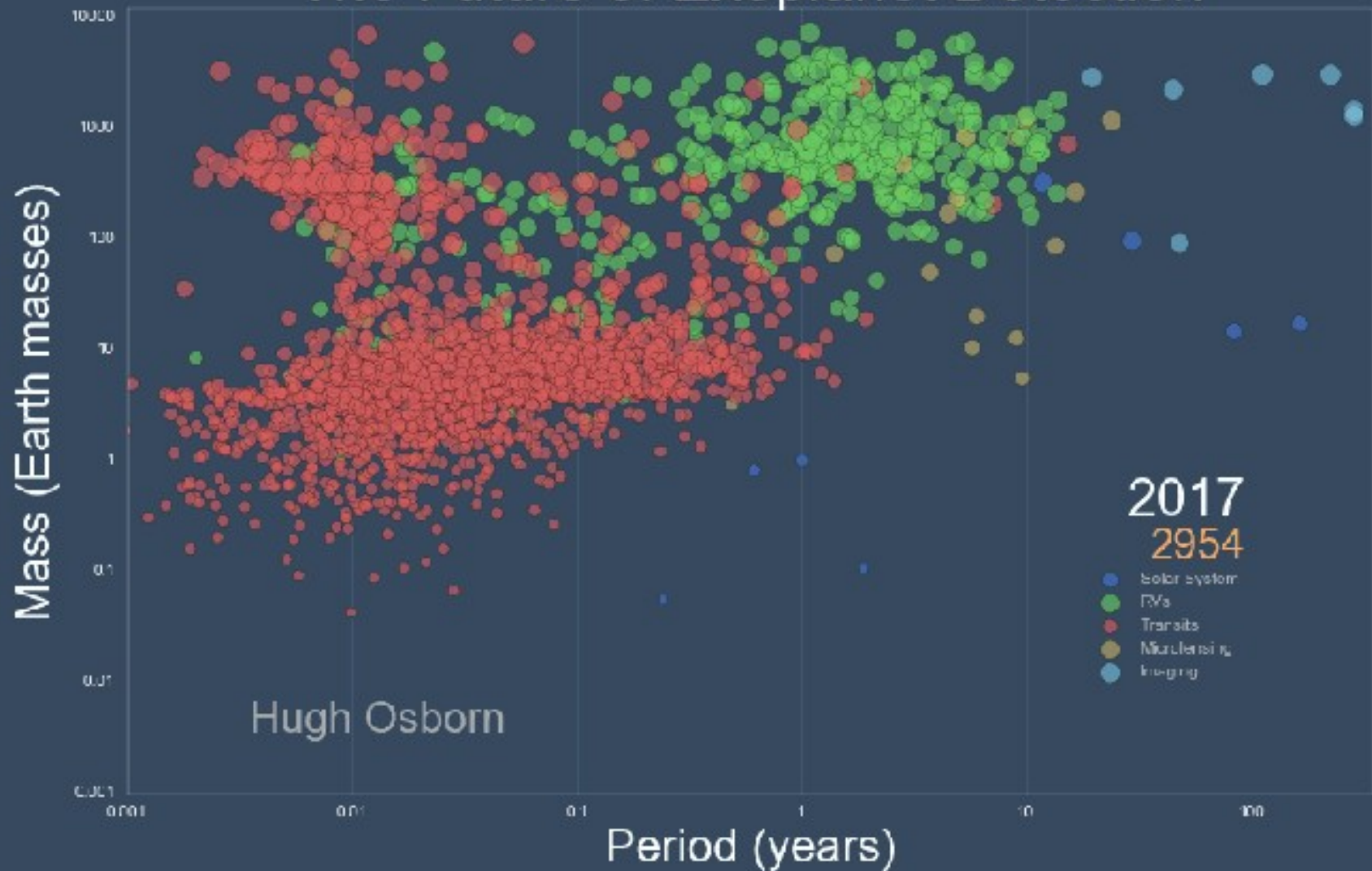
Farklı keşif teknikleri farklı parametre uzaylarını ve gezegen türlerini çalışmamızı sağladığı gibi zamanla teknolojinin gelişimine paralel olarak kullandığımız araç ve tekniklerdeki gelişmelerle giderek daha küçük gezegenleri de keşfediyoruz.

Sonuç 2: Her yerde gezegen var ama biz mevcut teknik ve teknolojiğimizle bunların bir kısmını bulabiliyoruz. Geliştikçe daha iyi bir örnekleme ve anlayışa sahip olacağız.

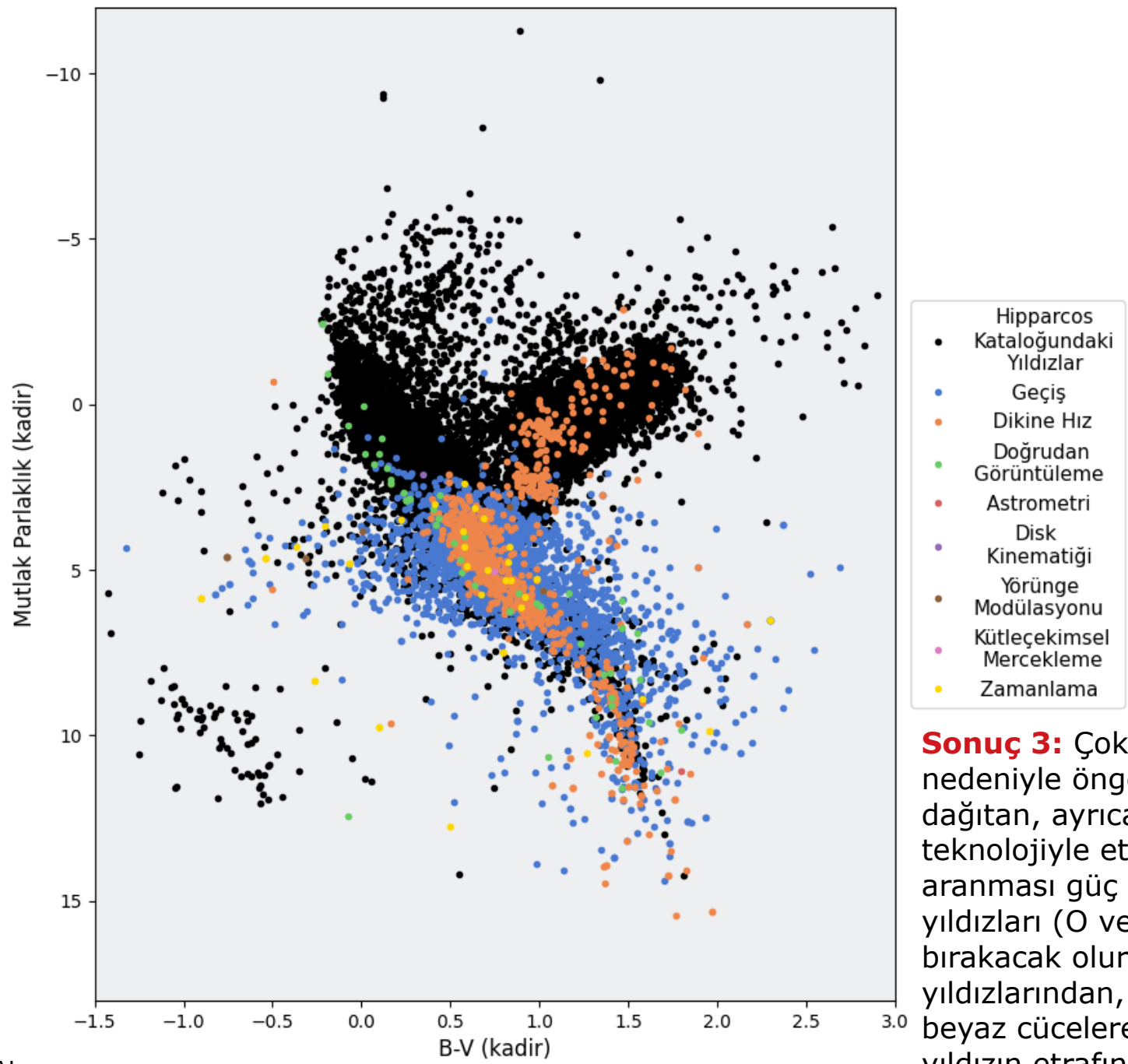


Çalışmakta olan ve yakın bir gelecekte çalışacak (PLATO 2026, WFIRST (Nancy Grace Roman Telescope, 2027) ile Gaia verilerinin yayınlanması (DR4, 2026) ile birlikte çok geniş bir parametre uzayı taranmış olacaktır.

The Future of Exoplanet Detection



Ötegezegenlerin Barınak Yıldızlarının Keşif Yöntemlerine Göre HR Diyagramındaki Konumu

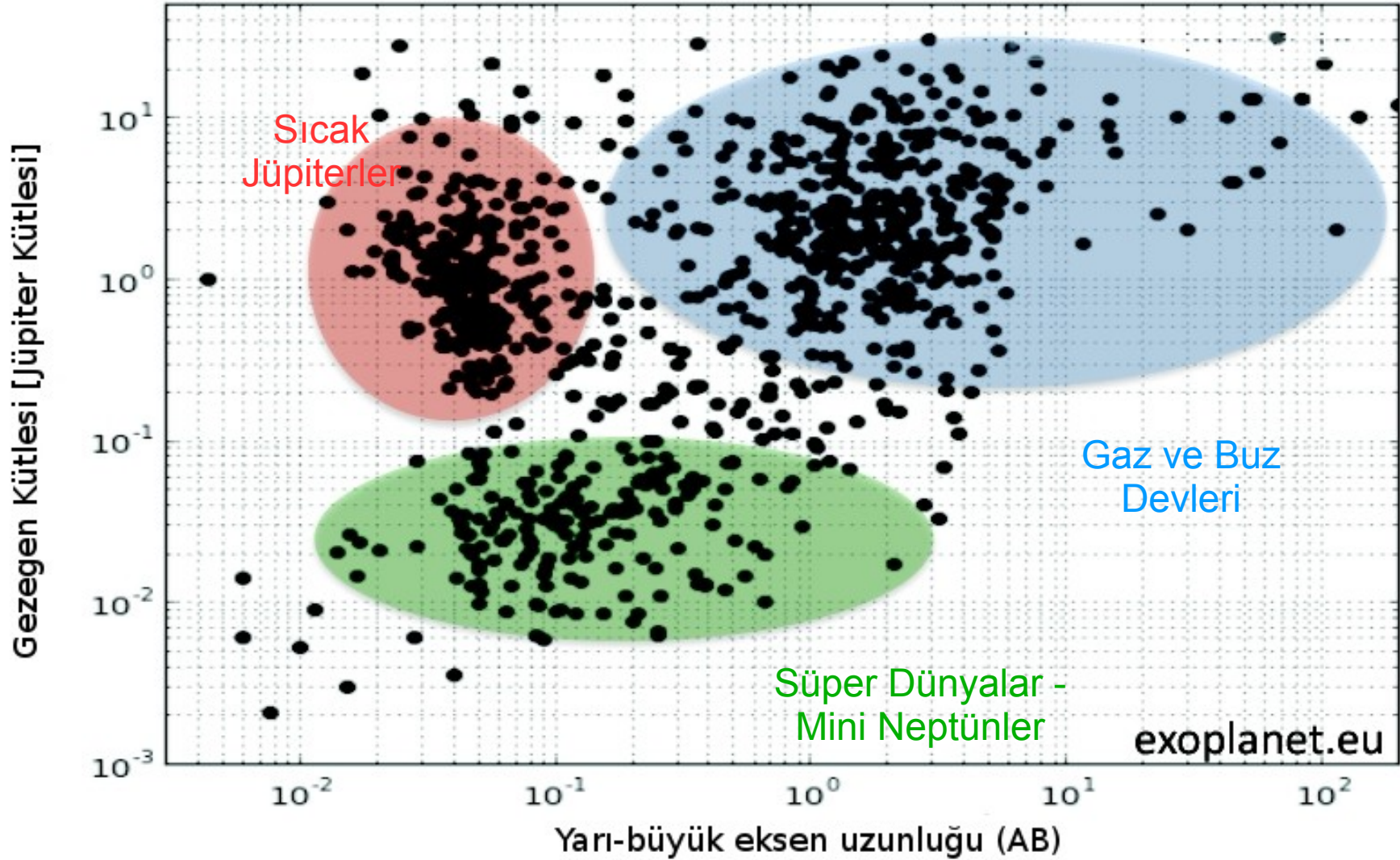


Sonuç 3: Çok yüksek ısıtım basınçları nedeniyle öngezegen disklerini erken dağıtan, ayrıca da mevcut yöntem ve teknolojiyle etraflarında gezegen aranması güç en sıcak ve büyük yıldızları (O ve erken B) bir kenara bırakacak olursak, anakol yıldızlarından, alt-dev, dev, alt cüce ve beyaz cücelere varıncaya değin her tür yıldızın etrafında gezegen var!

Ötegezegen Türleri

- ✓ **Dünya Benzeri (ing. Earth-like, Earth analog):** Yaklaşık Dünya kütlesinde ($0.8 M_{\text{yer}} < M_{\text{gez.}} < 1.2 M_{\text{yer}}$) karasal gezegenlerdir.
- ✓ **Dünya İkizi (ing. Earth Twin):** Dünya'yla aynı özelliklere (kütle, yarıçap, yıldızından uzaklık, atmosfer) sahip, henüz hiç örneği bulunmayan 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 ($0.015\text{-}0.5 \text{ AB}$) 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 kalın atmosferlerinde uçucuların konuma göre gaz ve buz formunda bulunduğu gezegenlerdir.
- ✓ **Süper Dünya (ing. Super Earth):** $2 - 5 M_{\text{yer}}$ kütleli karasal, buz ya da tamamen suyla kaplı yüzeylere sahip gezegenlerdir (örn. PSR B1257+12 b, Gliese 876 d).
- ✓ **Kahverengi cüce altı cisimler (ing. Sub-brown Dwarfs):** Herhangi bir yıldızın etrafında dolanmayan ancak gezegen kütle limitleri dahilindeki cisimlerdir. Bu cisimlere serbest dolaşan ya da "başıboş gezegenler" de denmektedir (Free Floating, Nomad, Rogue, Interstellar, Starless, Orphan Planets).

Gezegen Çeşitliliği

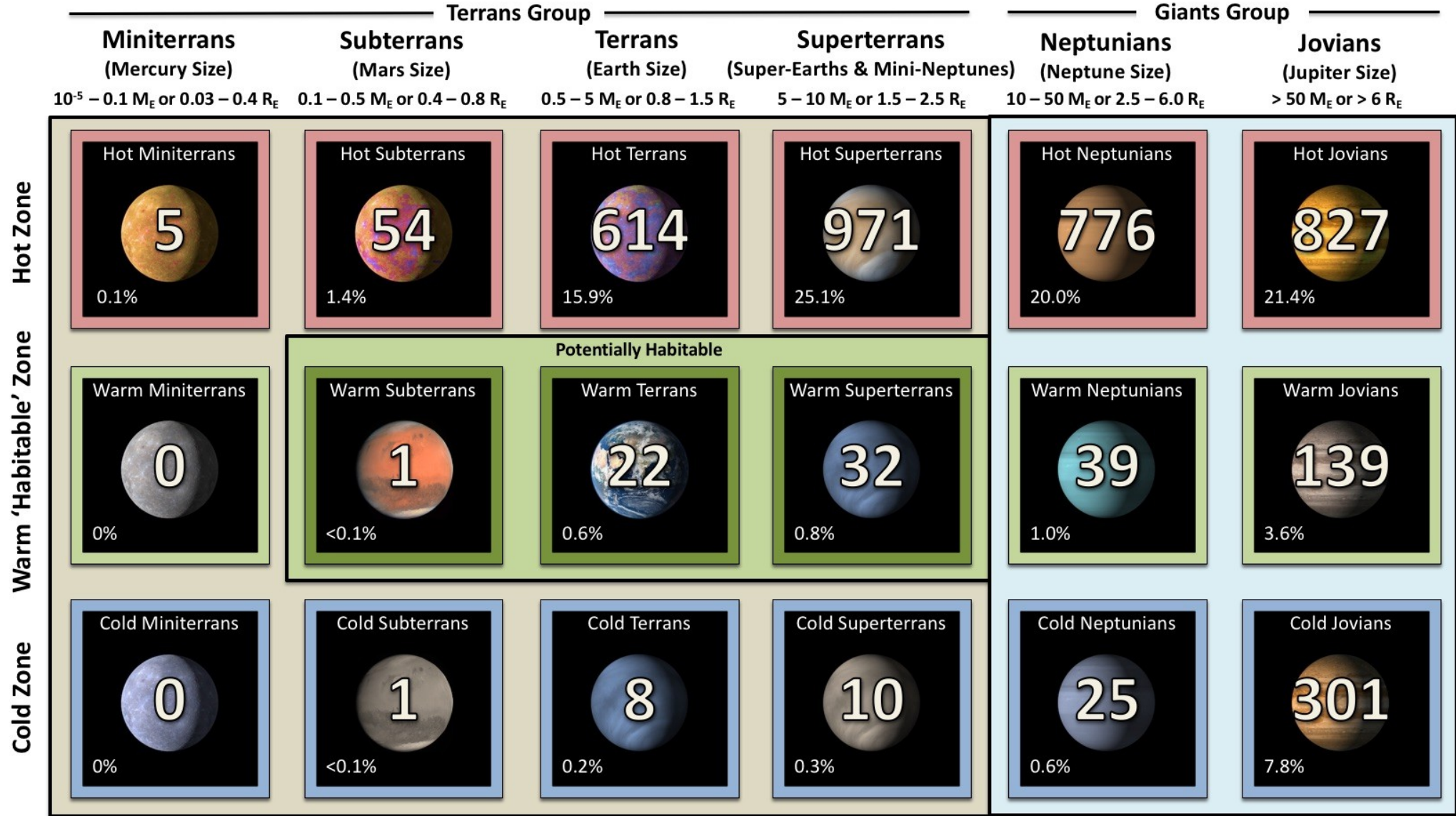
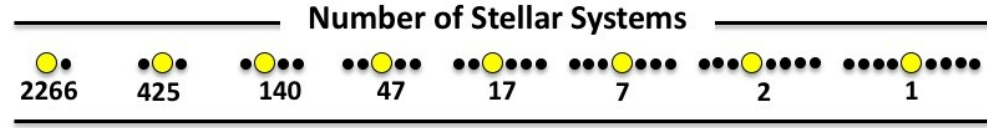


En belirgin olarak ayrıışan üç ötegezegen türünün yarı-büyük eksen uzunluğu / kütle grafiği. Bunlara ek olarak küçük karasal gezegenler de belirgin bir gruptur ancak bu grafiğin üretildiği tarihte keşfedilenlerin sayısının azlığı nedeniyle yer almamıştır.



The Periodic Table of Exoplanets

Over 3800 Exoplanets

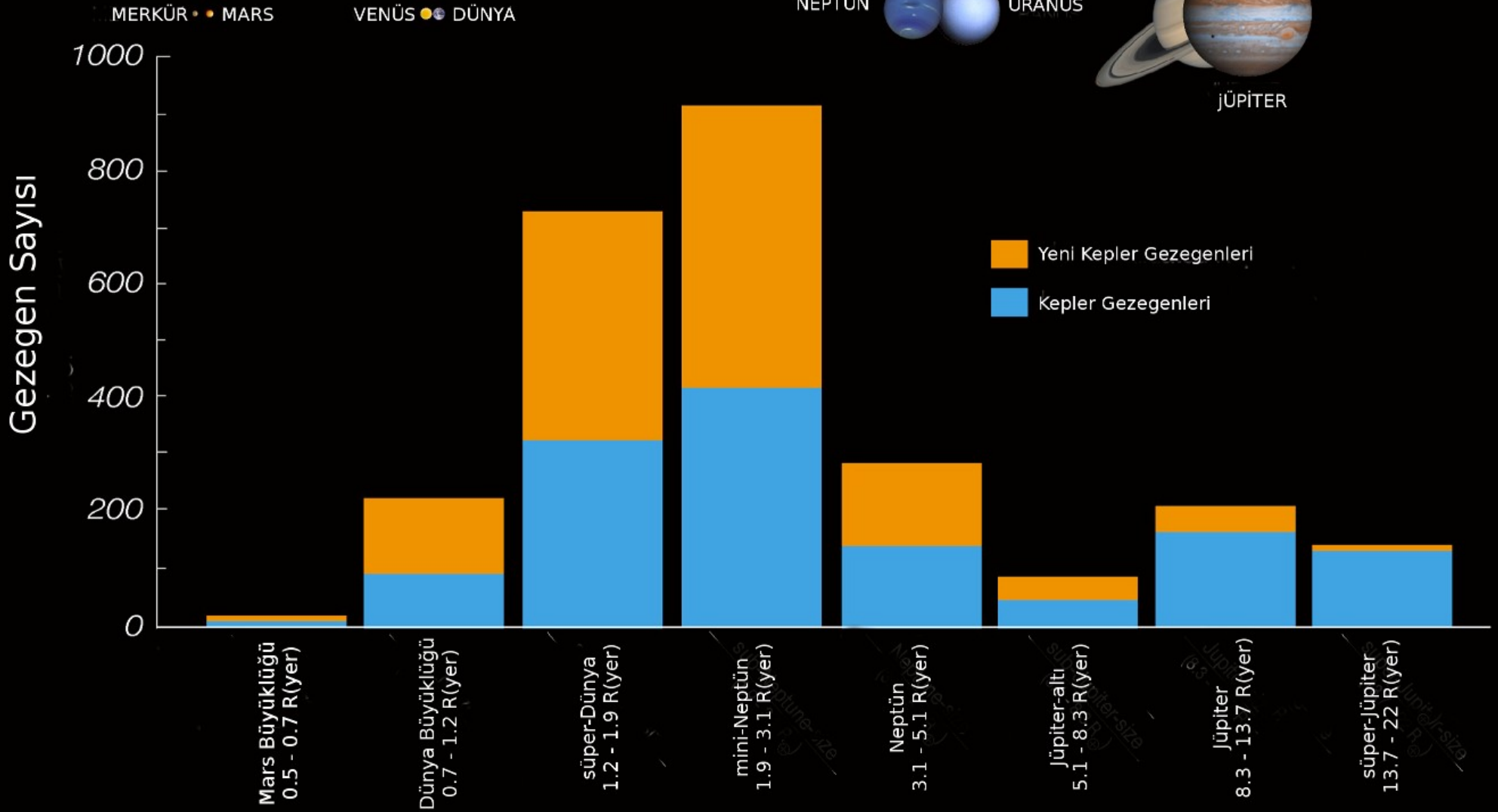


M_E = Earth Mass, R_E = Earth Radius

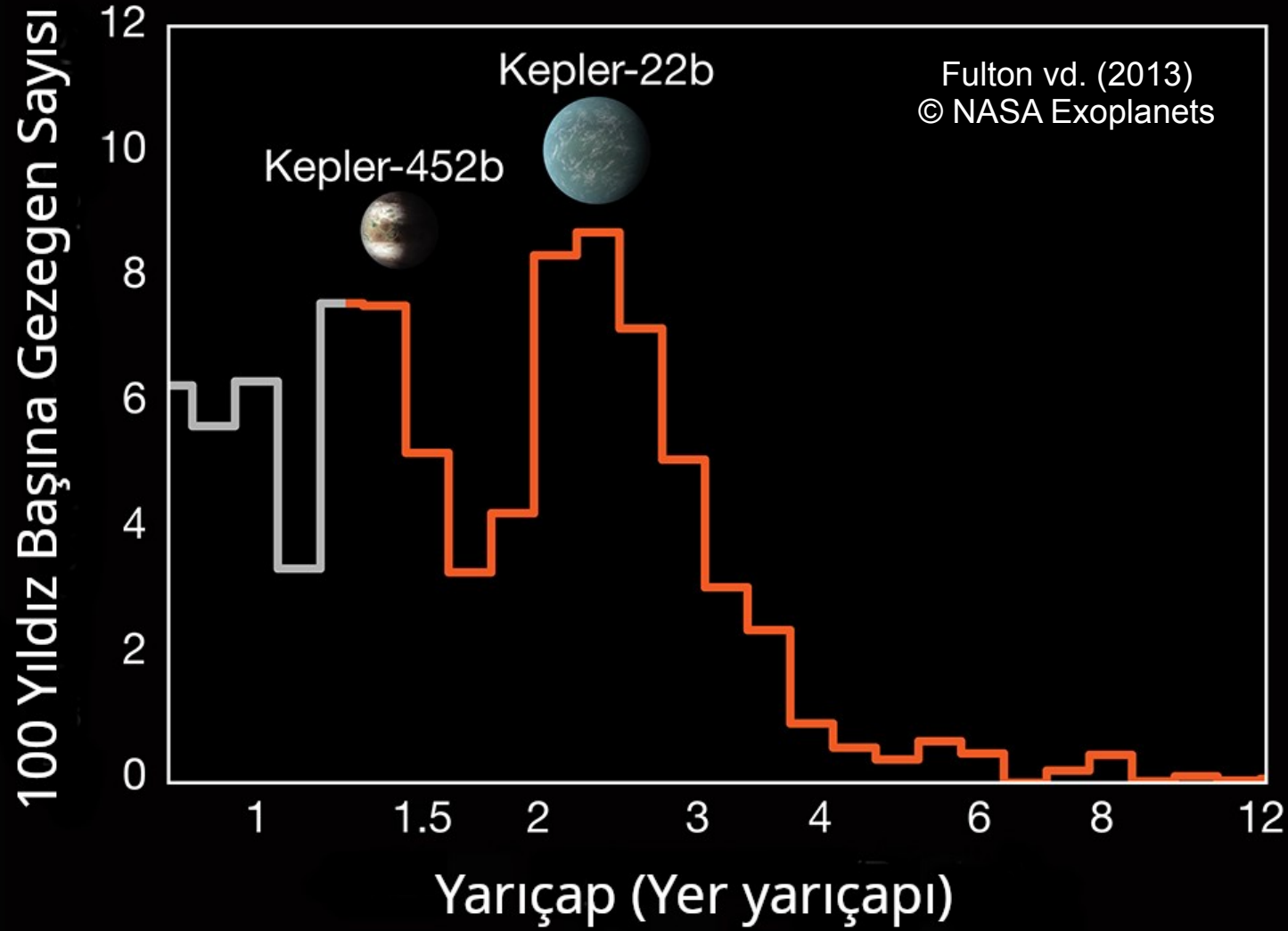
CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Jul 2018

Sonuç 4: Yöntemlerimizin yanlılıkları nedeniyle bazı gezegen türlerini daha kolay ve bu nedenle çok buluyoruz ama gezegen çeşitliliği Güneş Sistemi'ndekinin ötesinde!

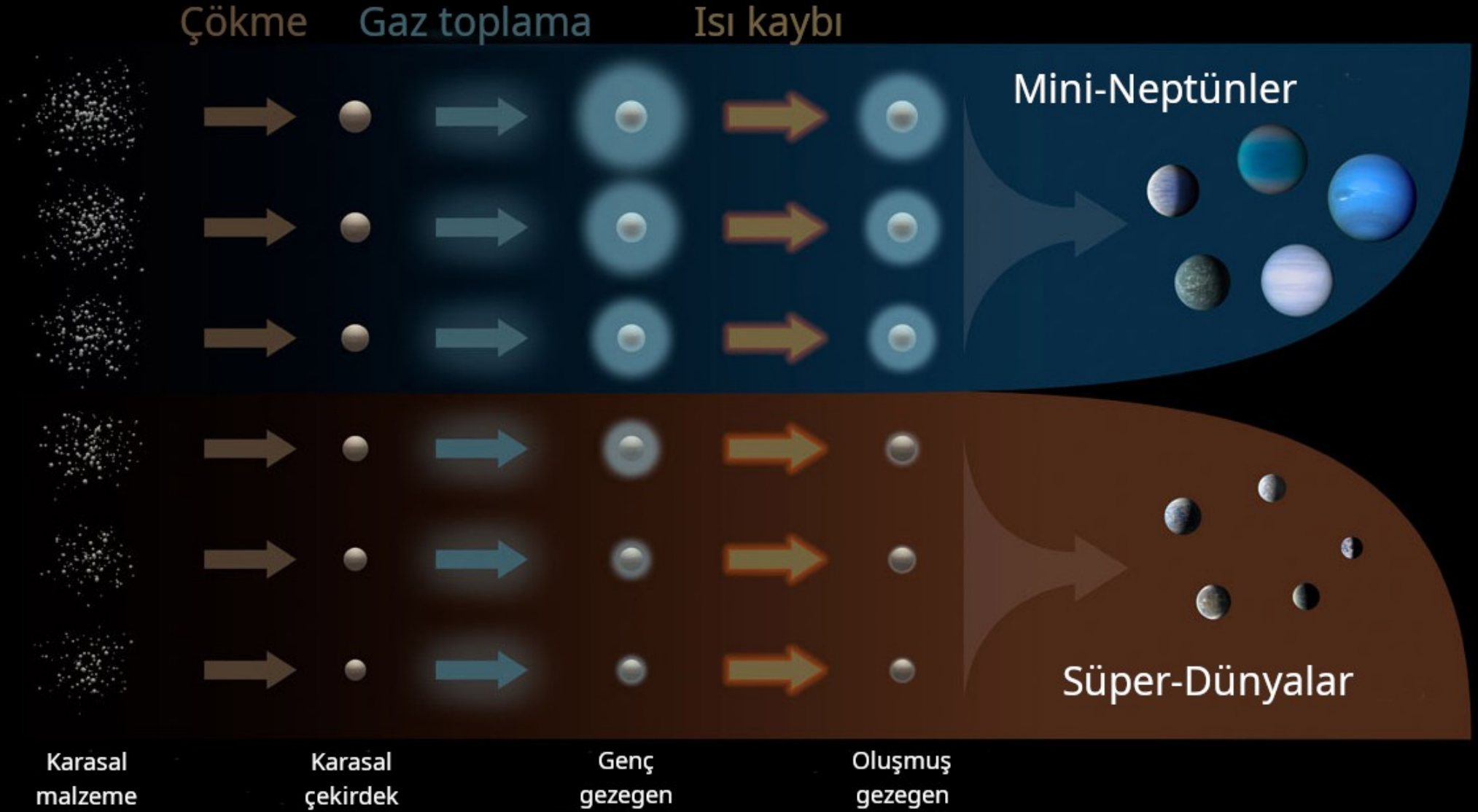
GÜNEŞ SİSTEMİ GEZEGENLERİNİN BÜYÜKLÜKLERİ



Işık ölçüm duyarlılığı yüksek ve gözlemlerin kapladığı zaman aralığı uzun olduğu için, yanlışlıklardan arındırılmamış da olsa, Kepler'le keşfedilen gezegenlerin en önemli kısmının süper-Dünya ve mini-Neptünler'den oluştuğunu göstermektedir.



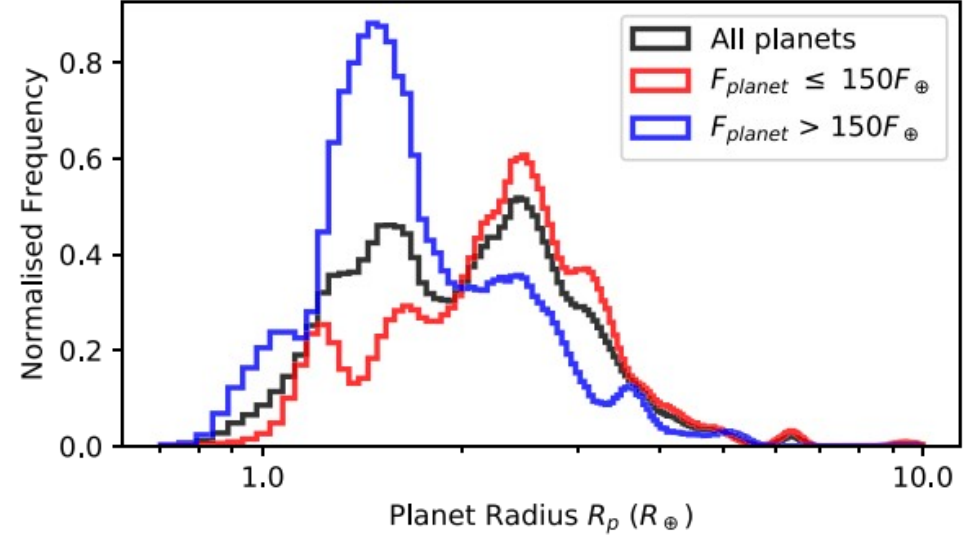
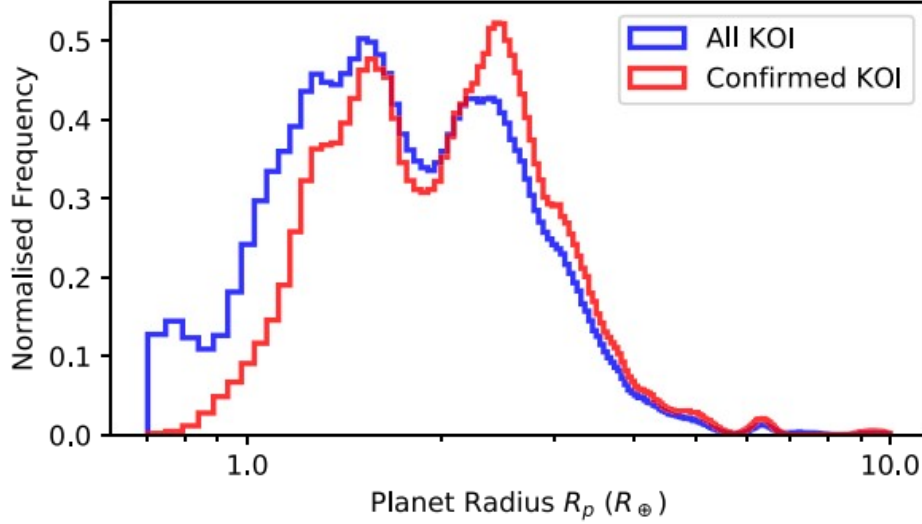
Kepler araştırmasının ulaştığı en önemli sonuçlardan biri görece küçük denebilecek gezegenlerin iki gruba ayrılması ve bu iki grup arasında “**yarıçap vadisi**” (ing. **radius valley**) adı verilen ve az sayıda gezegenin bulunduğu bir boşluğun bulunmasıdır (Fulton vd. 2013). Merkezi 1.8, aralığı 1.5-2 R_{yer} yarıçap aralığına denk gelen bu yarıçap vadisinin sol tarafında **süper-Dünyalar**, sağ tarafında ise **mini-Neptün**’ler bulunur. Bu parametre uzayında az sayıda gezegen bulunmasının sebebinin **mini-Neptün** atmosferlerinin yıldızlarının enerjik ışınımı tarafından buharlaştırılmasını (ing. photoevaporation) engelleyip onları tutabilecek kadar büyük çekirdeklere sahip olmaları, **süper-Dünyaların** ise bu kadar büyük çekirdekleri olmadığı için atmosferlerini kaybetmiş olmaları olabilir.



Alternatif bir açıklama da mini-Neptün'lerin gençken çekirdek yarıçaplarının en az 2 katı kalınlıkta bir atmosfer oluşturacak kadar fazla gaz toplamış olmaları ve sıcaklıkla (içten ısınma) bunun ancak bir bölümünü kaybetmişken bir kısmını da koruyabilmiş olmaları olabilir (Owen & Wu 2017). süper-Dünyalar'ın ise başlangıçta bu kadar kalın bir atmosferleri olmadığından barınak yıldızın ısıtmasıyla zaten ince olan atmosferlerinin tamamını kaybetmiş olmalıdır.

Yarıçap Vadisi (Fulton Vadisi)

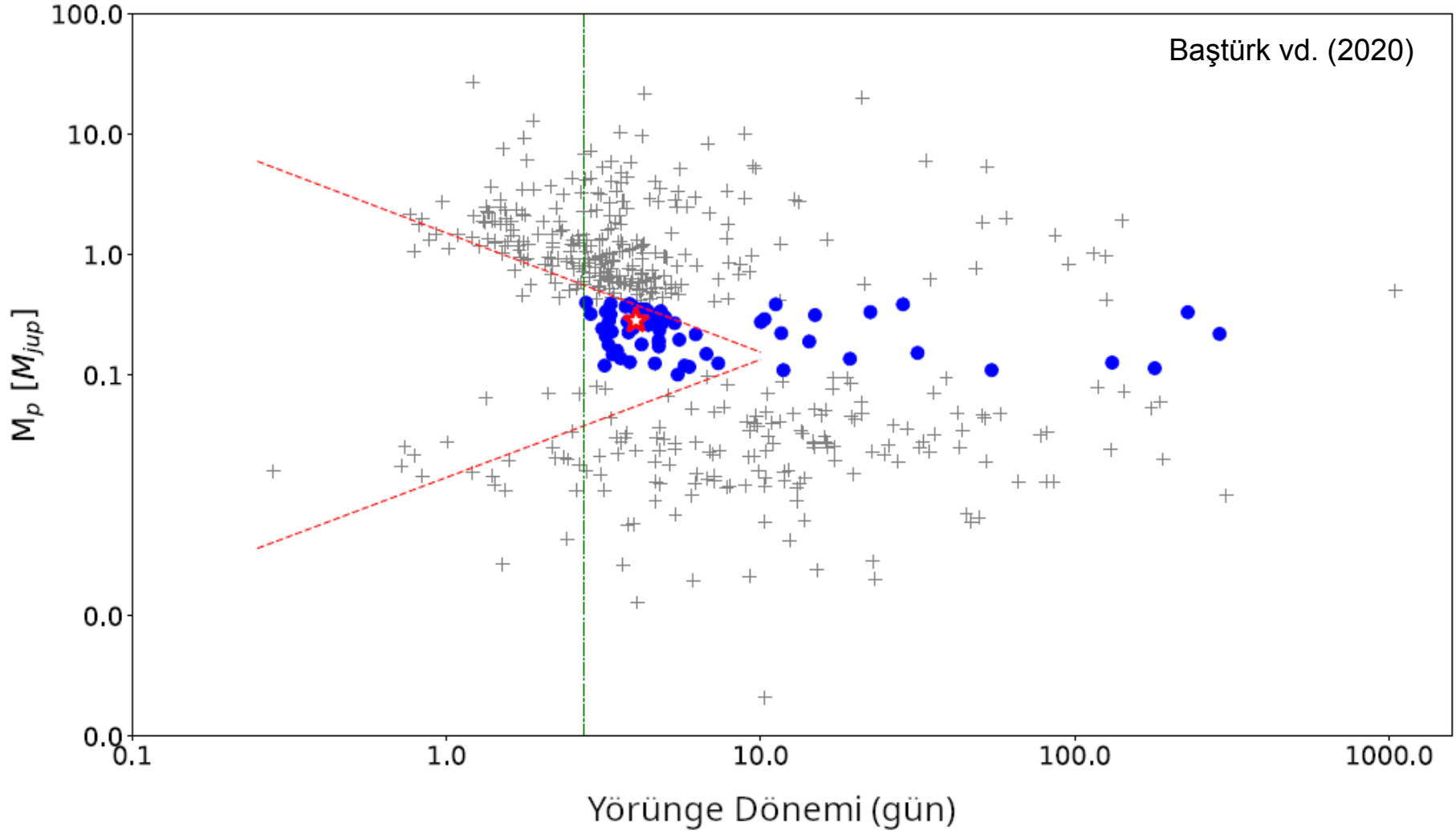
Hansen vd. (2021)



Kepler'in keşfettiği aday ve onaylanmış tüm gezegenler (mavi) ile sadece onaylanmış tüm gezegenler (kırmızı) için gezegen yarıçapı dağılımı (solda). **Yarıçap vadisi (radius valley)** her iki dağılım için de 1.5 ile 2.0 R_{yer} arasındaki gezegen sayısının azlığından açıkça görülmekte ve 1.9 R_{yer} yarıçapta da bir minimum göstermektedir.

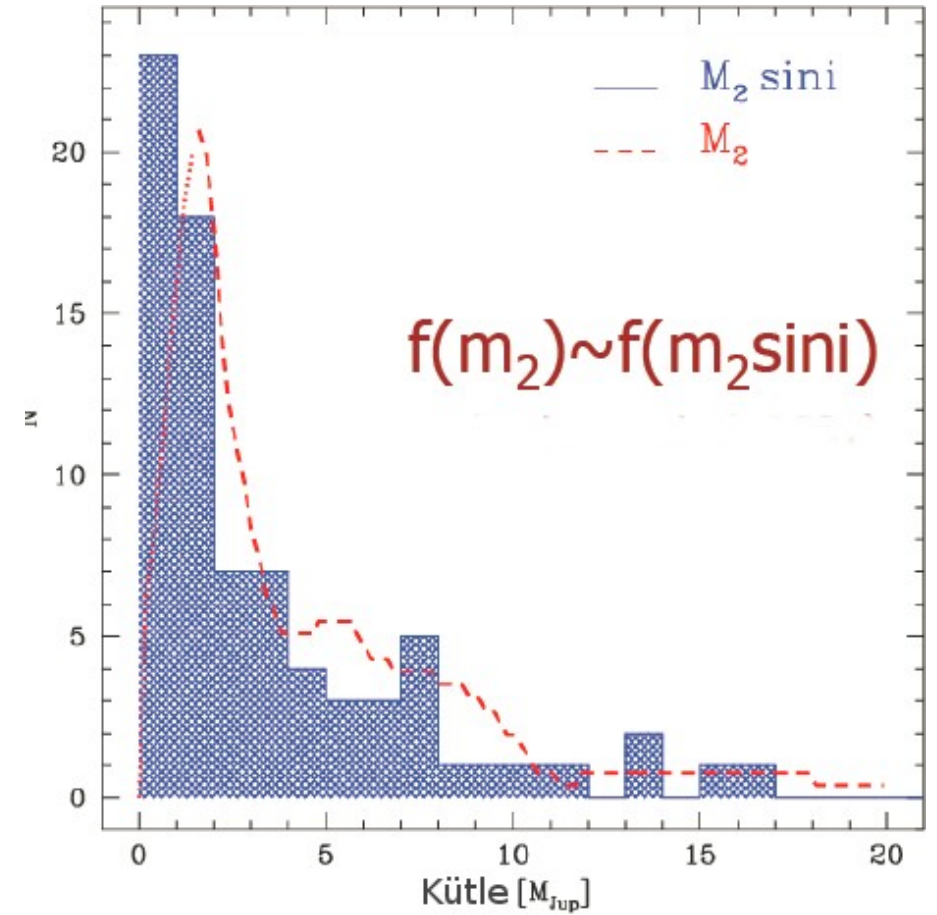
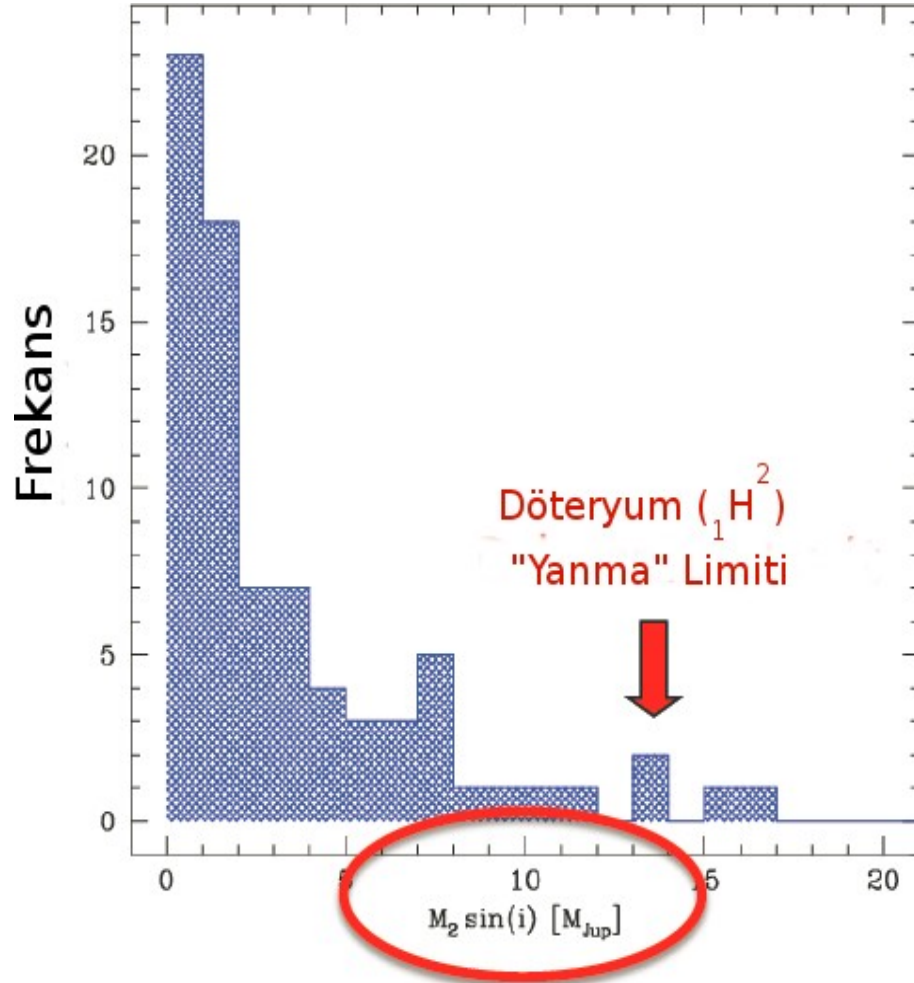
Dağılımlar Yer'in Güneş'ten aldığı ışınımın 150 katından fazla (mavi) ve az (kırmızı) alanlar için ayrı ayrı çizildiğinde (sağ panel) az ışınım alanlar için yarıçap vadisinin daha küçük yarıçapta, çok ışınım alanlar için ise daha büyük yarıçaplarda birden fazla minimum verdiği görülmektedir. Bu durum, yarıçap vadisinin yıldızdan gelen ışınımın atmosferin "buharlaşması" ile oluştuğu görüşünü desteklemektedir. Daha az ışınım alan mini-Neptün türü gezegenler daha küçük yarıçaplarda da atmosferlerini koruyabilmektedirler. Muhtemelen her iki mekanizma (fotonla buharlaşma ve içten ısınma) çalışıyor ancak buharlaşma daha etkin!

(Kısa Yörünge Dönemli) Jüpiter-Altı Gezegenler “Çölü”



Yarıçap vadisine çok benzer bir başka parametre uzayı **Jüpiter-altı gezegenler çölü (sub-Jovian desert)** olarak bilinir. Yaklaşık 3 gün yörünge döneminden küçük dönem ve $0.1-0.3 M_{Jup}$ kütle aralığında fazla sayıda gezegen bulunmamaktadır. Buz çizgisinin ötesinde oluşup barınak yıldızlarının yakınına göç eden gezegenlerden büyük olanlar yıldızın ışınlam gücü ile “şişmiş” atmosferlerini koruyabilirken, daha küçük olanlar ise fotobuharlaşıma ya da içten ısınma sonucu atmosferlerini kaybedip Neptün kütlesinde cisimler olarak gözlenmektedir. Aradaki cisimlere ise **sıcak-Satürnler** denir.

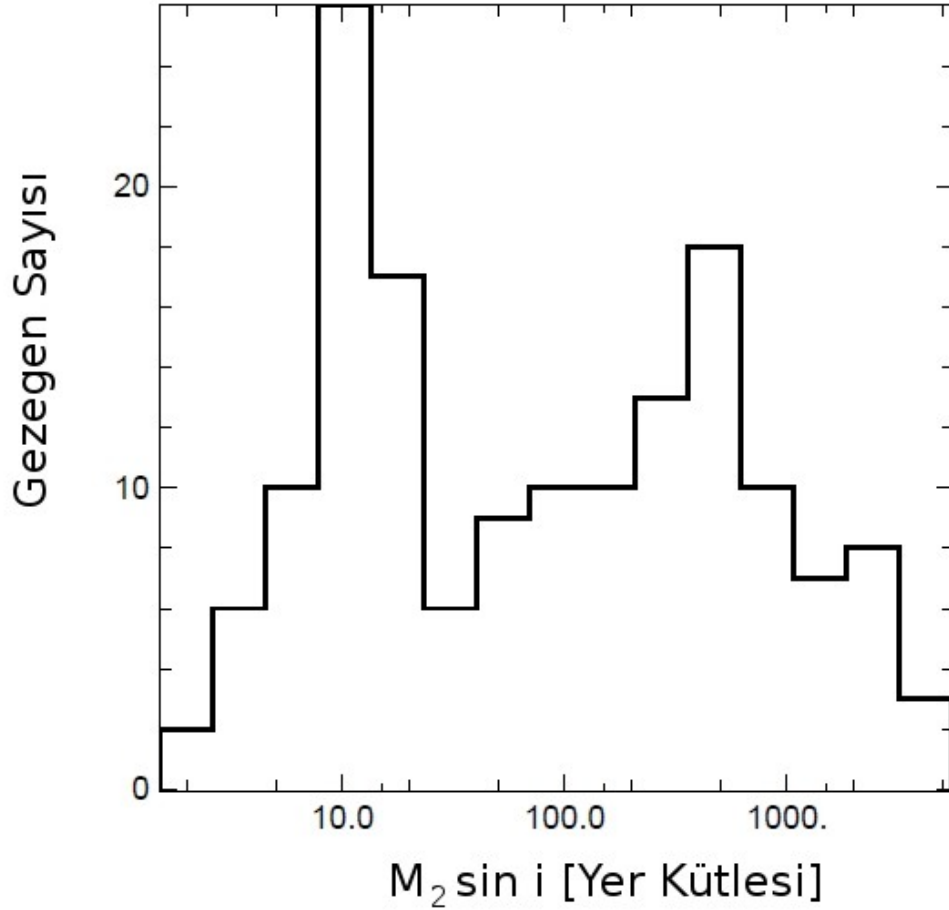
Kütle Dağılımı



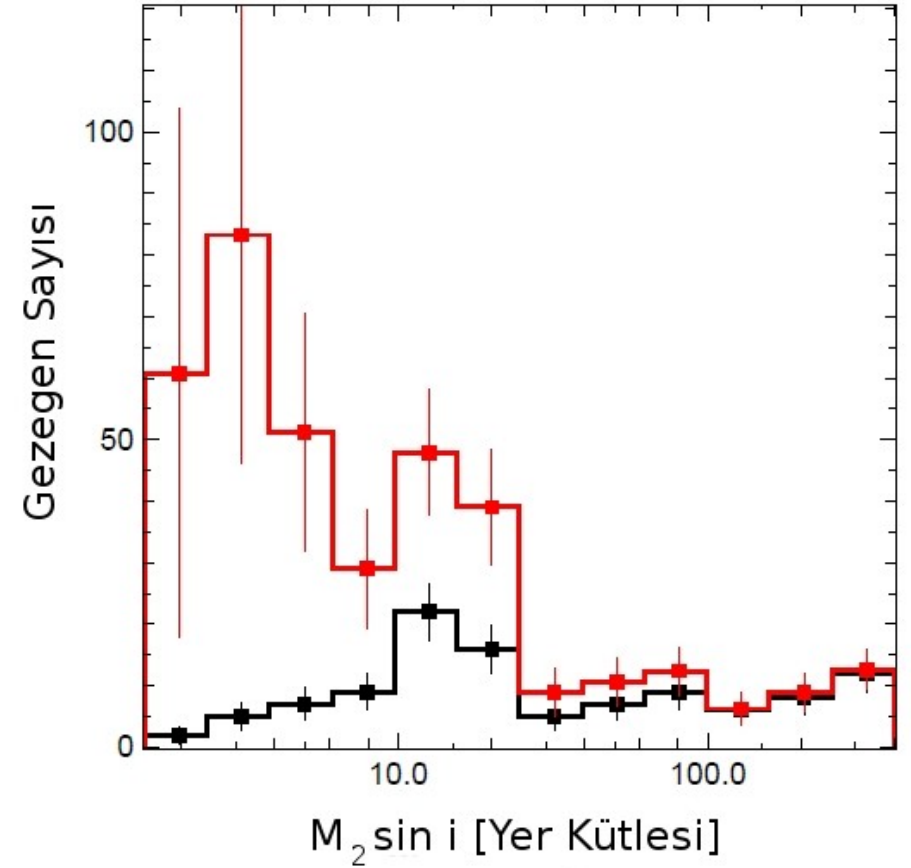
İstatistiksel algoritmalarla yörünge eğim açısına bağlılık giderildikten sonraki dağılım (kırmızı kesikli eğri)
(Jorissen vd. 2011)

HARPS / CORALIE Dikine Hız Araştırmaları'nın Sonuçları

Kütle Dağılımı



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

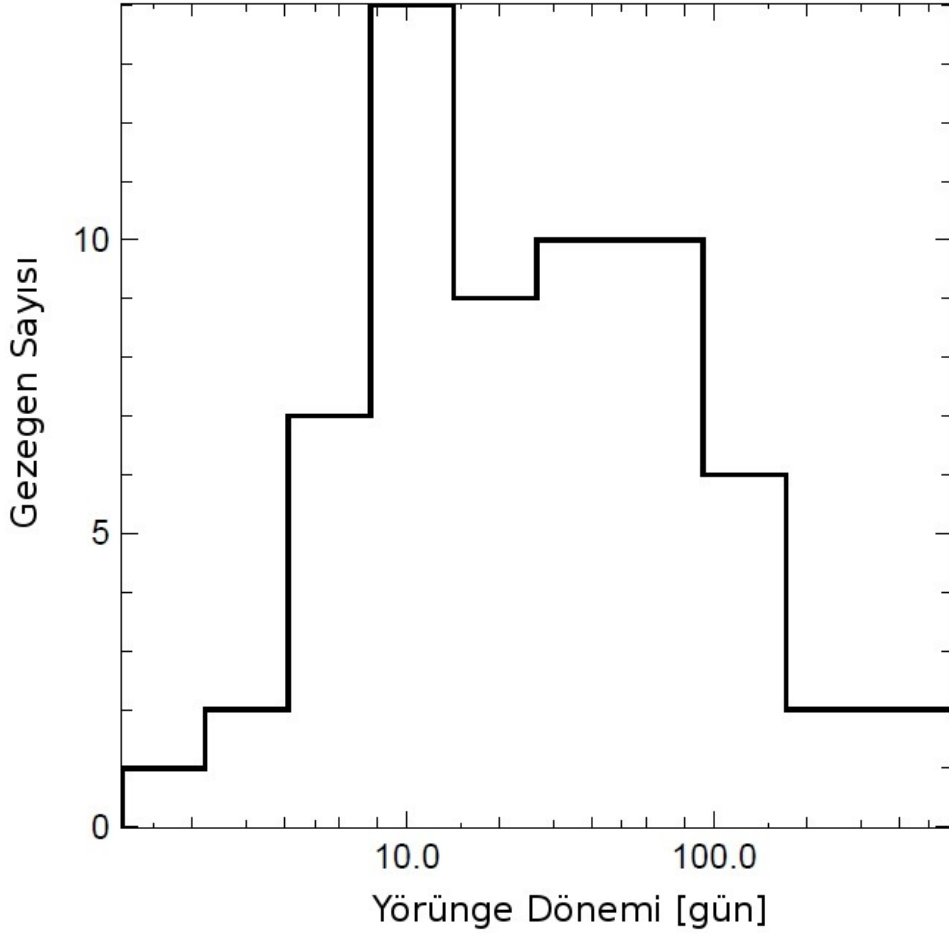


HARPS/CORALIE araştırmalarında keşfedilen gezegenlerin gözlemsel yanlılıklar istatistiksel algoritmalarla giderildikten sonraki kütle dağılımı (kırmızı). Siyah histogram soldaki şekille aynıdır ve yanlılıkları da barındırmaktadır (Mayor vd. 2011).

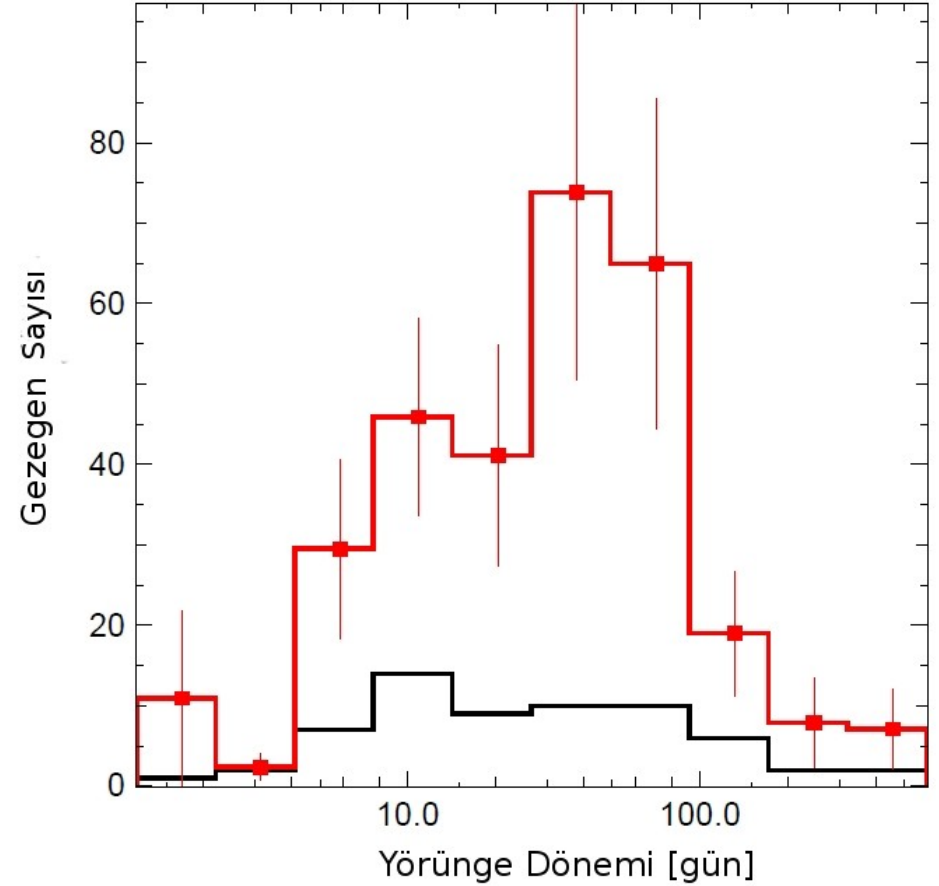
Sonuç 5: Gezegen popülasyonunu kütlece küçük gezegenler domine etmektedir.

HARPS / CORALIE Dikine Hız Araştırmaları'nın Sonuçları – II

Yörünge Dönemi Dağılımı



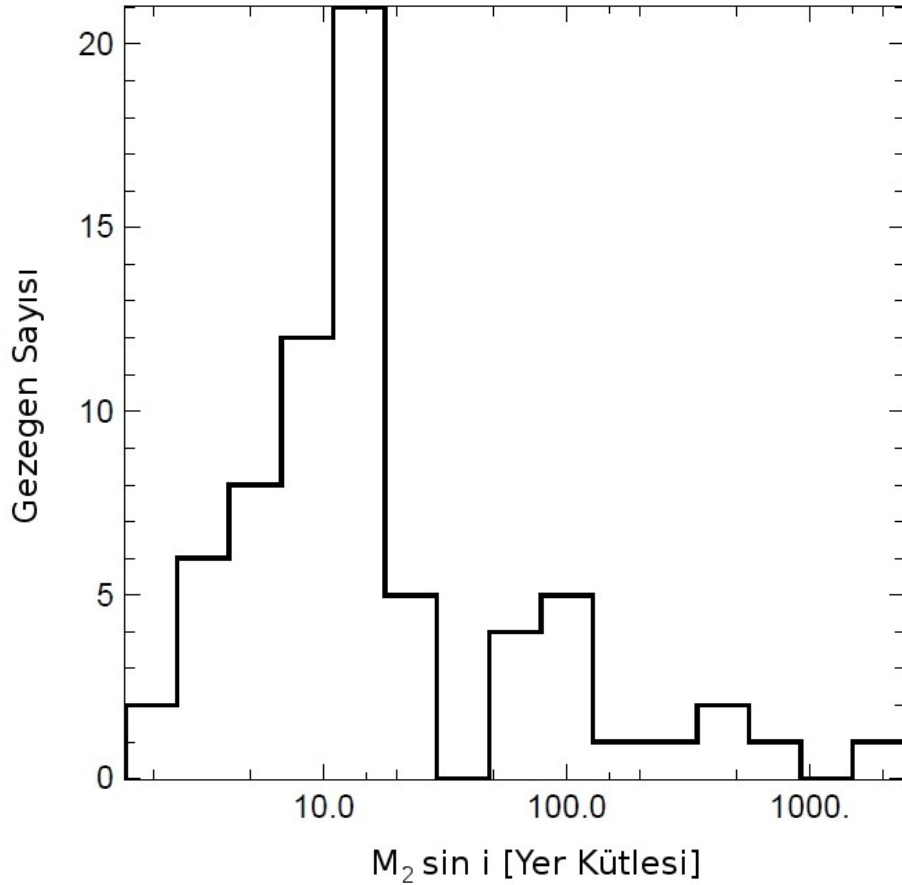
HARPS/CORALIE araştırmalarında keşfedilen $M_2 \sin i < 30 M_{\text{yer}}$ kütleli gezegenlerin (Süper Dünya ve Mini Neptünler) dönem dağılımı (Mayor vd. 2011)



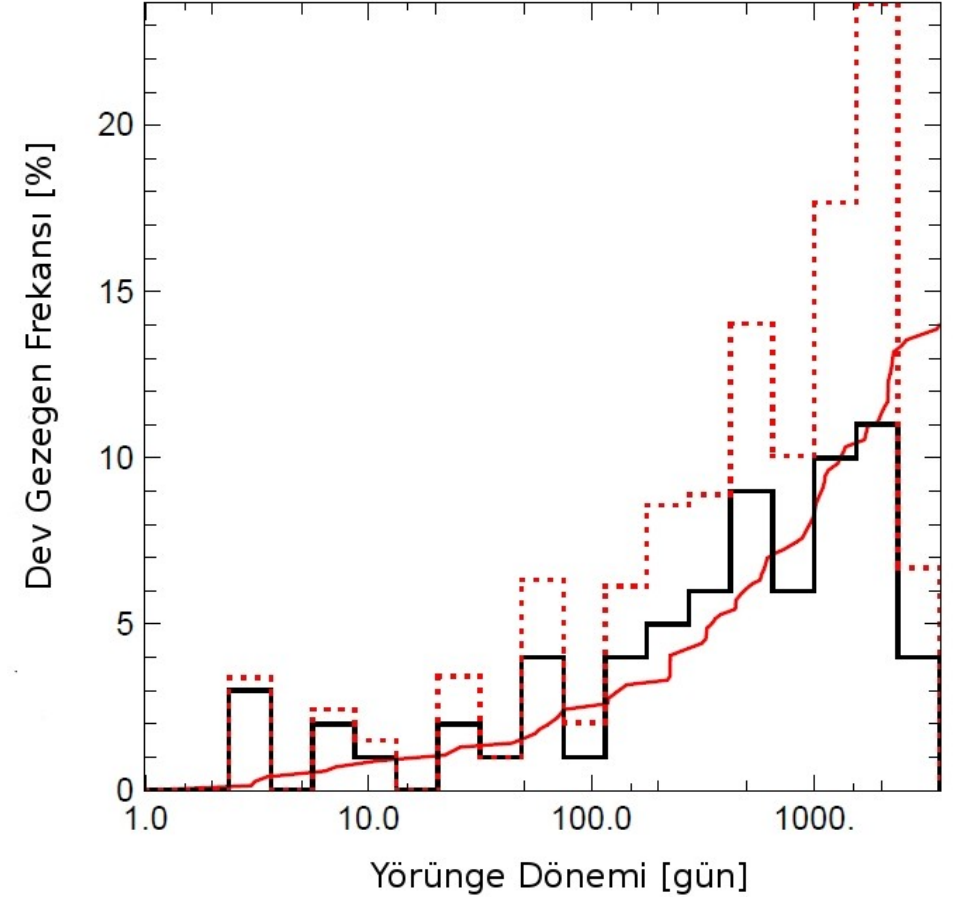
HARPS/CORALIE araştırmalarında keşfedilen $M_2 \sin i < 30 M_{\text{yer}}$ kütleli gezegenlerin gözlemsel yanlışlar giderildikten sonraki dönem dağılımı (Mayor vd. 2011)

HARPS / CORALIE Dikine Hız Araştırmaları'nın Sonuçları – III

Kütle - Yörünge Dönemi Dağılımı: Değerlendirme



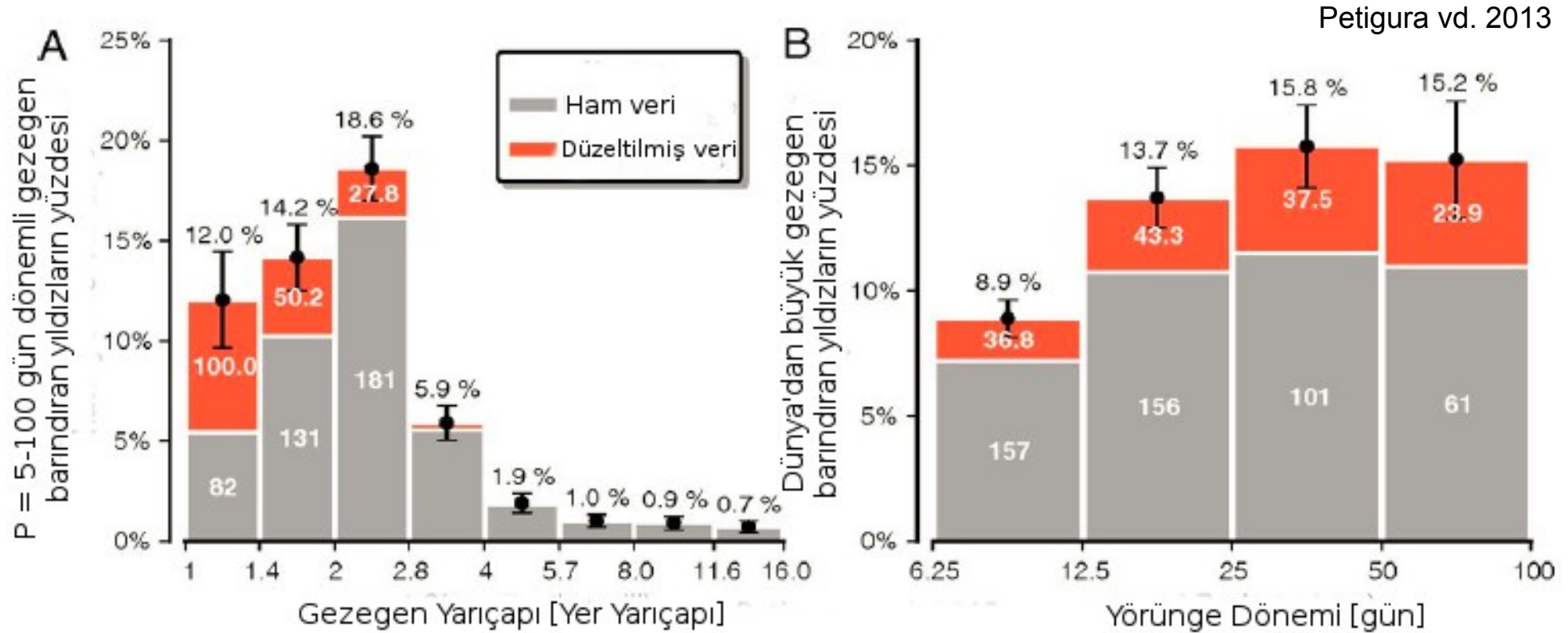
HARPS/CORALIE araştırmalarında keşfedilen $P < 100$ gün dönemli gezegenlerin kütle dağılımı. Kısa yörünge dönemli gezegenler arasında küçük kütleli gezegenler hiçbir yanlışlık düzeltilmese de oldukça baskın! (Mayor vd. 2011)



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

Sonuç 6: Kütlece küçük gezegenler kısa yörünge dönemlerine sahipken, dev gaz gezegenler için kütle büyüdükçe yörünge dönemi artmaktadır. Bu sonuç çekirdek birikimi teorisini destekler niteliktedir!

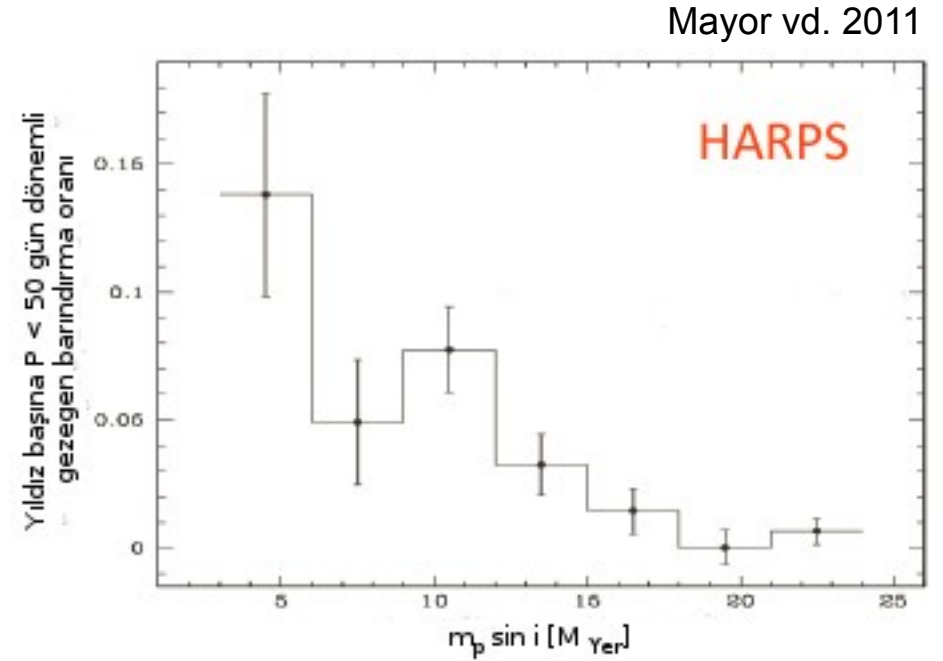
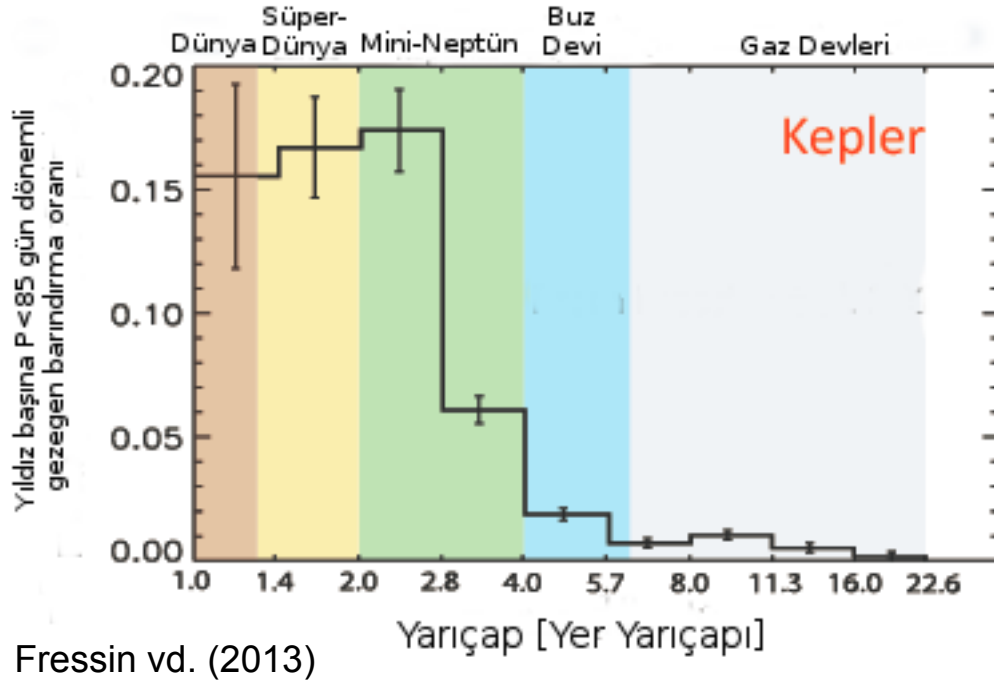
Gezegen Geçişi Araştırmalarının Sonuçları – I



A. Görüldüğü gibi gözlemsel yanlışlıklar giderildikten sonra $2.8 R_{\text{yer}}$ '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



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

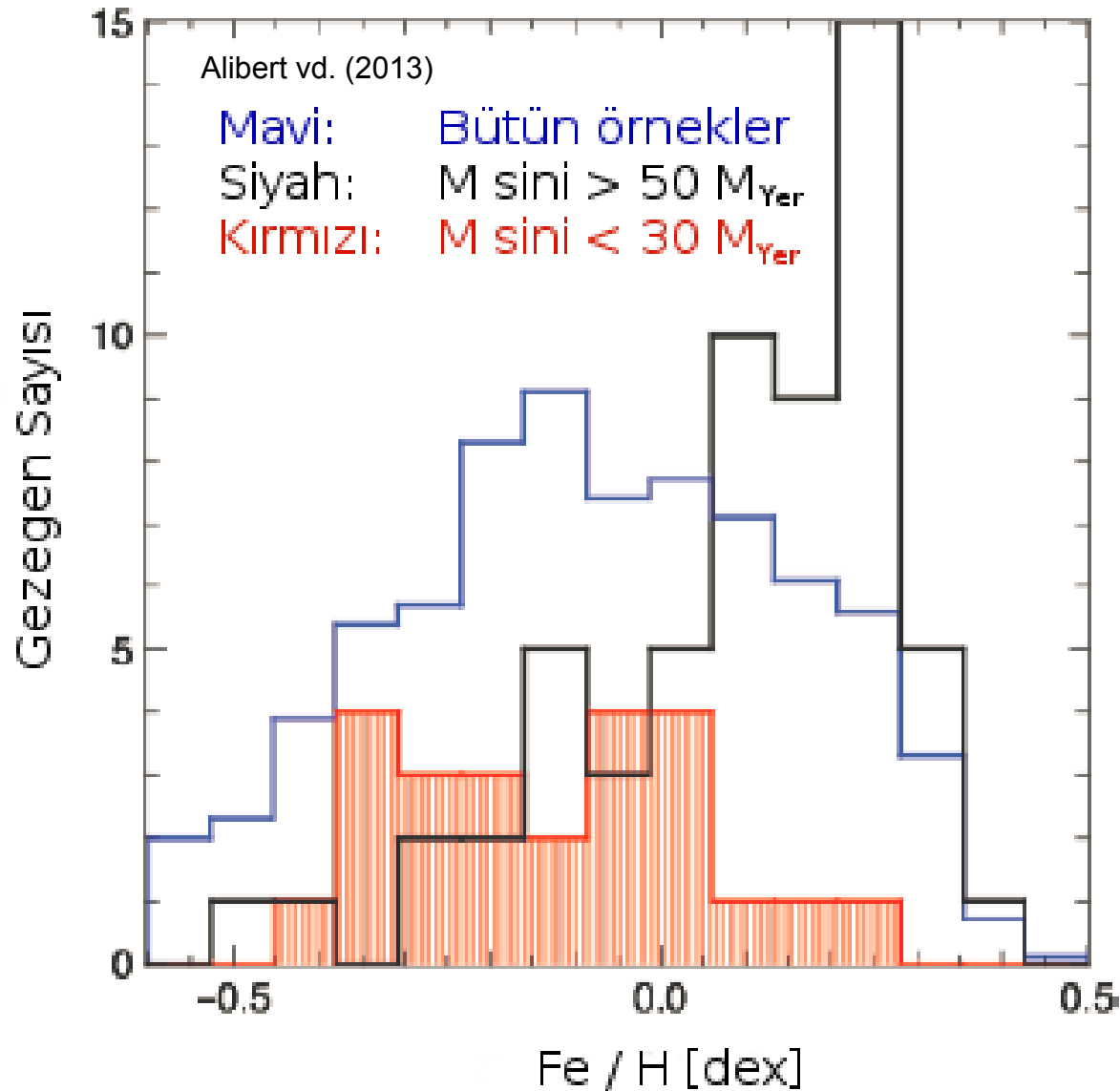
$$F = 0.39 \pm 0.02 \text{ gezegen / yıldız}$$

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

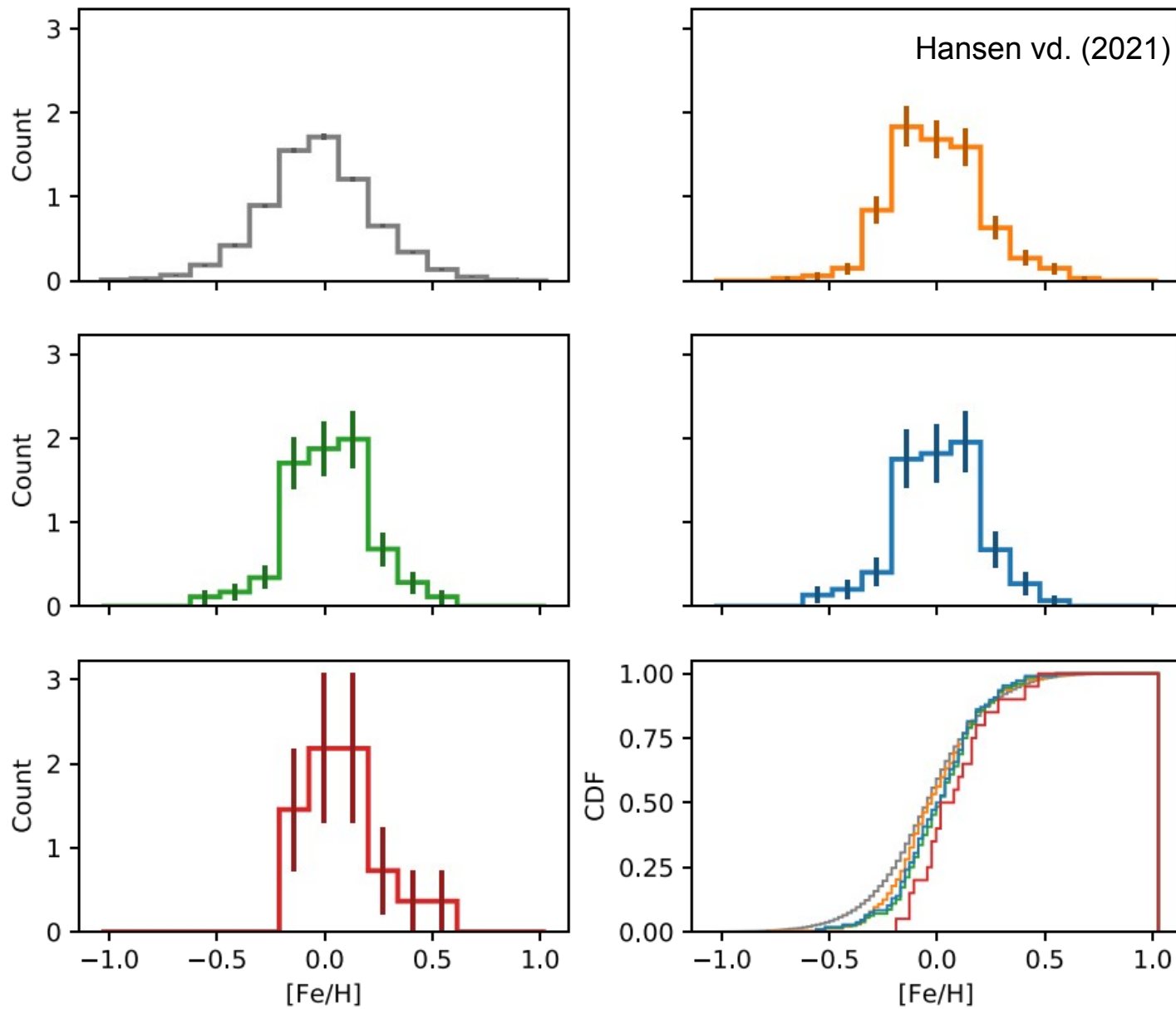
$$F = 0.33 \pm 0.05 \text{ gezegen / yıldız}$$

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 yanlışlıkların giderilebileceği kadar veri elde edilebilen $P < 50$ gün dönemli gezegenler için oldukça baskın olduğu yönünde ve birbiriyle tutarlıdır.

Barınak Yıldızların Metal Bolluğu

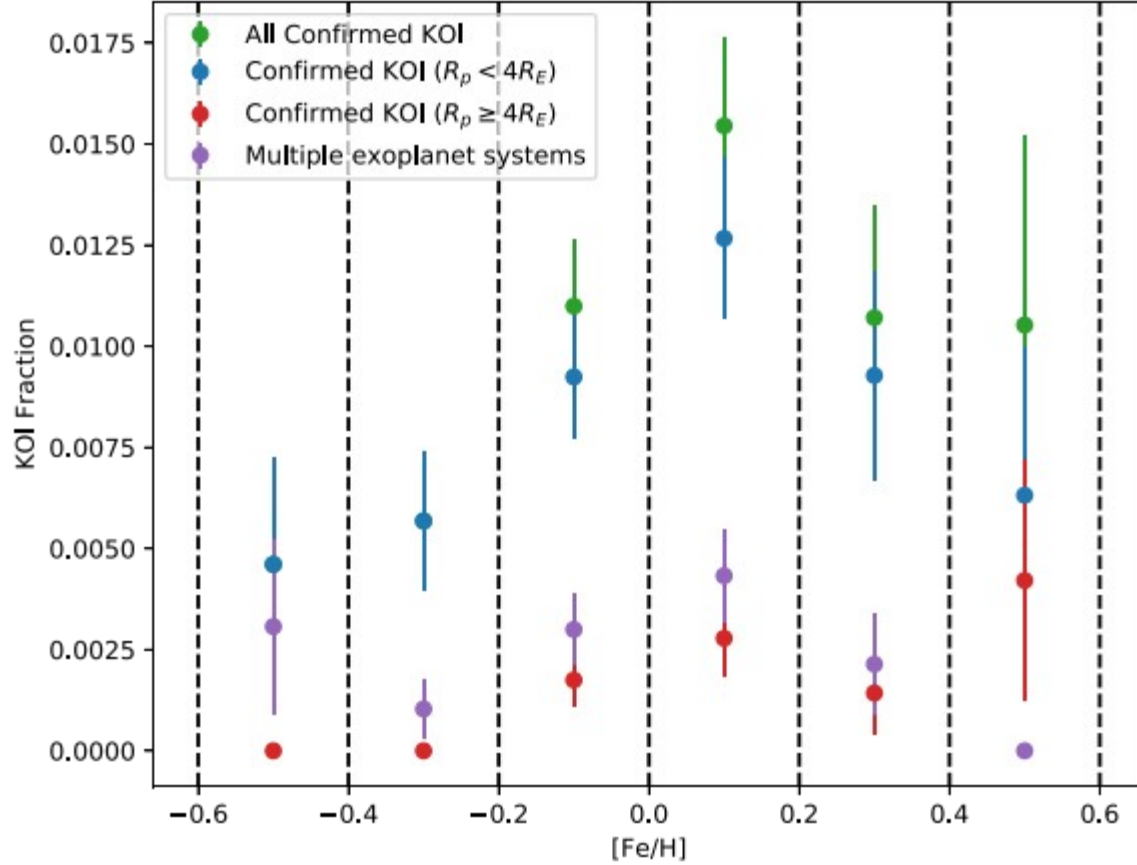


Açık ki dev gezegen barındıran yıldızlar (siyah) tüm yıldızlarla (gezegen barındıran:kırmızı ya da barındırmayan: mavi) ile karşılaştırıldığında metalce önemli ölçüde zenginler!

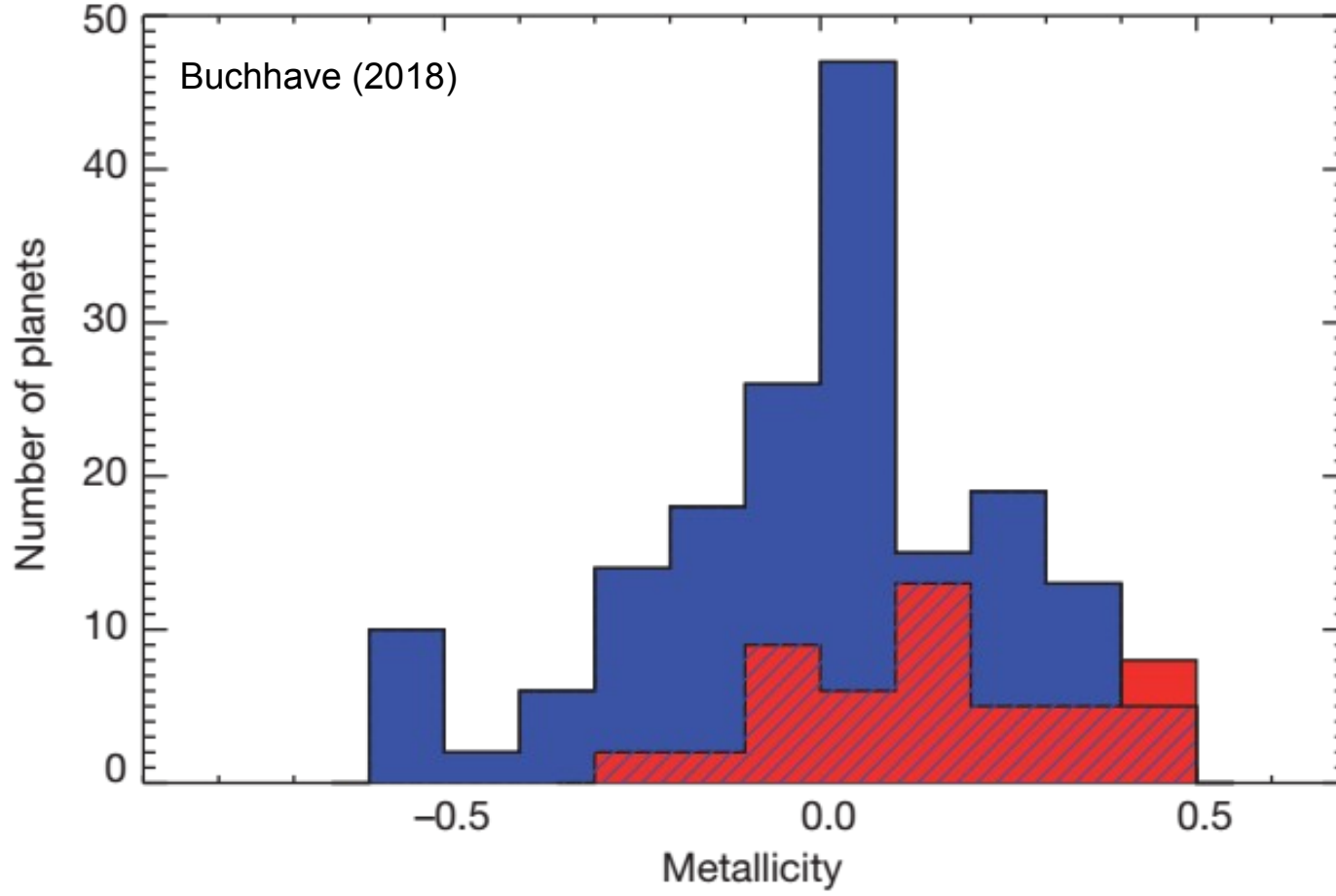


Kepler tarafından gözlenen yıldızlar için yapılan bu araştırmada Hansen vd. Ana dağılım (gri), tüm aday ve onaylanmış Kepler gezegenlerini barındıran (turuncu), sadece onaylanmış gezegenleri barındıran (yeşil), 4 R_{yer} 'den küçük gezegenleri barındıran (mavi) ve 4 R_{yer} 'den büyük gezegenleri barındıran (kırmızı) barınak yıldızların demir bolluğu dağılımlarını karşılaştırdıklarında diğer dağılımlar ana dağılıma benzer, ancak bir miktar metalse zengin ve Güneş bolluğu ($[Fe / H] = 0$) civarında toplanmışken, büyük gezegenlerin metalse daha zengin yıldızlar etrafında daha çok sayıda olduğunu gösterdiler.

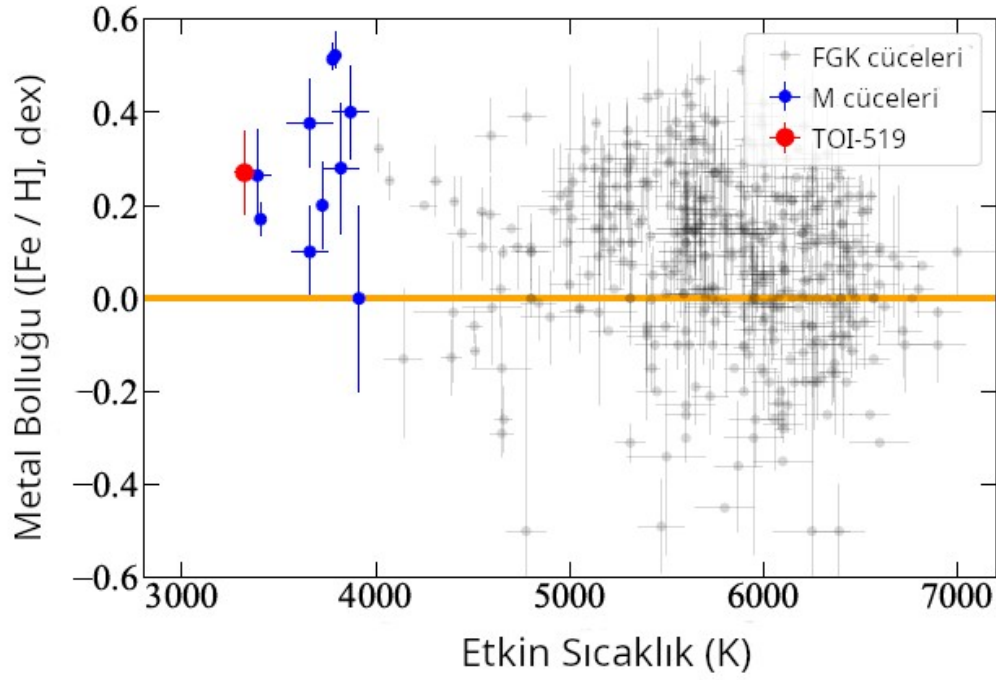
Hansen vd. (2021)



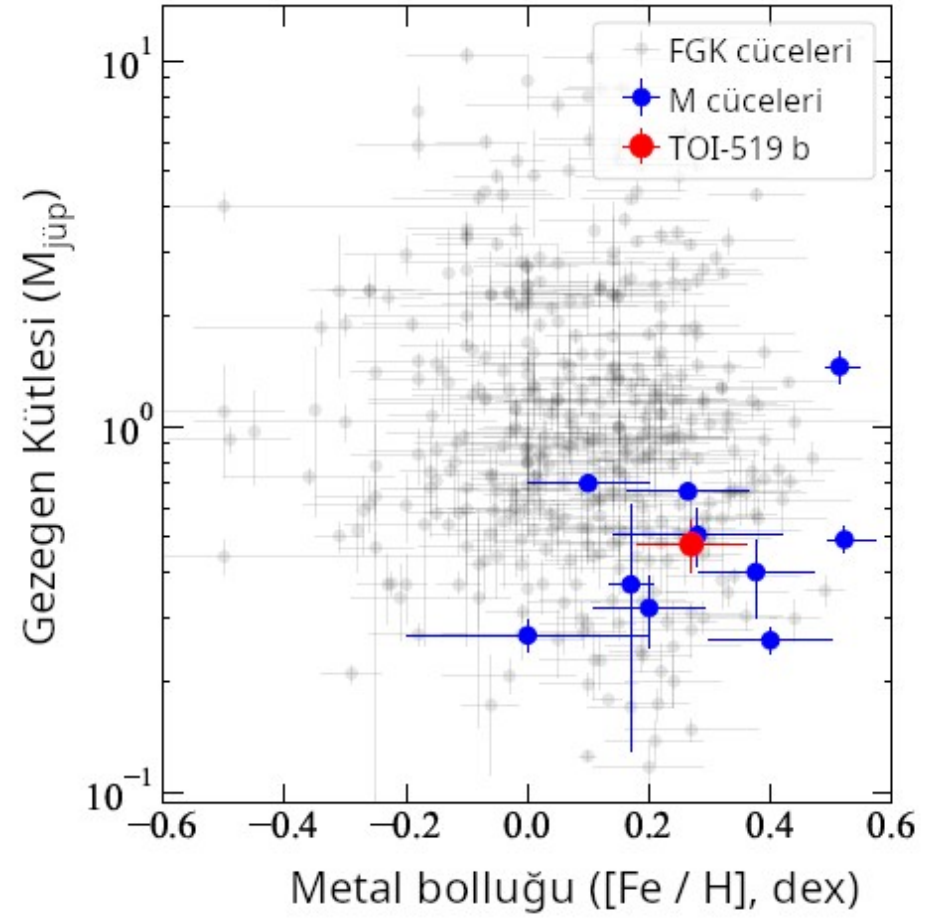
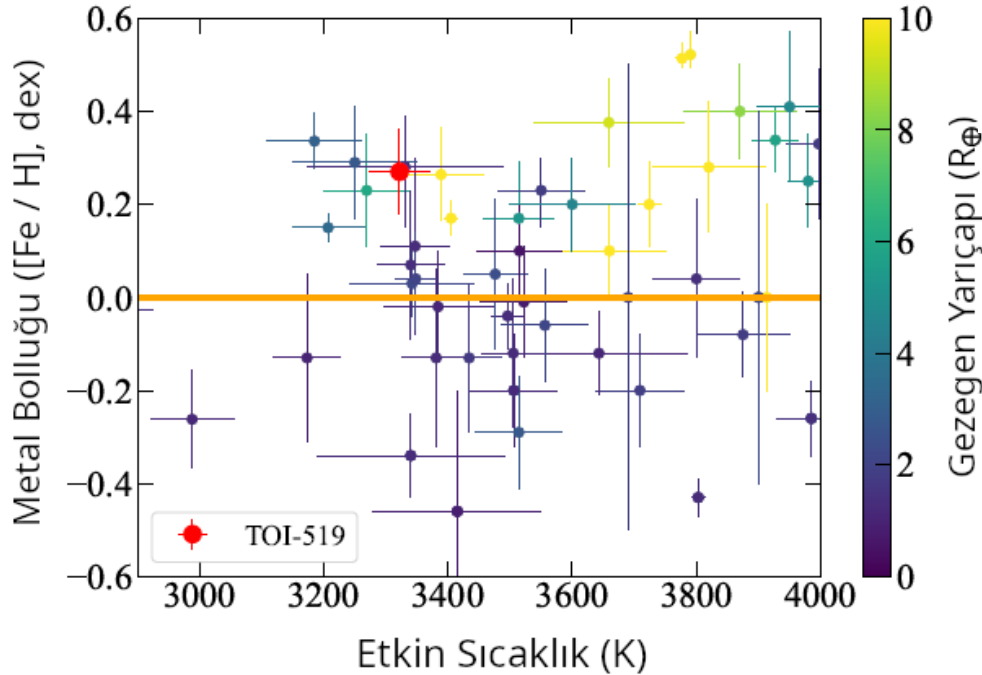
Aynı şekilde Hansen vd. (2021) Kepler'in etrafında birden fazla gezegen keşfettiği barınak yıldızların metal bolluğunun da Güneş bolluğu ($[Fe / H] = 0$) civarında olduğunu göstermiştir (grafikteki mor noktalar). Bu grafikte onaylanmış tüm Kepler gezegenlerini barındıran (yeşil), $4 R_{yer}$ 'den küçük gezegenleri barındıran (mavi) ve $4 R_{yer}$ 'den büyük gezegenleri barındıran (kırmızı) barınak yıldızların demir bolluğu, birden fazla gezegen barındıranlarla (mor) birlikte belirli metalisite aralıklarına bölünerek tüm Kepler yıldızlarına (ana dağılım) oran cinsinden verilmiştir. Büyük gezegenlerin metalce zengin yıldızlar etrafında daha çok bulunduğu, diğerleri için ise dağılımın Güneş-bolluğu etrafında olduğu görülmektedir.



4 R_{yer} 'den küçük gezegenleri barındıran (mavi) ve 4 R_{yer} 'den büyük gezegenleri barındıran (kırmızı) barınak yıldızların demir bolluklarının dağılımı arasındaki fark açıkça görülmektedir. Küçük gezegenler Güneş bolluğu civarında dağılırken, büyük gezegenler metalce zengin yıldızların etrafında daha sık görülmektedirler (Buchhave 2012).



Kagetani vd. (2018)



Sonuç 7: Genel olarak yıldızlarına yakın dev gaz gezegenler metalce zengin yıldızların etrafında bulunurken, az sayıdaki (11) M-tayf cücesinin etrafındaki dev gezegenler kural olarak metalce zengin yıldızların etrafında bulunuyorlar. Yine genel olarak metalce zengin yıldızların etrafında büyük ve kütleli gezegenler bulunuyor. Ancak M-cücelerin etrafındaki dev gaz gezegenler diğer yıldızların etrafındaki benzerlerine göre kütlece küçükler ($M < 0.6 M_{jup}$). **Bu bulguların hepsi çekirdek birikimi teorisi (merkezi yığılma senaryosu) ile tutarlıdır.**

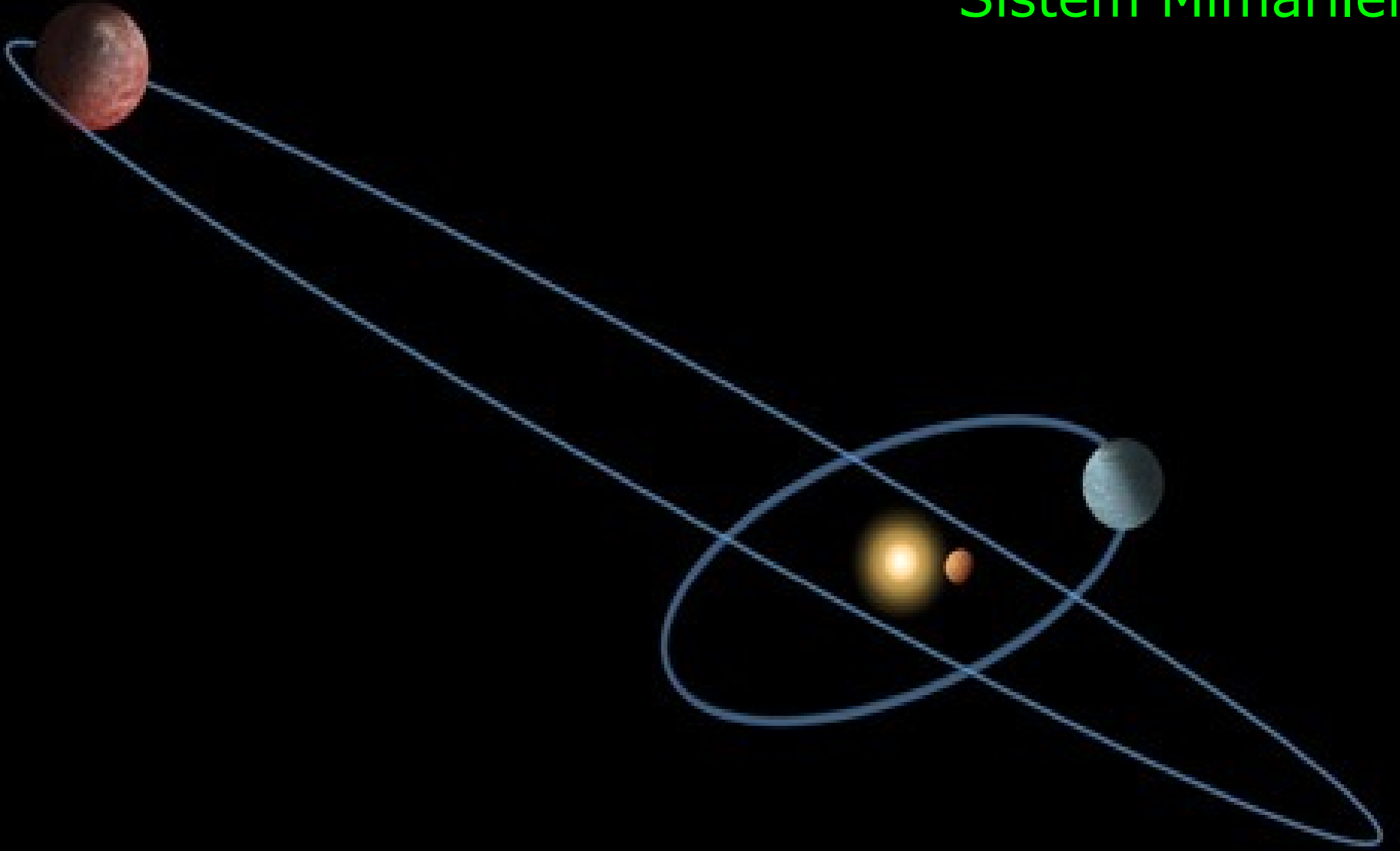
Kepler / HARPS Sonuçları

Etrafında gezegen araştırması yapılan (FGKM yıldızları)

Sonuç 8 – 15:

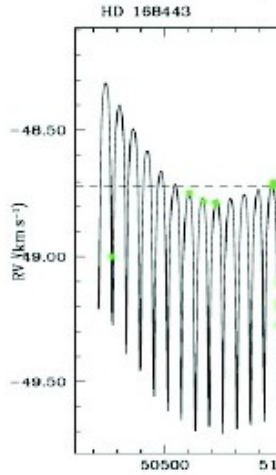
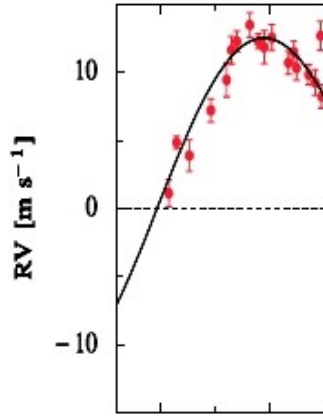
- ✓ tüm yıldızların %1'inden azı bir sıcak Jüpiter barındırmaktadır ve bu yıldızlar metalce diğer yıldızlara göre daha zengindir,
- ✓ tüm yıldızların %10'u herhangi bir yörünge dönemine sahip bir gaz gezegen barındırmaktadır ve bu yıldızlar metalce diğer yıldızlara göre daha zengindir.
- ✓ “küçük” yıldızlar (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 gezegenerin 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. Çoklu gezegen sıklığı tam olarak bilinmemekle ve barınak yıldız parametreleriyle de değişmekle birlikte tekli sistemlere göre daha fazladır (Kepler Orerry V: https://www.youtube.com/watch?v=Td_YeAdygJE)

Yörünge Dış Merkezlikleri Sistem Mimarileri

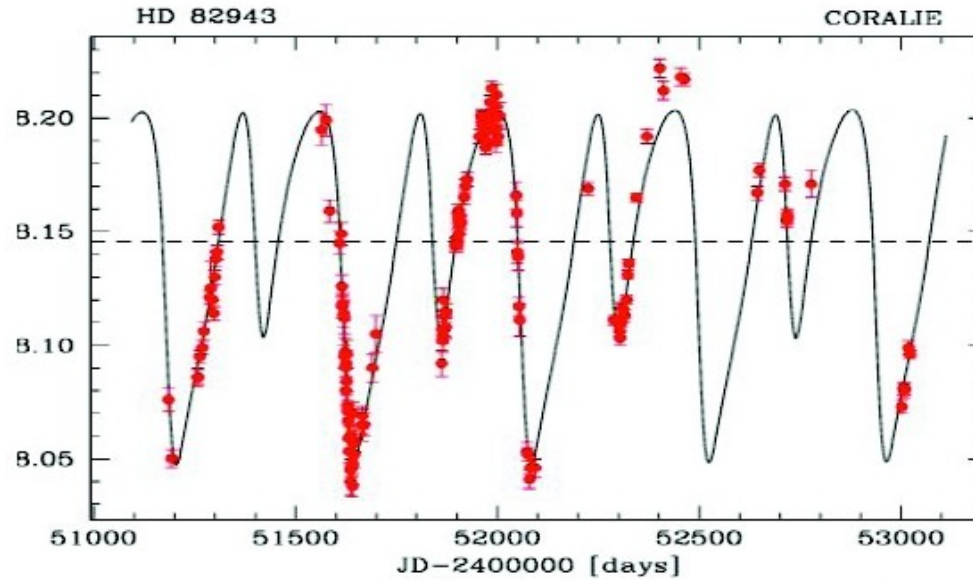


Gezegen Çeşitliliği:

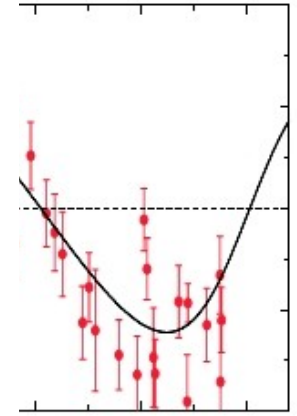
Dikine Hız Gezegenlerinin Yörünge Çeşitliliği



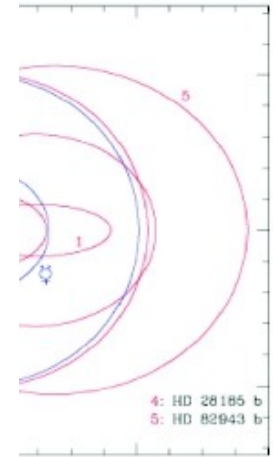
Rezonans Sistemleri
Yörünge dönemleri arasında iyi tanımlanmış
bir ilişki bulunan sistemler



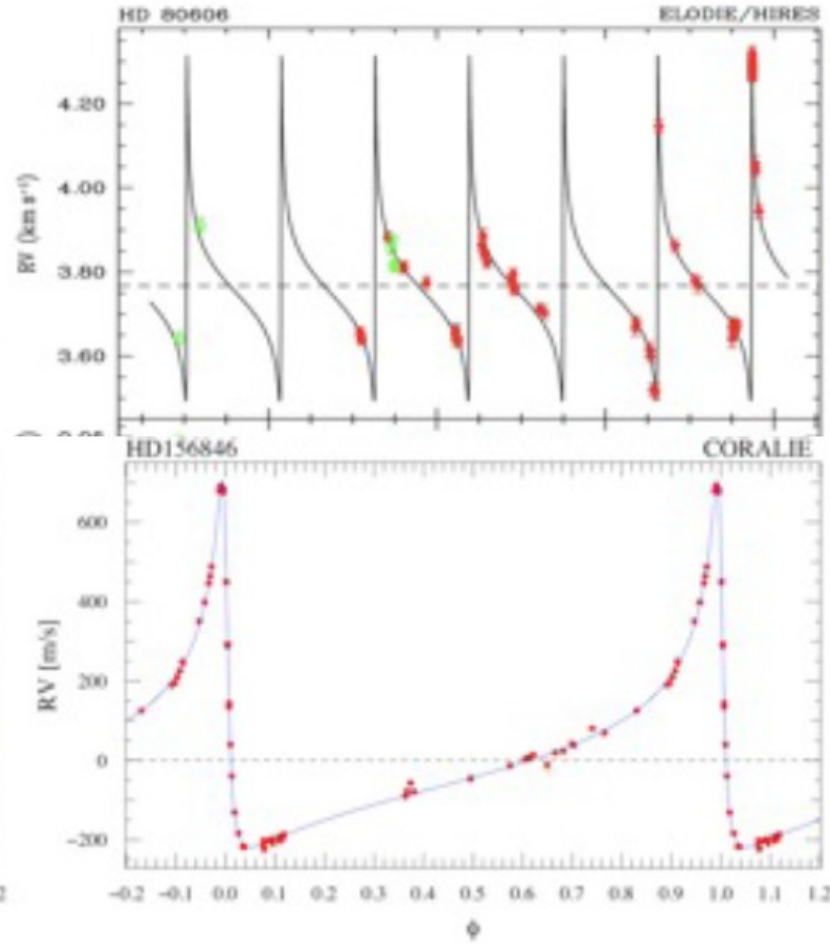
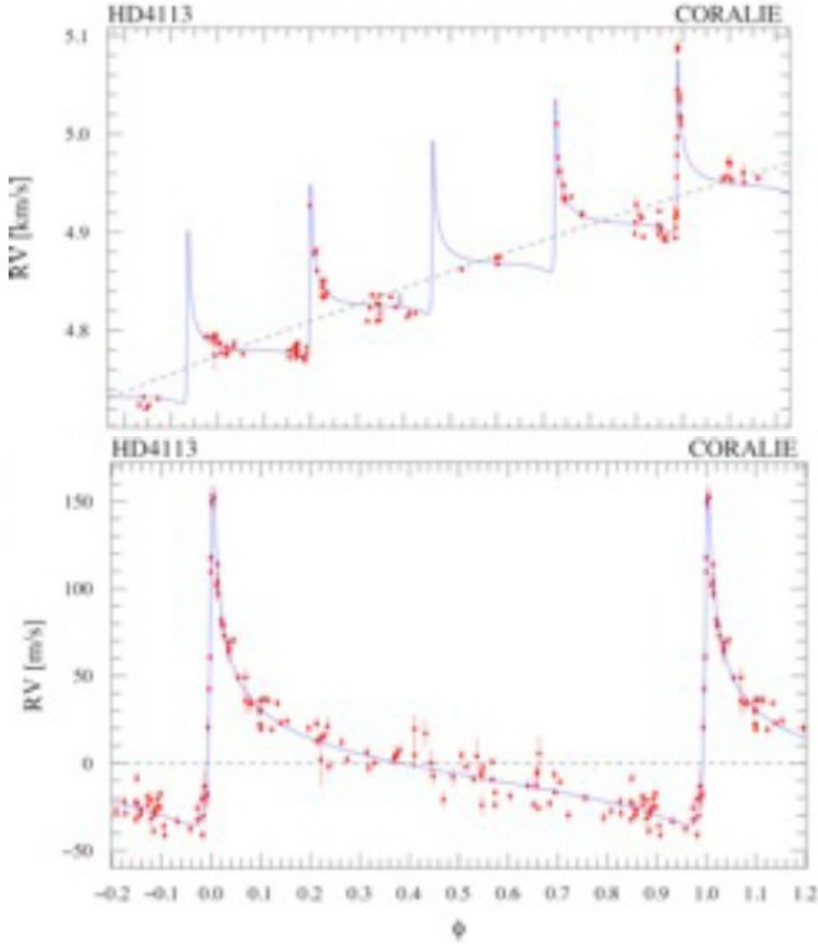
$$P2/P1 = 440d/220d = 2$$



n Günü

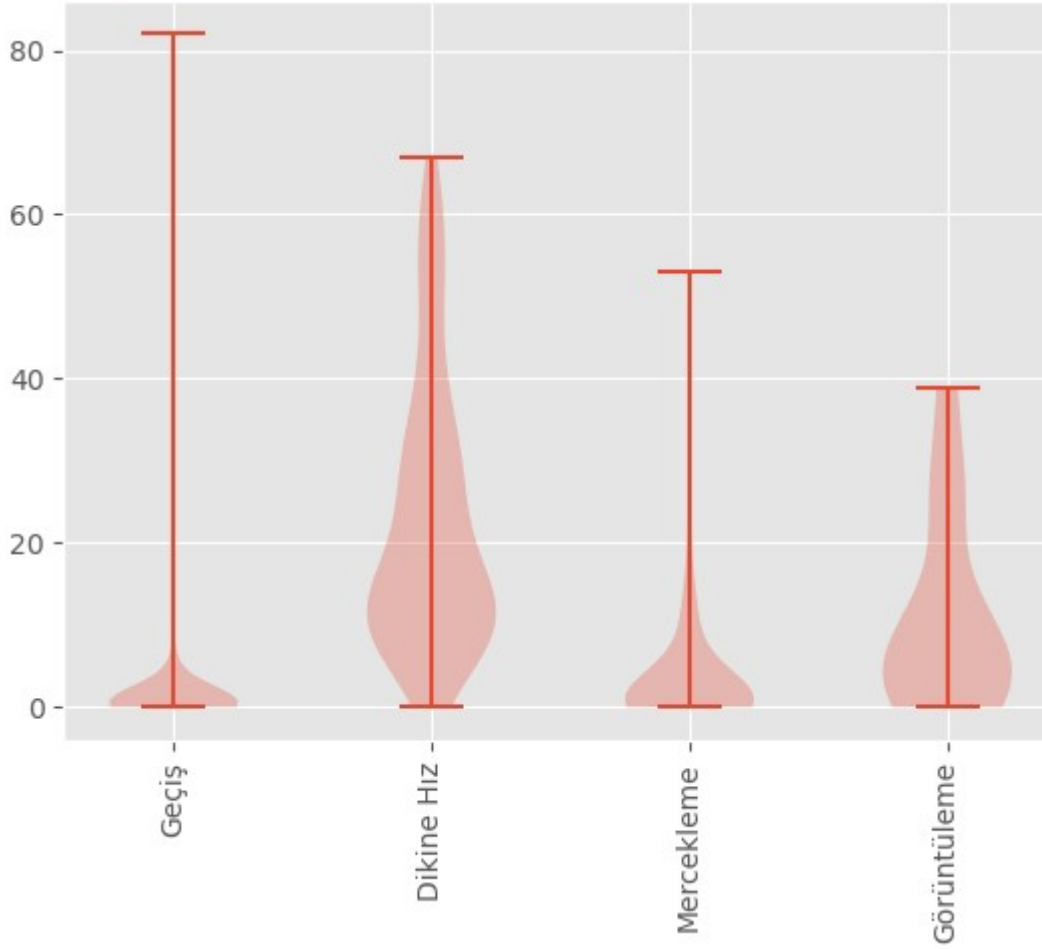


dık (AB)



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

Güneş Sistemi'nde örneği olmayan çok yüksek basıklık (dış merkezlilik, eksantrisite) değerine sahip gezegenler (özellikle dikine hız yöntemiyle) keşfedilmektedir.



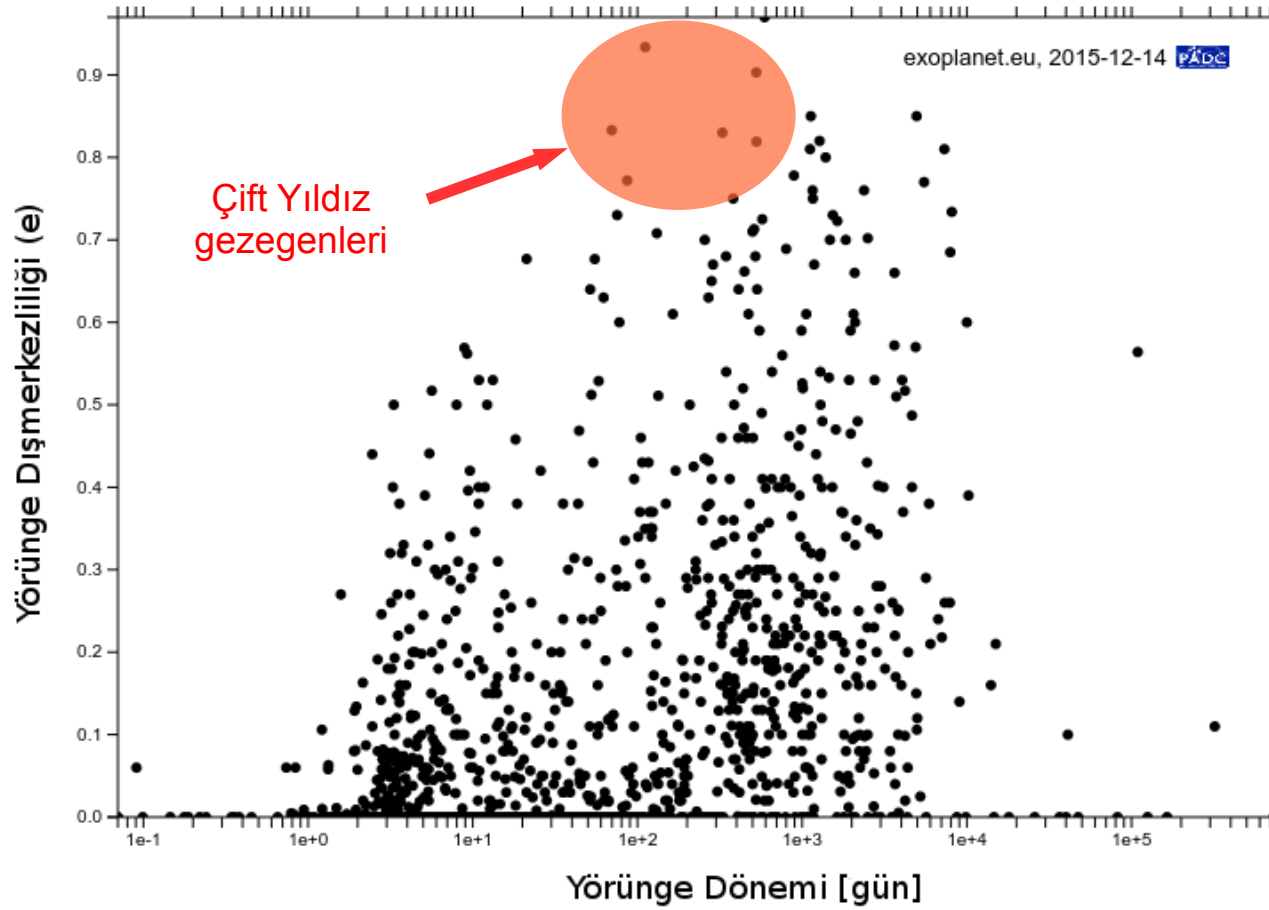
Yönteme göre dış merkezlilik değerlerine bakılacak olunursa bu hem oluşum, hem yörünge evrimi, bir başka deyişle sistemlerin mimari evrimi hakkında bilgi verebilir. Yöntemlerle yapılan keşiflerin ortalama ile ortanca basıklık değerlerine bakılacak olursa:

Sonuç : Geçiş yöntemiyle yıldızlarına yakın gezegenler keşfedildiğinden, bu gezegenlerin yıldızlarıyla kuvvetli tedirginlik etkileşimleri altında yörüngelerinin çemberselleştiği görülebilir.

Sonuç: Önemli bir kısmı çoklu sistemlerde ve orta uzaklıktaki yörüngelerde gezegen keşfinin yapıldığı dikine hız yönteminde dışmerkezliliğin daha geniş bir aralığa dağıldığı görülmektedir.

Sonuç : Genellikle uzun yörünge dönemli ve büyük gezegenlerin keşfedildiği görüntüleme yöntemi keşiflerinin büyük yörünge basıklıklarına sahip oldukları görülmektedir.

Sonuç 16: Dış merkezlilik barınak yıldızla yaklaşıldıkça azalır. Bunun nedeni hem gezegen-gezegen, hem de yıldız-gezegen arası kütleçekim ve tedirginlik etkileridir.

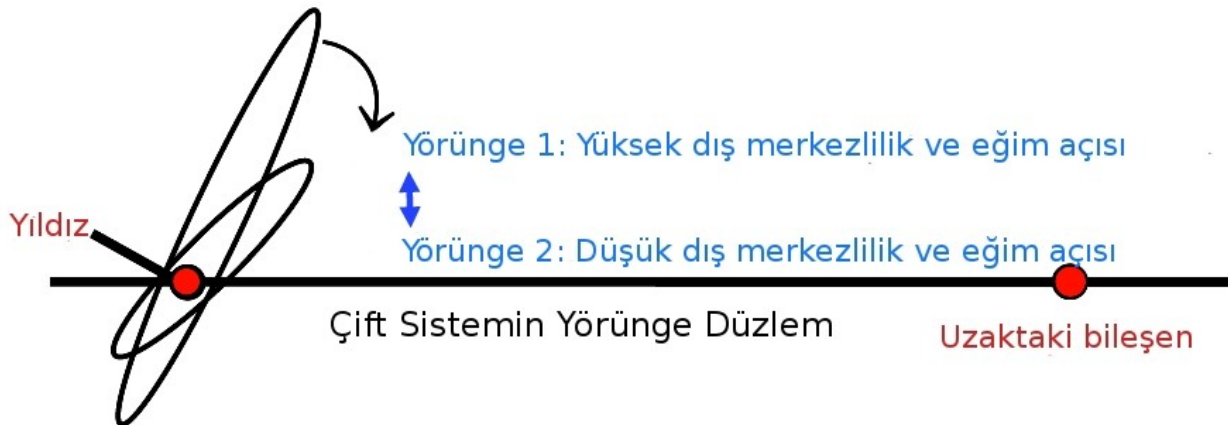


Ortalama eksantrisite $\langle e \rangle$: 0.17

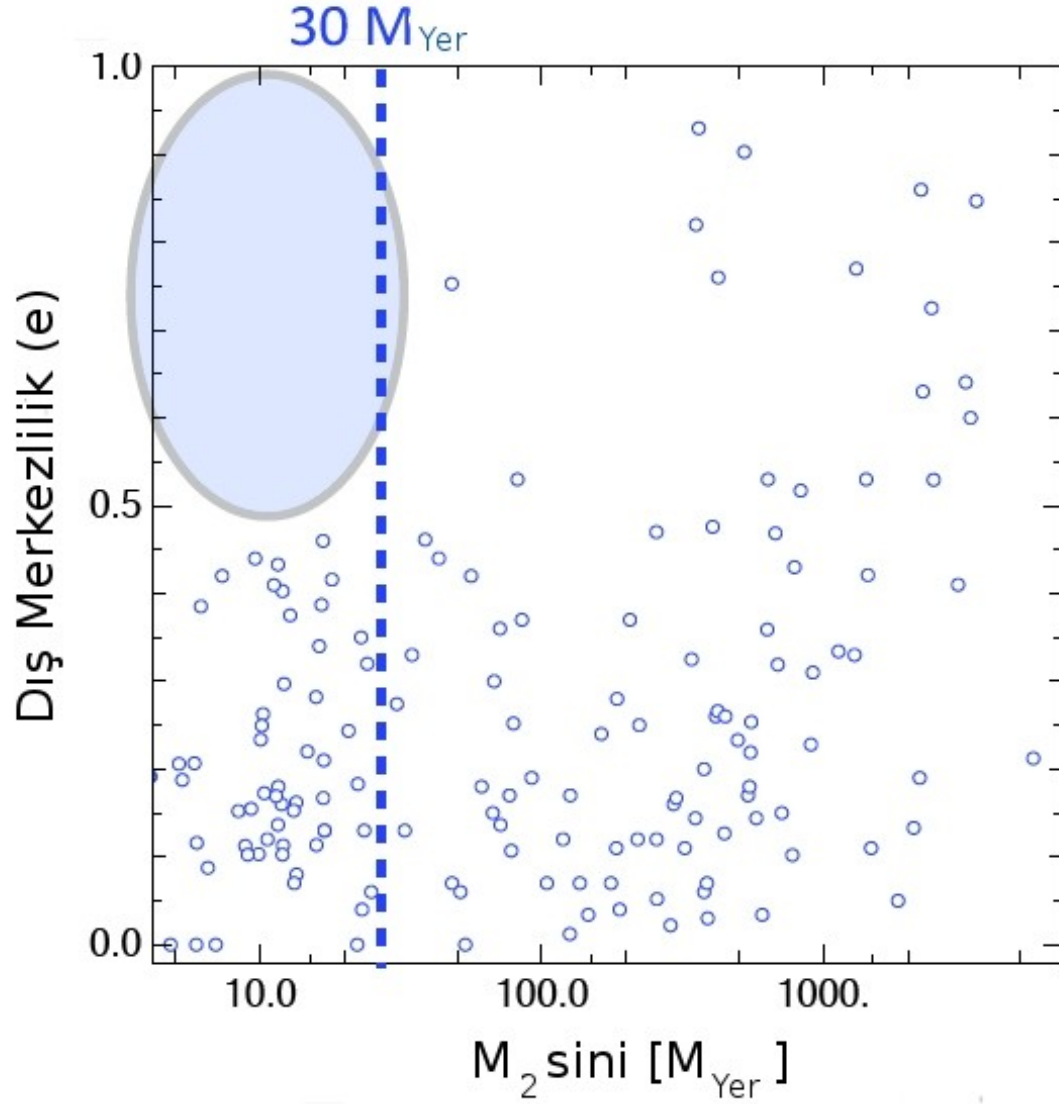
Olası Kaynakları:

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

Kozai Mekanizması



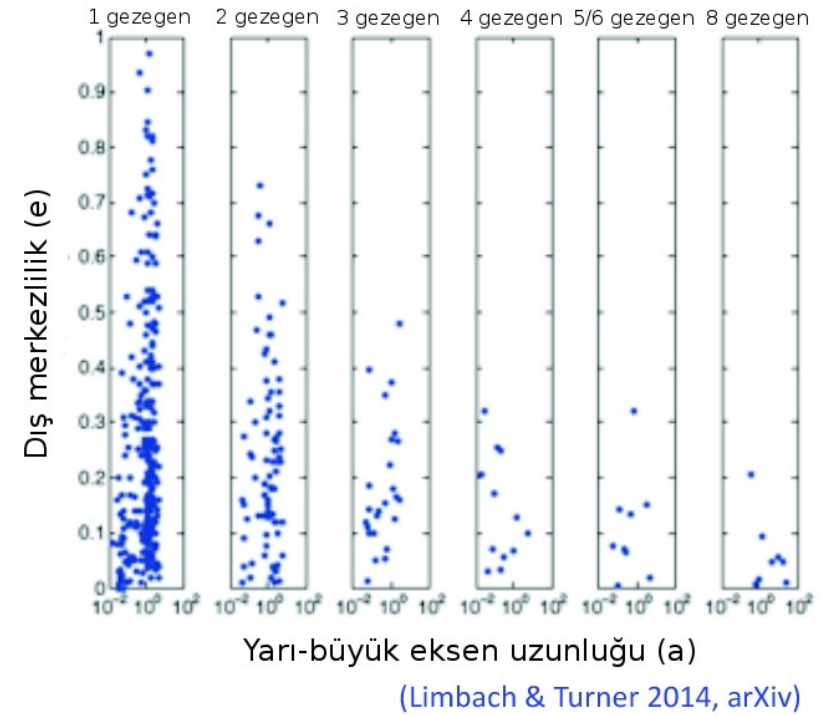
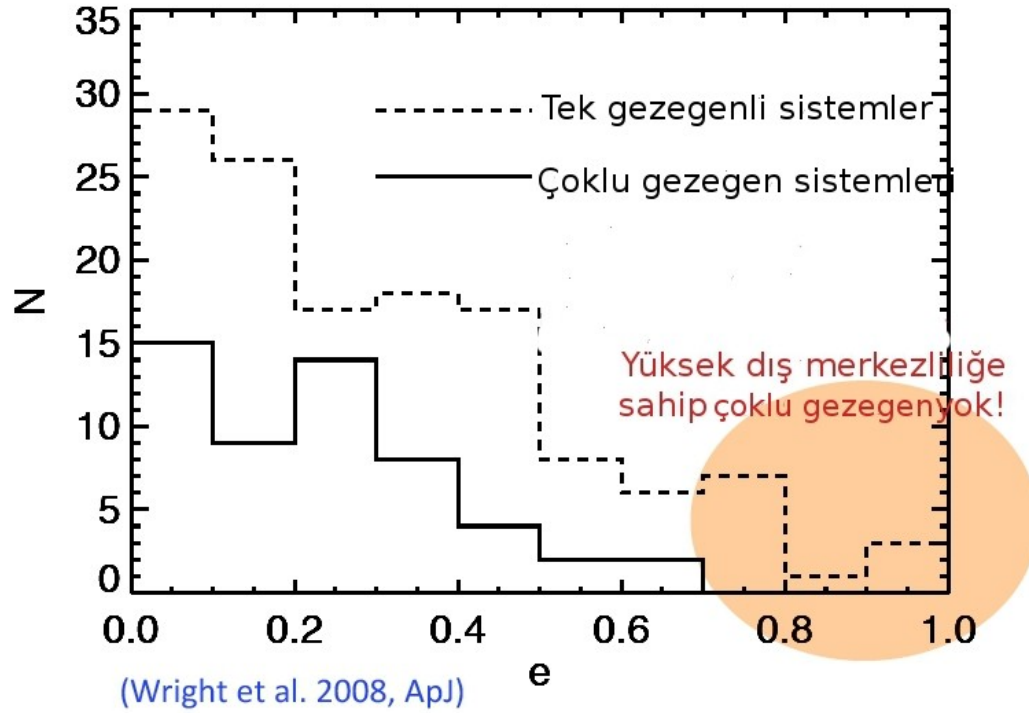
Eğer gezegenin yıldız etrafındaki yörüngesi diğer bileşenle yörüngesine göre büyük bir eğim açısına ($> 40^\circ$) sahipse açısal momentumun korunumu gereği gezegenin yörüngesi yüksek dış merkezlilik ve eğim açısıyla, düşük dış merkezlilik ve eğim açısı arasında salınır. Bu mekanizma **Kozai (-Lidov)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



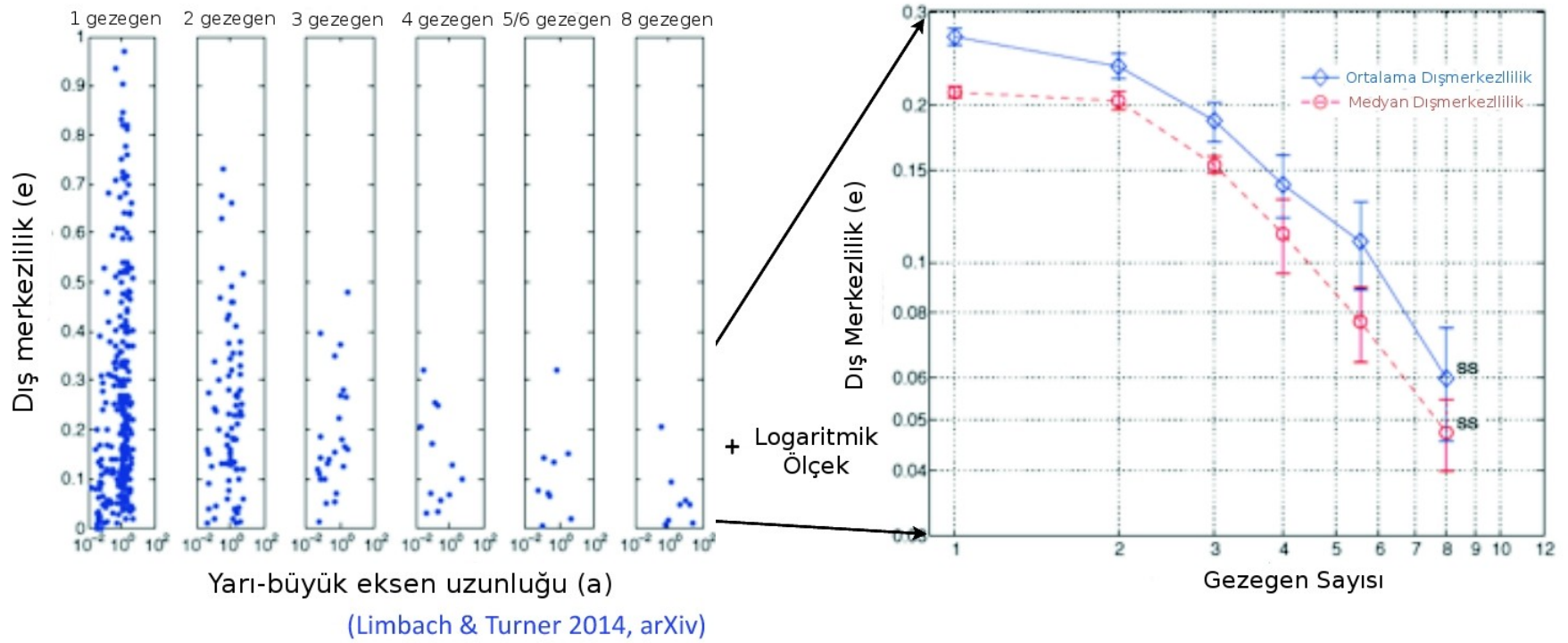
Sonuç 17: Küçük kütleli gezegenlerin dış merkezlilikleri de küçük!

- 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 merkezliklerinin ortalama ve medyanları (logaritmaları) alınarak dilimdeki gezegen sayılarına karşı çizdirildiğinde sağdaki şekil edilmiştir.

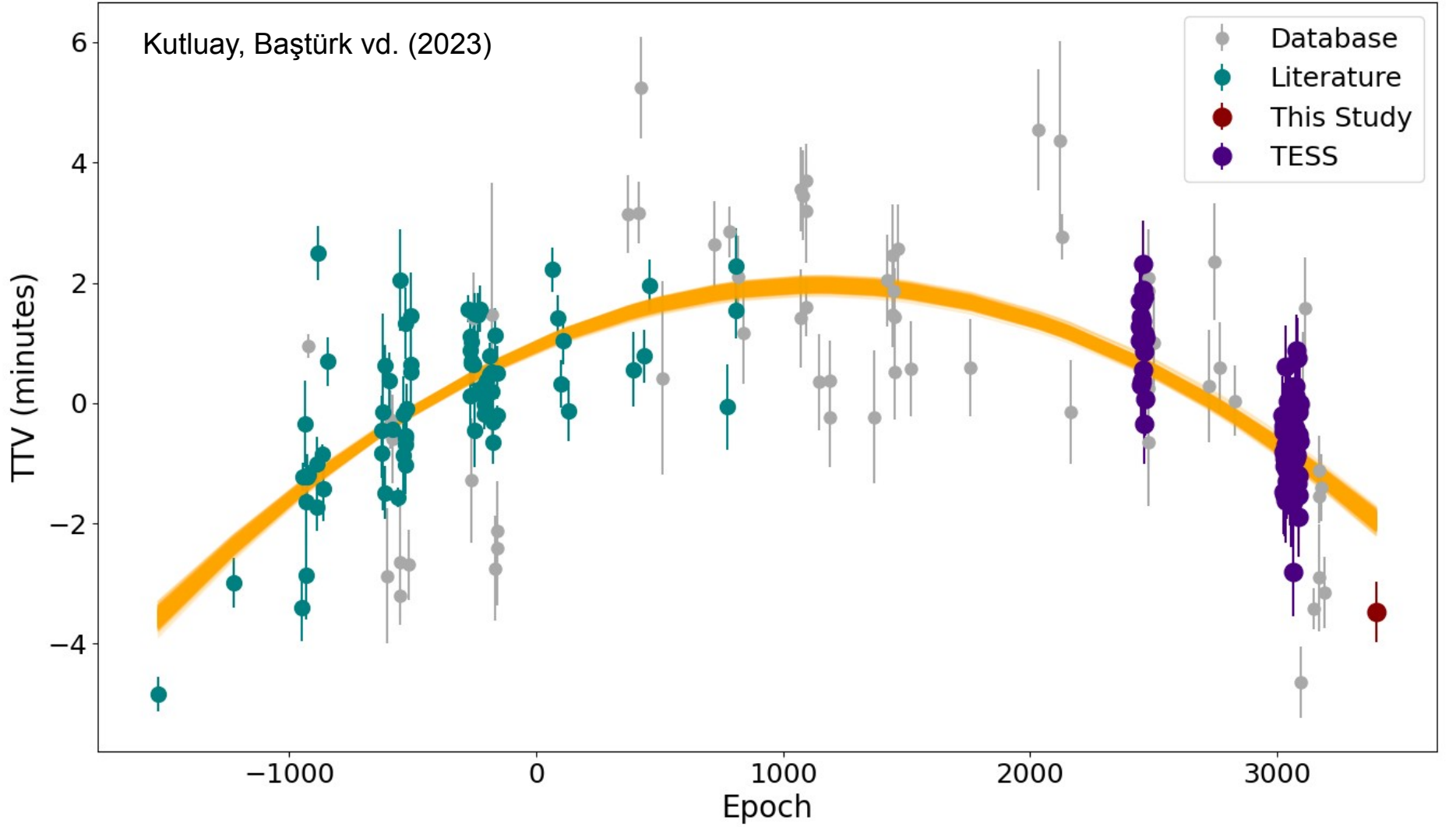
Sonuç 18: Çoklu sistemlere gidildikçe yörünge dışmerkezliliği azalır!

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.

Sonuç 19: Farklı tür gezegenler farklı göç senaryoları ile göç eder.

Bu durum iki önemli göç senaryosundan Kozai-Lidov mekanizmasının sıcak-Jüpiterler gibi dev gaz gezegenler, diskle etkileşimli göç senaryosunun (Tip-I göç) ise kompakt, çoklu sistemler için daha etkin olduğu şeklinde yorumlanmaktadır.

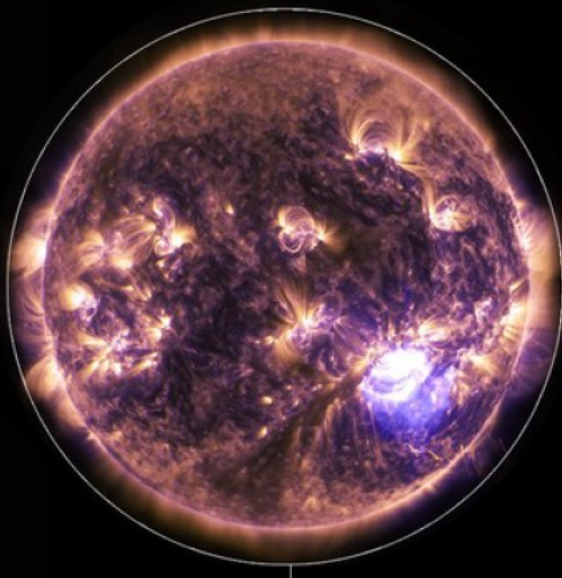


Sıcak-Jüpiterlerin özellikle Kozai-Lidov çevrimleriyle oluştukları buz çizgisinin ötesinden yıldızlarına çok yakın konumlara geldikleri düşünülmekte; bunun için bu sistemlere yakın, bu çevrime neden olabilecek üçüncü bileşenler aranmaktadır (Knutson vd. 2014). Gezegenler göç sonucu geldikleri bu yakın konumlarında yıldızlarıyla kuvvetli çekim etkileri sonucunda açısal momentum kaybederek, yörünge dönemleri küçülmekte ve bir süre sonra yıldızlarının üzerine düşebilmektedir (Wienberg vd. 2023). WASP-12 b yörünge kısalmasının gözlemlendiği tek gezegenken (Kutluay vd. 2023), ZTF SLRN2020 sisteminde bir gezegenin yıldızı tarafından "yutulmakta" olduğu kırmızı bölgede gözlemlenmiştir (De vd. 2023). **Sonuç 20:** Yapılan geçiş zamanlaması değişimi (TTV) çalışmaları sıcak-Jüpiterlerin yörünge dönemlerinin kısalacağını kanıtlamaya yönelik olarak sürerek (çoğunun) yakınlarında başka gezegen bulunmadığını da göstermektedir.



Kütle – Yarıçap İlişkisi

Kırmızı cüce yıldızlarla, kahverengi cüceler ve dev gaz gezegenler benzer yarıçaplara sahiptir ancak kütleleri ve ışıyım güçleri önemli ölçüde farklıdır!



Güneş

Küçük kütleli
M-yıldızı



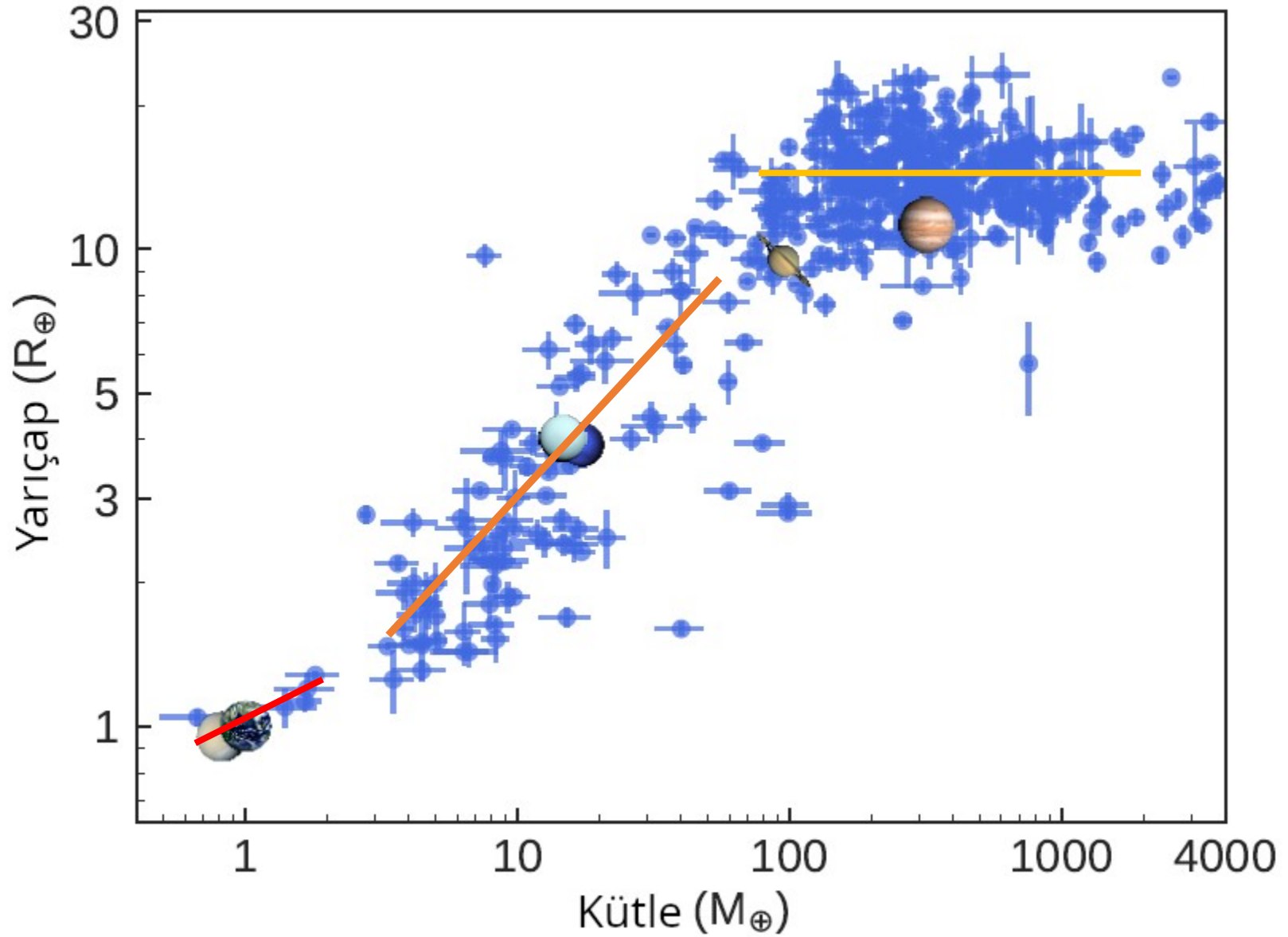
Kahverengi
cüce



Jüpiter

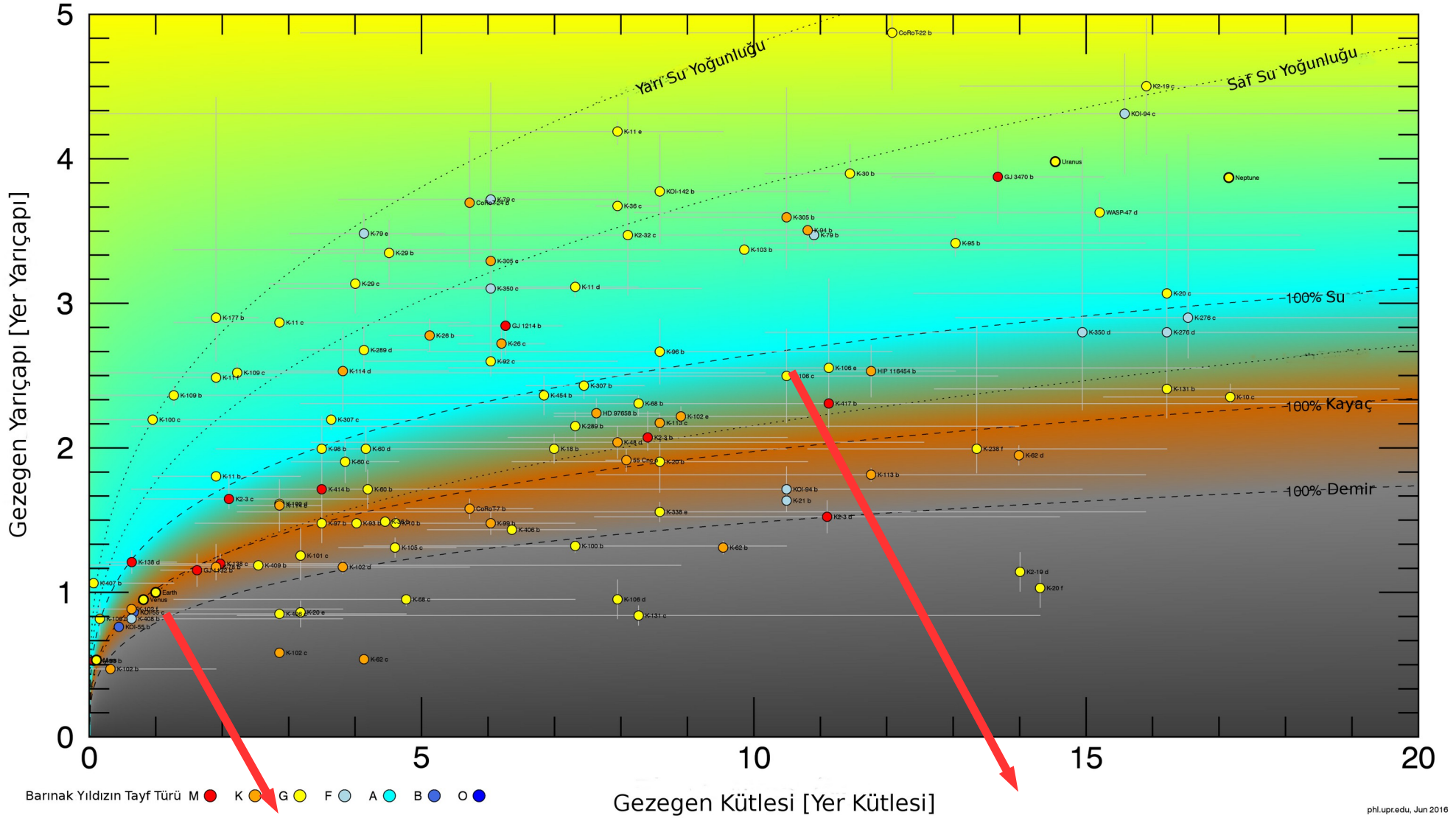


Dünya



Sonuç 22: Kütle-yarıçap ilişkisi her iki parametresi de gözlemsel olarak belirlenebilen geçiş yöntemiyle keşfedilmiş gezegenler için oluşturulduğunda karasal gezegenler için iyi bir ilişkin olduğu, saçılması artmakla ve eğimi değişmekle birlikte super-Dünyalar ve mini-Neptünler için de böyle bir ilişkinin varlığından söz edilebilir. İlişki dev gaz gezegenler için ortadan kalkmakta, kahverengi cüceler için negatif korelasyona dönmektedir (Adibekyan 2019).

Gezegen Kompozisyonu

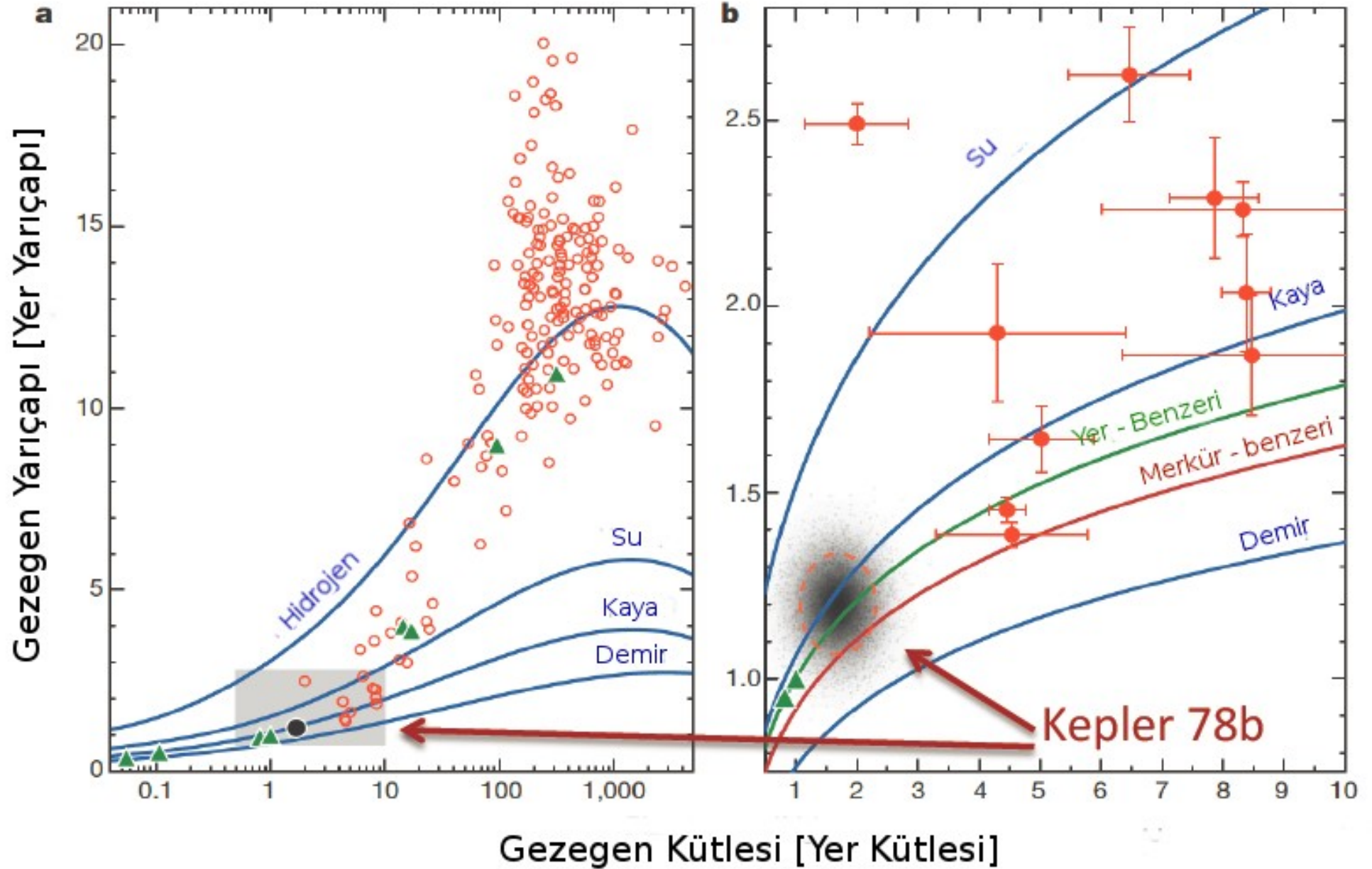


Karasal gezegenlerin bulunduğu bu bölgede ise hala yeterli örneğe sahip değiliz. Bu nedenle bu bölgedeki cisimlerin nasıl oluştuğu ve Güneş Sistemi'ndeki bu tür gezegenlerle, başka sistemlerdekililer arasında nasıl bir ilişki bulunduğunu henüz yeterince anlayamıyoruz!

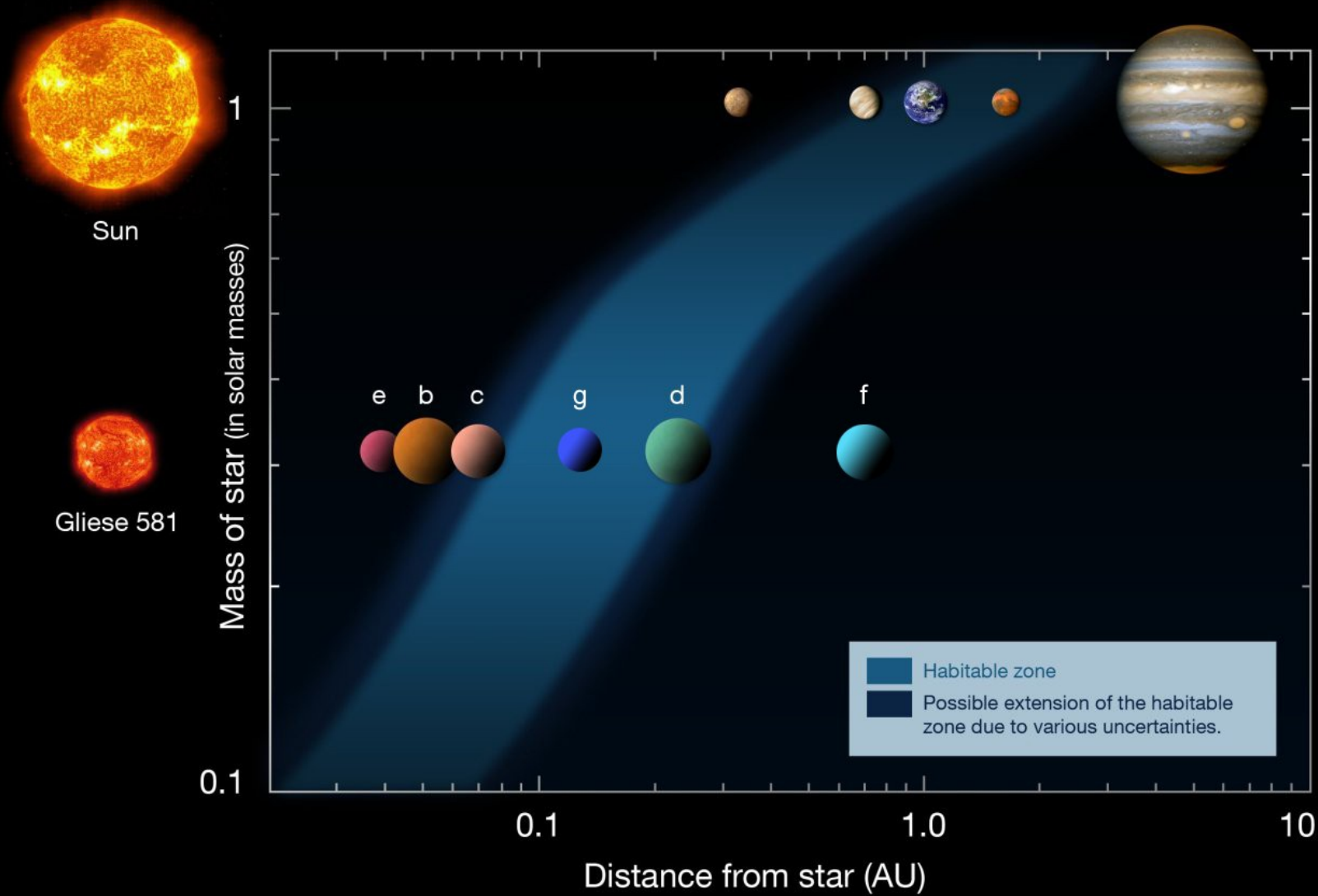
Geçiş gözlemleriyle bu bölgeyi neredeyse doldurmuş durumdayız. Artık bu cisimleri topluca değerlendirebilmek ve aralarındaki ilişkileri kurabilmek için yeterli veriye sahibiz!

Ötegezegenler İçin Kütle / Yarıçap İlişkisi

Howard vd. (2013)



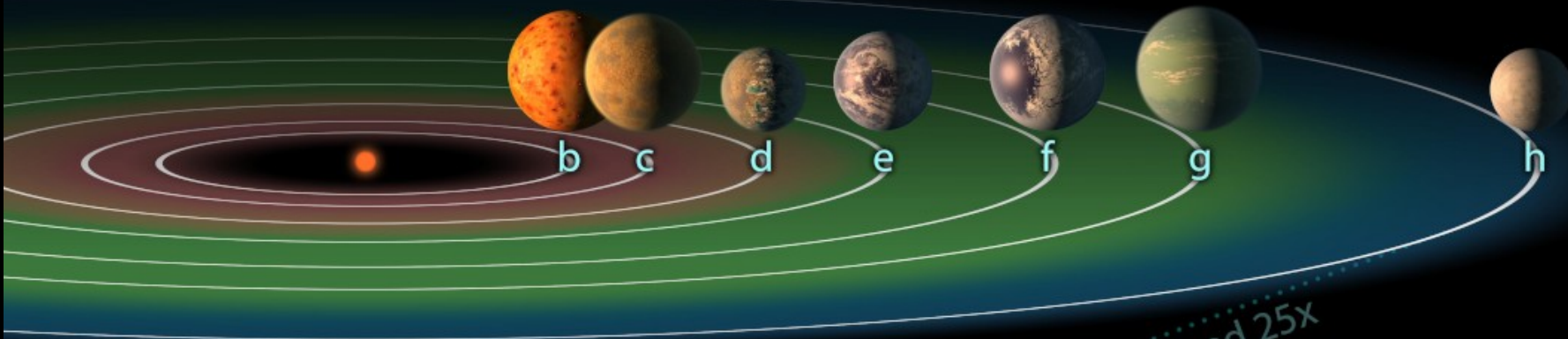
Yaşanabilir Bölge



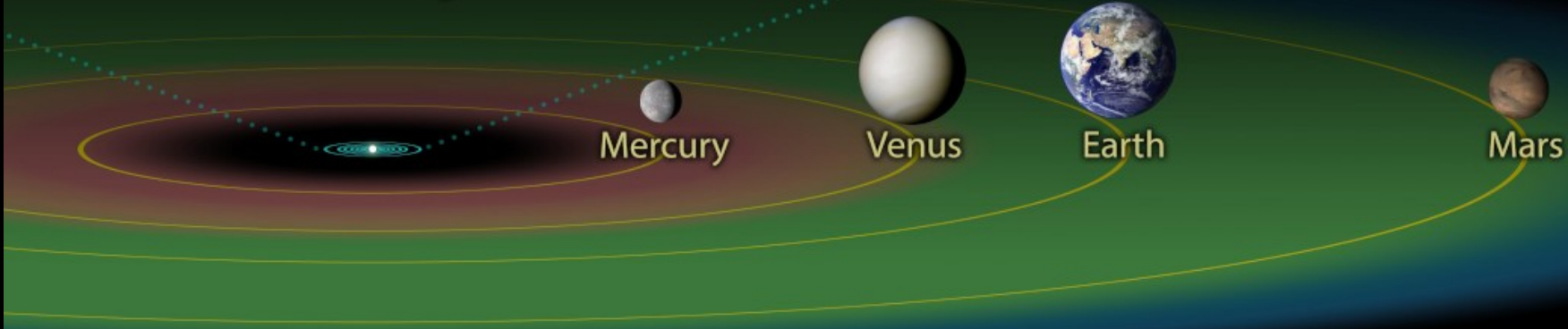
Yaşanabilir bölge, suyun sıvı formda bulunabileceği yıldızdan uzaklık aralığına verilen isimdir. Yıldız bir karacisim varsayılarak denge sıcaklığının 0 ile 100 °C olduğu uzaklık aralığı üzerinden hesaplanır. Sıcak yıldızların yaşanabilir bölgeleri yıldız uzakken, soğuk yıldızlarınkı daha yakındır. Bu uzaklık aralığı yıldız evrimiyle değiştiği gibi bu bölgede bulunan bir gezegende yaşam olmasını da garanti etmez. Öncelikle gezegenin karasal olması ve yaşamı destekleyecek de bir atmosfere sahip olması gerekir.

TRAPPIST-1 System

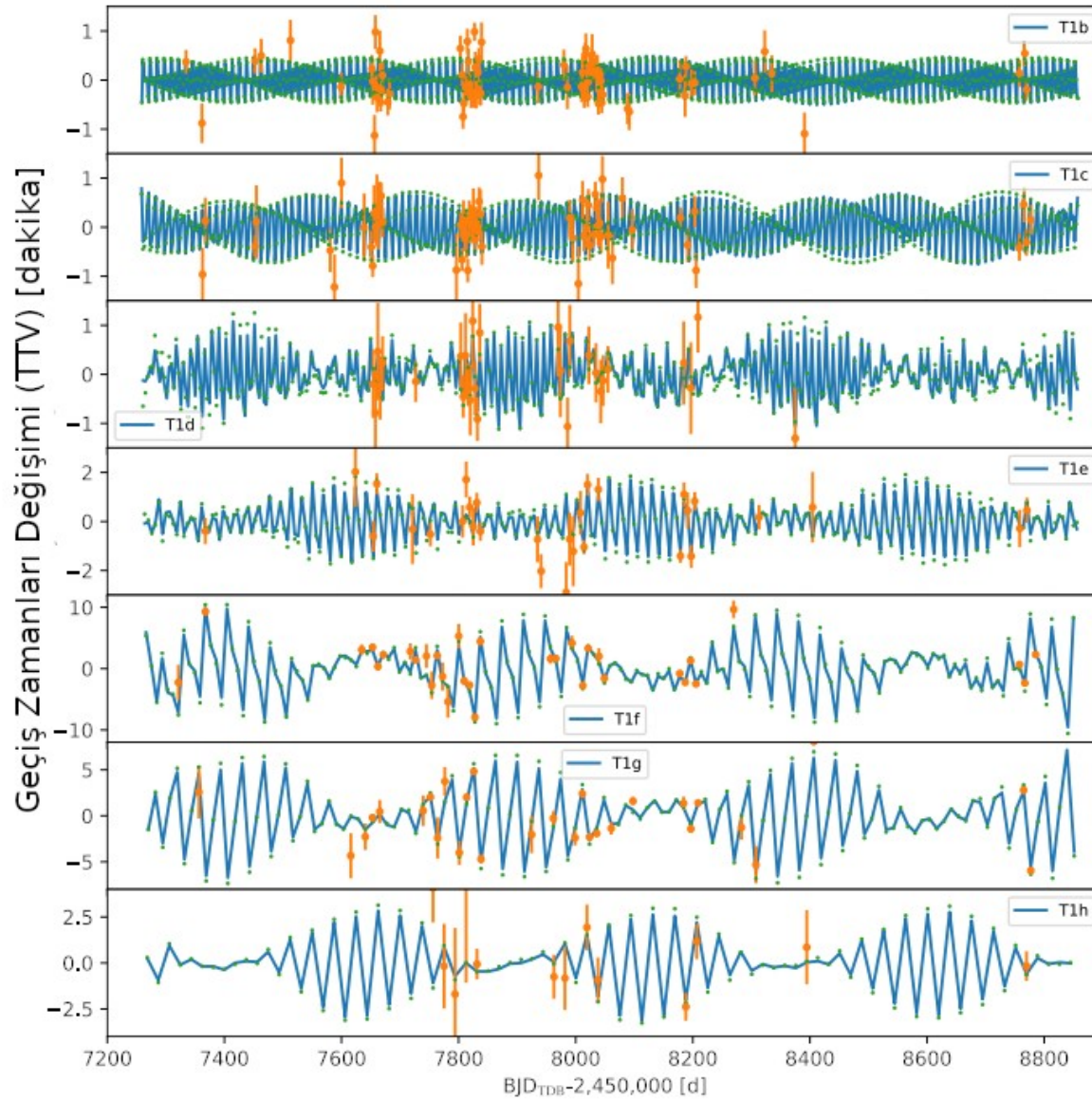
© NASA



Inner Solar System



M tayf türünden bir cüce yıldızın etrafındaki 7-gezegenli TRAPPIST-1 sisteminin karasal olduğu tahmin edilen 2 gezegeni yıldız soğuk olduğu için ona çok yakın olsalar da yaşanabilir bölge sınırları içindedir. Ancak TRAPPIST-1 yıldızının kuvvetli flare (parlama) olguları göstermesi bu gezegenlerin varsa bile atmosferlerinin manyetik aktivite tarafından "soyulmuş" olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca bu kadar yakındaki gezegenlerin kuvvetli tedirginlik etkileşimleri sonucu yıldızlarına hep aynı yüzlerini gösterecek şekilde dönme / dolanma kilitlenmesinde bulundukları da tahmin edilmektedir. Tüm bu koşullar TRAPPIST-1 sistemi gezegenlerinde yaşam olasılığını azaltmaktadır.

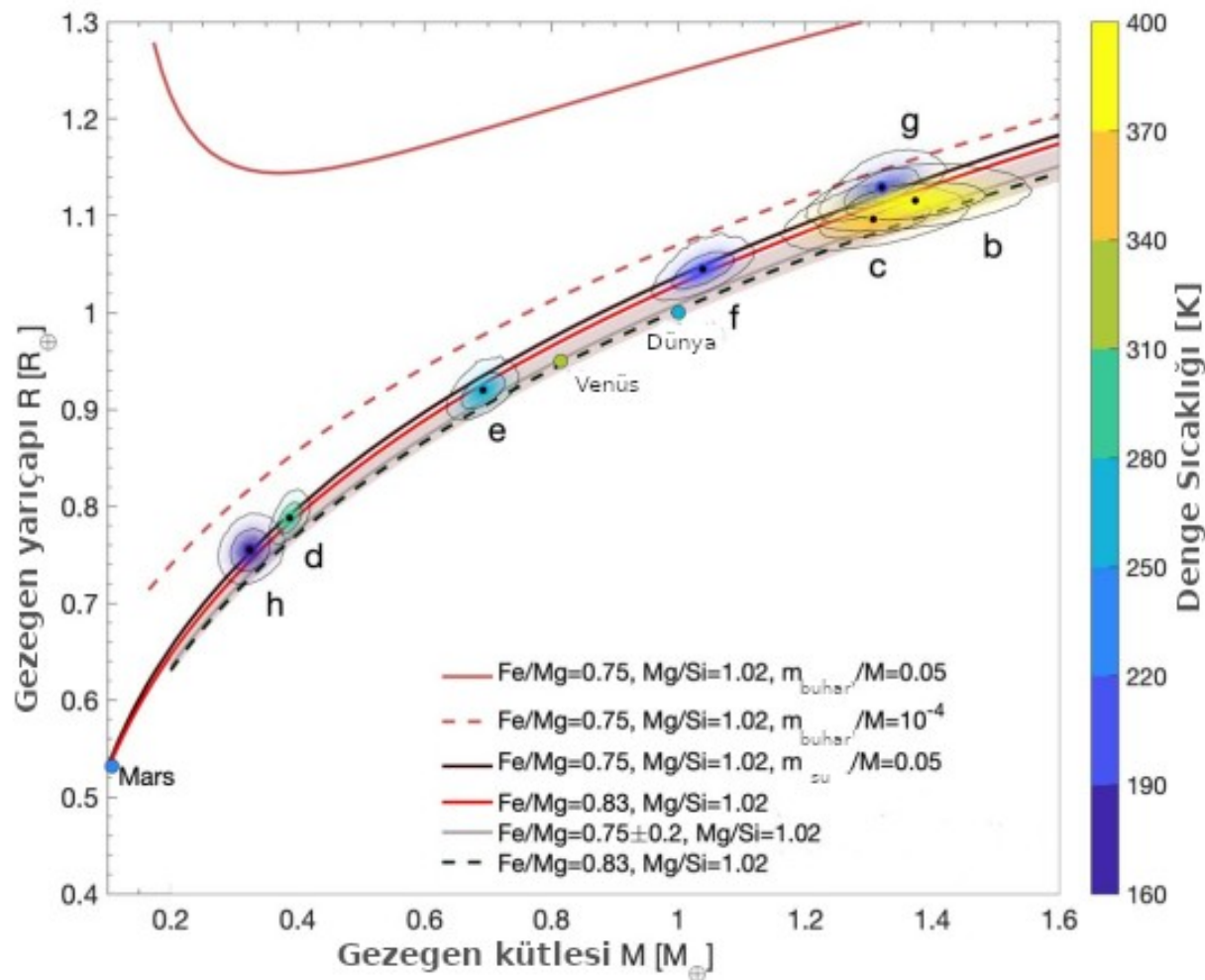


Agol vd. (2021)

	$\mu \left(\frac{M_p}{0.09 M_\oplus} \right) = \frac{M_p}{M_\oplus} \left(\frac{0.09 M_\oplus}{M_*} \right)$	M_p [$10^{-5} M_*$]	$\frac{\sigma_p}{\mu}$ %	P (day)	t_0 (BJD _{TDB} -2,450,000)	$e \cos \omega$	$e \sin \omega$
b	1.377 ± 0.0593	4.596 ± 0.198	4.3	$1.510\,826 \pm 0.000006$	$7\,257.550\,44 \pm 0.00015$	-0.00215 ± 0.00332	$0.002\,17 \pm 0.00244$
c	1.310 ± 0.0453	4.374 ± 0.151	3.5	$2.421\,937 \pm 0.000018$	$7\,258.587\,28 \pm 0.00027$	$0.000\,55 \pm 0.00232$	$0.000\,01 \pm 0.00171$
d	0.388 ± 0.0074	1.297 ± 0.025	1.9	$4.049\,219 \pm 0.000026$	$7\,257.067\,68 \pm 0.00067$	-0.00496 ± 0.00186	$0.002\,67 \pm 0.00112$
e	0.693 ± 0.0128	2.313 ± 0.043	1.8	$6.101\,013 \pm 0.000035$	$7\,257.827\,71 \pm 0.00041$	$0.004\,33 \pm 0.00149$	-0.00461 ± 0.00087
f	1.041 ± 0.0155	3.475 ± 0.052	1.5	$9.207\,540 \pm 0.000032$	$7\,257.074\,26 \pm 0.00085$	-0.00840 ± 0.00130	-0.00051 ± 0.00087
g	1.323 ± 0.0171	4.418 ± 0.057	1.3	$12.352\,446 \pm 0.000054$	$7\,257.714\,62 \pm 0.00103$	$0.003\,80 \pm 0.00112$	$0.001\,28 \pm 0.00070$
h	0.326 ± 0.0186	1.088 ± 0.062	5.7	$18.772\,866 \pm 0.000214$	$7\,249.606\,76 \pm 0.00272$	-0.00365 ± 0.00077	-0.00002 ± 0.00044

TRAPPIST-1 Sisteminin TTV'si

Solda TRAPPIST-1 sistemindeki tüm gezegenlerin birbirlerine uyguladıkları çekim kuvvetleri kaynaklı tedirginlik etkileri sonucu oluşan geçiş zamanları değişimi, aşağıdaki tabloda TTV analiziyle ulaşılan kütle ve yörünge parametresi değerleri görülmektedir. TRAPPIST-1'in tüm gezegenleri geçiş yaptığı için yarıçapları da belirlenebilmektedir. Bu durum tüm gezegenler için yarıçapın geçiş modellerinden, kütlelerin TTV'den belirlenebildiği TRAPPIST-12i şu an için eşsiz bir sistem konumuna getirmektedir. Hassas geçiş gözlemlerine dayalı zamanlama ölçümleri yerden büyük teleskoplar ve uzaydan Hubble, CHEOPS, TESS ve Spitzer gibi teleskoplar kullanılarak yapılmıştır.

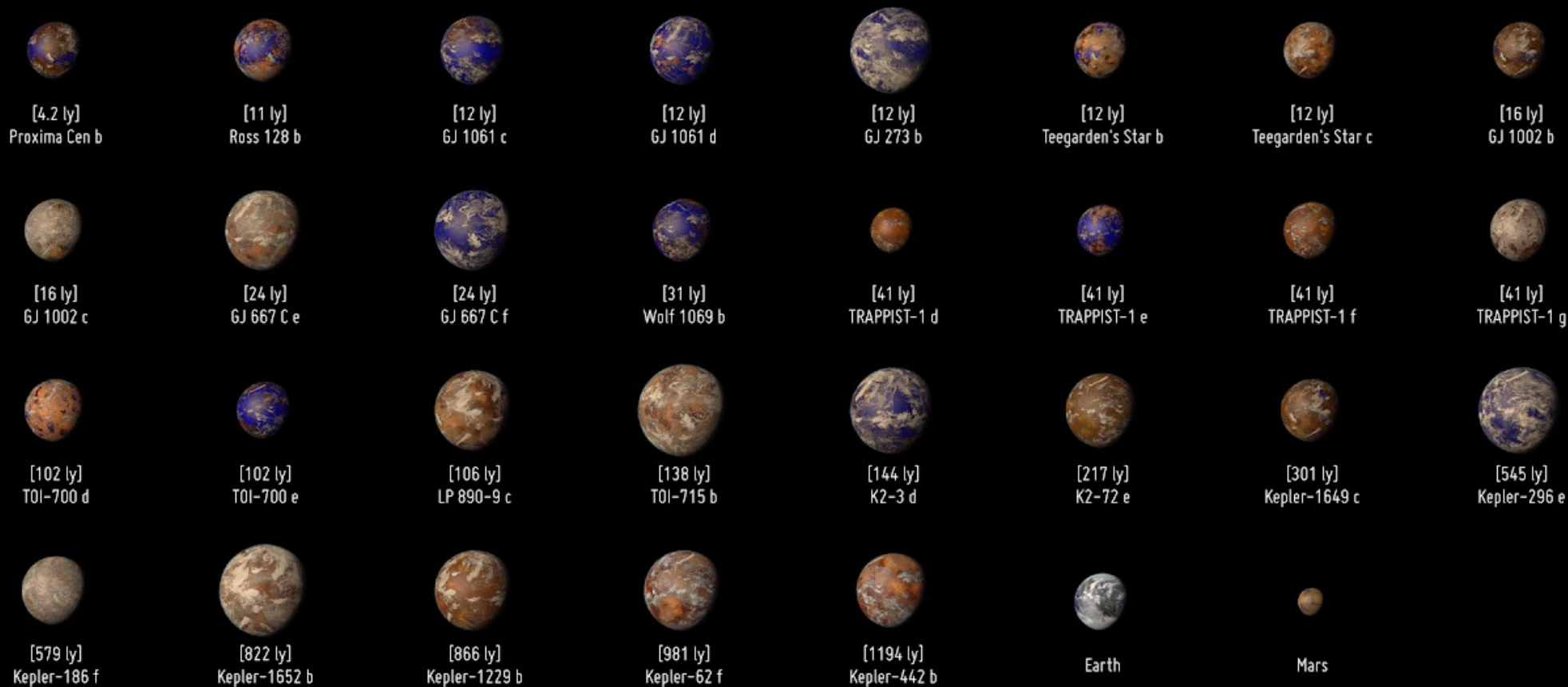


TRAPPIST-1 Gezegenleri

TRAPPIST-1 sisteminin geçiş ve TTV analizleri, tüm gezegenlerin duyarlı yarıçap ve kütlelerini, buna bağlı olarak ortalama yoğunluklarını verdiği için mevcut gezegen modelleriyle ne tür bir iç yapıya ve kimyasal kompozisyona sahip olabilecekleri araştırılabilmiştir. TRAPPIST-1 gezegenlerinin bugüne kadar yapılan JWST gözlemleri atmosferleri konusunda pek fikir vermese de kalın birer atmosfere sahip olmadığı düşünülmektedir (Jegug Ih vd. 2023 Lim vd. 2023, Lincowski vd. 2023, Krissansen-Totton 2023).

Gezegen	b	c	d	e	f	g	h
$R (R_{\oplus})$	$1.116^{+0.014}_{-0.012}$	$1.097^{+0.014}_{-0.012}$	$0.788^{+0.011}_{-0.010}$	$0.920^{+0.013}_{-0.012}$	$1.045^{+0.013}_{-0.012}$	$1.129^{+0.015}_{-0.013}$	$0.755^{+0.014}_{-0.014}$
$M (M_{\oplus})$	1.374 ± 0.069	1.308 ± 0.056	0.388 ± 0.012	0.692 ± 0.022	1.039 ± 0.031	1.321 ± 0.038	0.326 ± 0.020
$\rho (\rho_{\oplus})$	$0.987^{+0.048}_{-0.050}$	$0.991^{+0.040}_{-0.043}$	$0.792^{+0.028}_{-0.030}$	$0.889^{+0.030}_{-0.033}$	$0.911^{+0.025}_{-0.029}$	$0.917^{+0.025}_{-0.029}$	$0.755^{+0.059}_{-0.055}$
$g (g_{\oplus})$	1.102 ± 0.052	1.086 ± 0.043	0.624 ± 0.019	0.817 ± 0.024	0.951 ± 0.024	1.035 ± 0.026	0.570 ± 0.038
$v_{esc} (v_{esc,\oplus})$	1.109 ± 0.026	1.092 ± 0.022	0.701 ± 0.010	0.867 ± 0.012	0.997 ± 0.012	1.081 ± 0.013	0.656 ± 0.020
$S (S_{\oplus})$	$4.153^{+0.161}_{-0.159}$	$2.214^{+0.086}_{-0.085}$	$1.115^{+0.043}_{-0.043}$	$0.646^{+0.025}_{-0.025}$	$0.373^{+0.015}_{-0.014}$	$0.252^{+0.010}_{-0.010}$	$0.144^{+0.006}_{-0.006}$
$a (10^{-2} \text{ au})$	1.154 ± 0.010	1.580 ± 0.013	2.227 ± 0.019	2.925 ± 0.025	3.849 ± 0.033	4.683 ± 0.040	6.189 ± 0.053
$R (10^8 \text{ cm})$	$7.119^{+0.087}_{-0.077}$	$6.995^{+0.086}_{-0.077}$	$5.026^{+0.071}_{-0.066}$	$5.868^{+0.082}_{-0.075}$	$6.664^{+0.085}_{-0.077}$	$7.204^{+0.094}_{-0.085}$	$4.817^{+0.091}_{-0.088}$
$M (10^{27} \text{ g})$	8.211 ± 0.412	7.814 ± 0.335	2.316 ± 0.074	4.132 ± 0.130	6.205 ± 0.184	7.890 ± 0.226	1.945 ± 0.122
$\rho (\text{g cm}^{-3})$	$5.425^{+0.265}_{-0.272}$	$5.447^{+0.222}_{-0.235}$	$4.354^{+0.156}_{-0.163}$	$4.885^{+0.168}_{-0.182}$	$5.009^{+0.138}_{-0.158}$	$5.042^{+0.136}_{-0.158}$	$4.147^{+0.322}_{-0.302}$
$g (10 \text{ m s}^{-2})$	1.080 ± 0.051	1.065 ± 0.042	0.611 ± 0.019	0.801 ± 0.024	0.932 ± 0.024	1.015 ± 0.025	0.558 ± 0.037
$v_{esc} (\text{km s}^{-1})$	12.400 ± 0.292	12.205 ± 0.241	7.839 ± 0.110	9.694 ± 0.133	11.145 ± 0.137	12.087 ± 0.142	7.335 ± 0.227
$S (10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$	$5.652^{+0.220}_{-0.216}$	$3.013^{+0.117}_{-0.115}$	$1.518^{+0.059}_{-0.058}$	$0.879^{+0.034}_{-0.034}$	$0.508^{+0.020}_{-0.019}$	$0.343^{+0.013}_{-0.013}$	$0.196^{+0.008}_{-0.008}$
$a (10^{11} \text{ cm})$	1.726 ± 0.015	2.364 ± 0.020	3.331 ± 0.028	4.376 ± 0.037	5.758 ± 0.049	7.006 ± 0.060	9.259 ± 0.079

Potentially Habitable Worlds

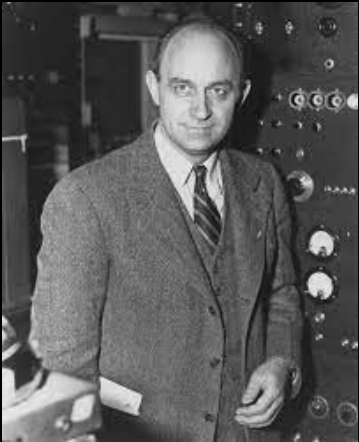


Artistic representations. Earth and Mars for scale.
Planets are organized in order of their increasing distance from Earth (shown between brackets in light-years).

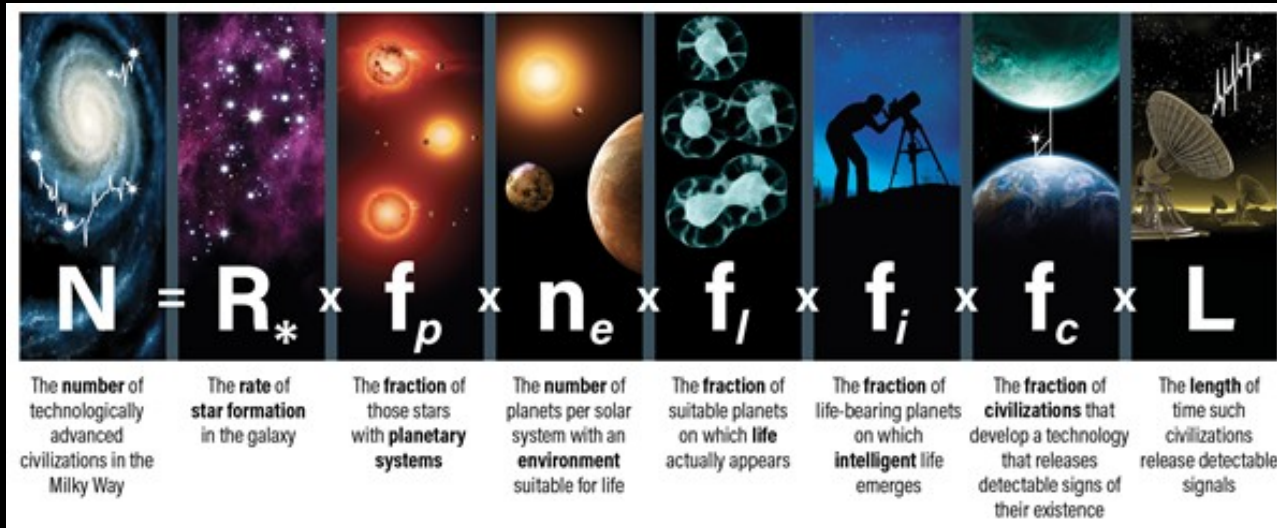
CREDIT: The Habitable Worlds Catalog, PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Jan 2024

Fermi Paradoksu: Sadece galaksimizde 400 milyar yıldız olduğu ve neredeyse yıldız başına en az bir gezegen düştüğü düşünülürse bu kadar gezegen ve yeterince zaman (13.5 milyar yıl!) varken yıldızlararası yolculuk yapabilecek ya da iletişime açık milyarlarca uygarlık olmalı. Peki o zaman bu uygarlıklar neredeler?

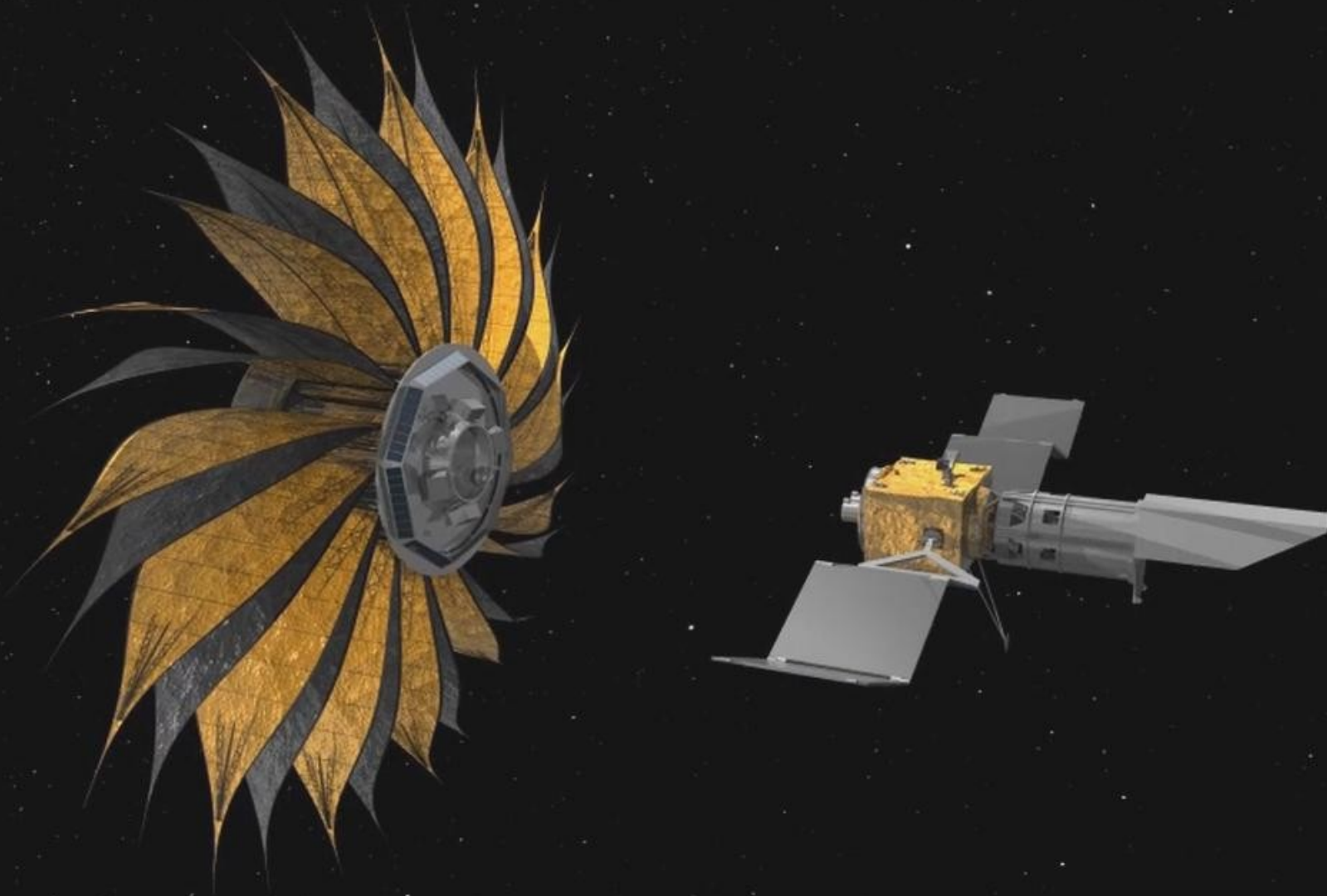
Drake Denklemi: Galaksimizdeki yıldız oluşum hızı (R_*), gezegen barındıran yıldızların tüm yıldız sayısına oranı (f_p), gezegenli sistemlerde yıldız başına gezegen sayısı (n_e), bu gezegenlerden yaşamı destekleyebilecek olanların oranı (f_l), yaşam barındırabilecek bu gezegenlerden “zeki” yaşamı destekleyebileceklerin oranı (f_i), bu yaşam formlarından iletişim geliştirebilecek ve buna açık olanların oranı (f_c) ve bu “zeki” türlerin yaşam sürelerinden (L) hareketle galaksimizde iletişim kurulabilecek uygarlık sayısını veren denklemdir. Kötümser hesaplar bunun 0, iyimser hesaplar milyarlarca olduğunu söylüyor!



Enrico Fermi

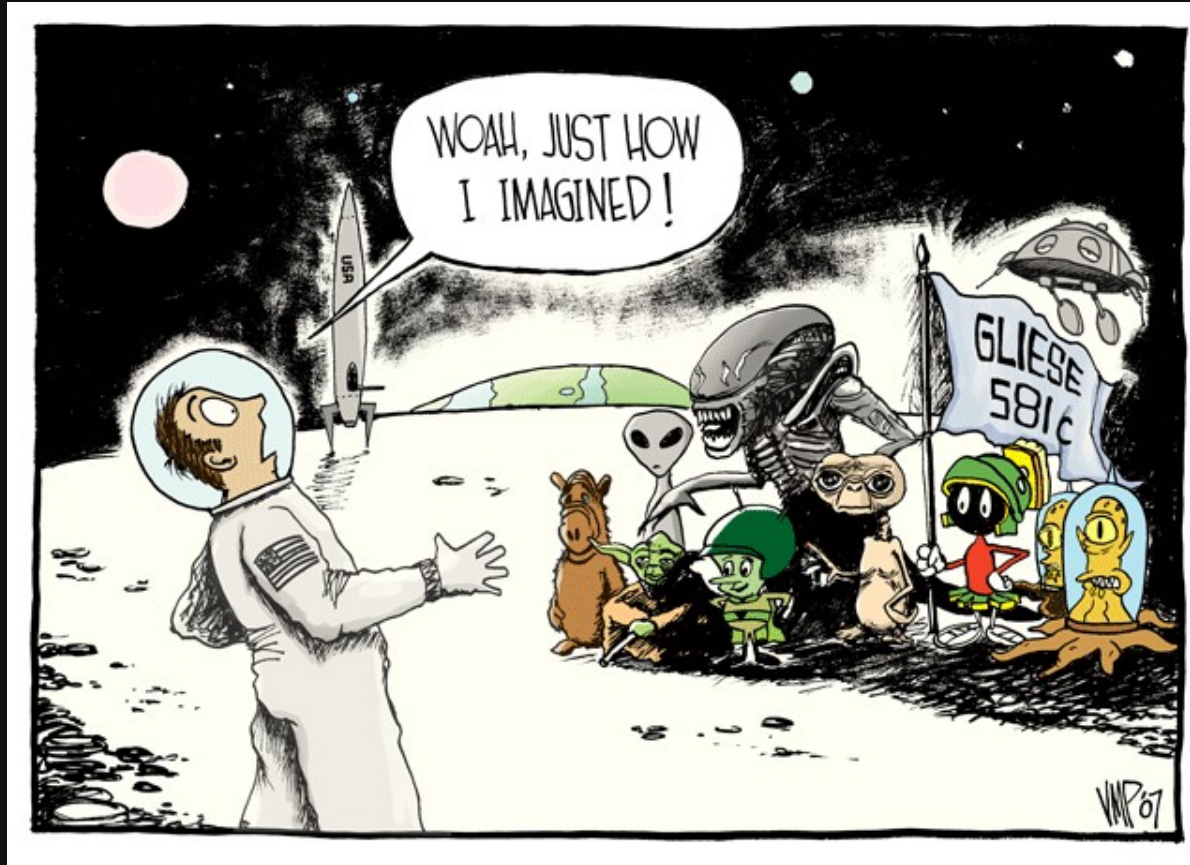


Frank Drake



Habitable Worlds Observatory, 204?

Geçiş tayf ölçümüyle Yer-benzeri gezegenlerin atmosferlerini çalışmaya olanak sağlayacak hassasiyete inilmesi zor olduğundan, teleskoptan uzağa yerleştirilecek bir mekanik koronograf kullanılarak (star shade) yüksek kontrastlı (10^{-10}) doğrudan görüntülemeyle Yer-benzeri gezegen arama çalışması planlanmaktadır.



- Tam da hayal ettiğim gibi!

Akıllı Yaşam Arayışları:

Breakthrough: Listen ve Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI)

Yuri Milner ve Stephen Hawking öncülüğünde bir komisyon tarafından fonlanan **“Breeakthrough:Listen”** projesi, Dünya’nın en büyük radyo teleskoplarından aldığı gözlem zamanı ile pek çok galaktik ve ekstragalaktik kaynağı yapay radyo sinyalleri bulabilme ümidiyle gözlemektedir.



Temel olarak teknoloji geliştirmiş, “zeki” bir uygarlığın iletişimini radyo dalgalarıyla kuracağı prensibinden hareketle doğal radyo sinyallerindne kolaylıkla ayrılabilen yatay sinyallerin aranmasına dayalı projenin benzerlerini NASA’nın SETI enstitüsü de uzun süreyle yürütmüştür. Ancak bugüne kadar 15 Ağustos 1977’de alınan, yeniden tekrar edilmeyen ve yapaya benzemekle birlikte ne olduğu anlaşılamayan, teknisyenin kayıt üzerine aldığı “Wow!” notundan hareketle “Wow sinyali” olarak bilinen bir sinyal (üstte en sağda) dışında herhangi bir sonuç alınabilmiş değildir.

"Şu noktaya tekrar bakın. Orası evimiz. O biziz. Sevdığınız ve tanıdığınız, adını duyduğunuz, yaşayan ve ölmüş olan herkes onun üzerinde bulunuyor. Tüm neşemizin ve kederimizin toplamı, binlerce birbirini yalanlayan din, ideoloji ve iktisat öğretisi; insanlık tarihi boyunca yaşayan her avcı ve toplayıcı, her kahraman ve korkak, her medeniyet kurucusu ve yıkıcısı, her kral ve çiftçi, her aşık çift, her anne ve baba, umut dolu çocuk, mucit, kâşif, ahlak hocası, yoz siyasetçi, her süperstar, her "yüce önder", her aziz ve günahkâr onun üzerinde - bir günüşiği huzmesinin üzerinde asılı duran o toz zerresinde.

...

Dünya, üzerinde hayat barındırdığını bildiğimiz tek gezegen. En azından yakın gelecekte, gidebileceğimiz başka yer yok. Ziyaret edebiliriz, ama henüz yerleşemeyiz. Beğenin veya beğenmeyin, şu anda Dünya sığınabileceğimiz tek yer.

Gökbilimin mütevazılaştırıcı ve kişilik kazandıran bir deneyim olduğu söylenir. Belki de insanın kibrinin ne kadar aptalca olduğunu bundan daha iyi gösteren bir fotoğraf yoktur. Bence, birbirimize daha iyi davranma sorumluluğumuzu vurguluyor, ve bu mavi noktaya, biricik yuvamıza."

Carl Sagan

Bu fotoğraf 14 Şubat 1990 yılında Voyager 1 uzay aracı tarafından 6 milyar km. Uzağımızdan çekilmiştir

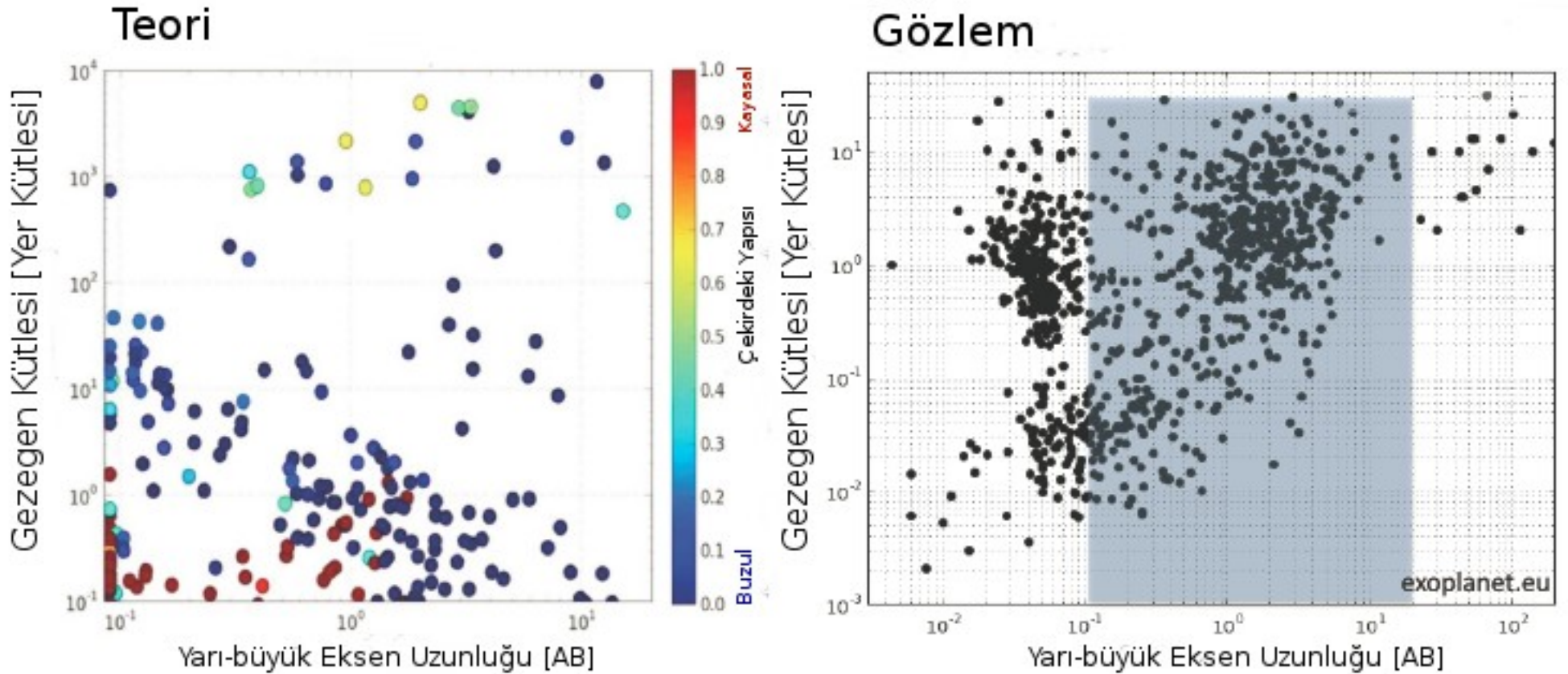
Kaynaklar

- ✓ 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

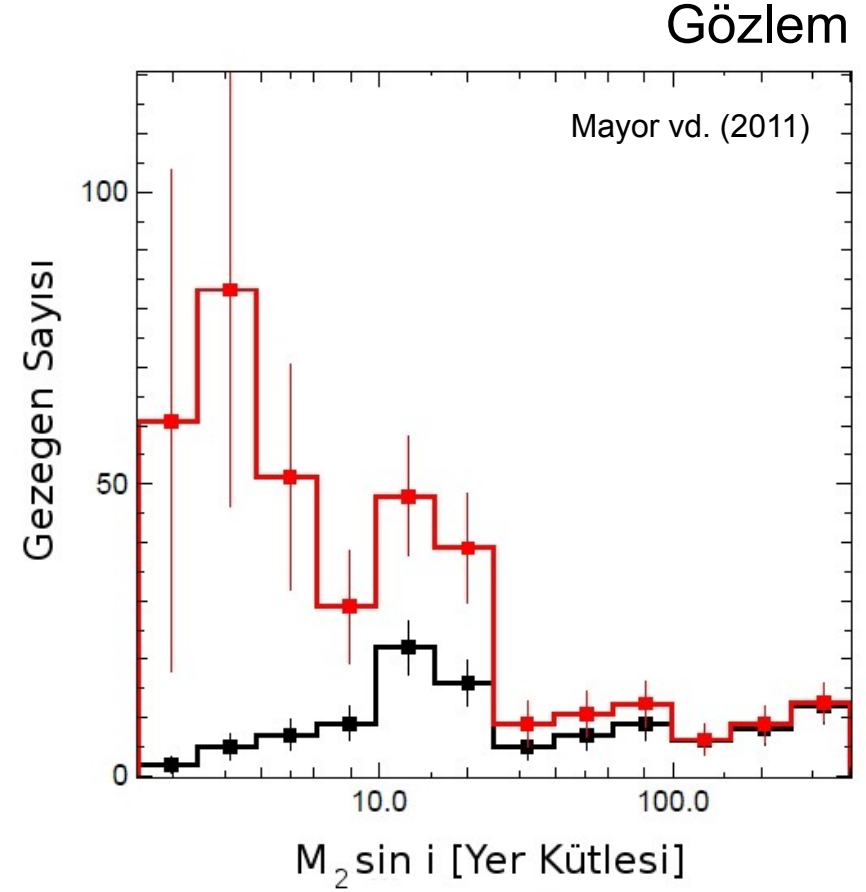
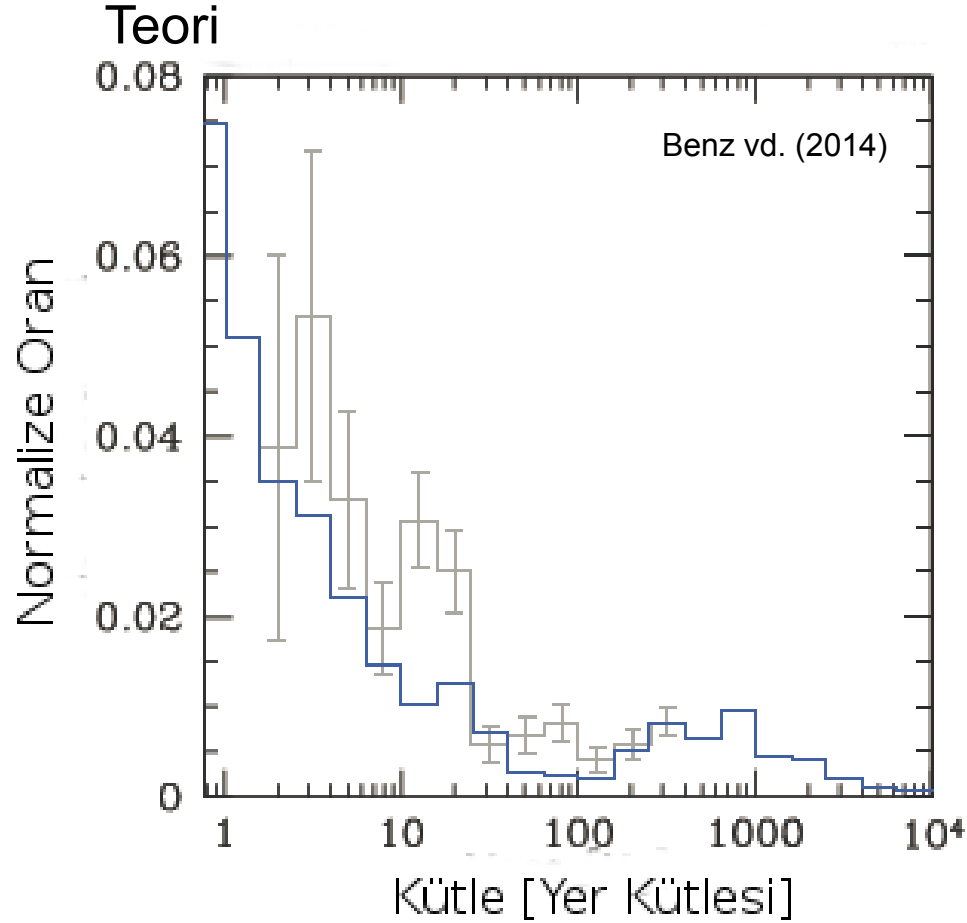
Popülasyon Sentezi: Gözlem-Teori Karşılaştırması – I Kütle-Uzaklık İlişkisi



Solda. Alibert vd. (2013) tarafından Merkezi Yığılma Senaryosu esas alınarak üretilen modelin 5.8 milyon yıl için öngördüğü gezegen popülasyonu

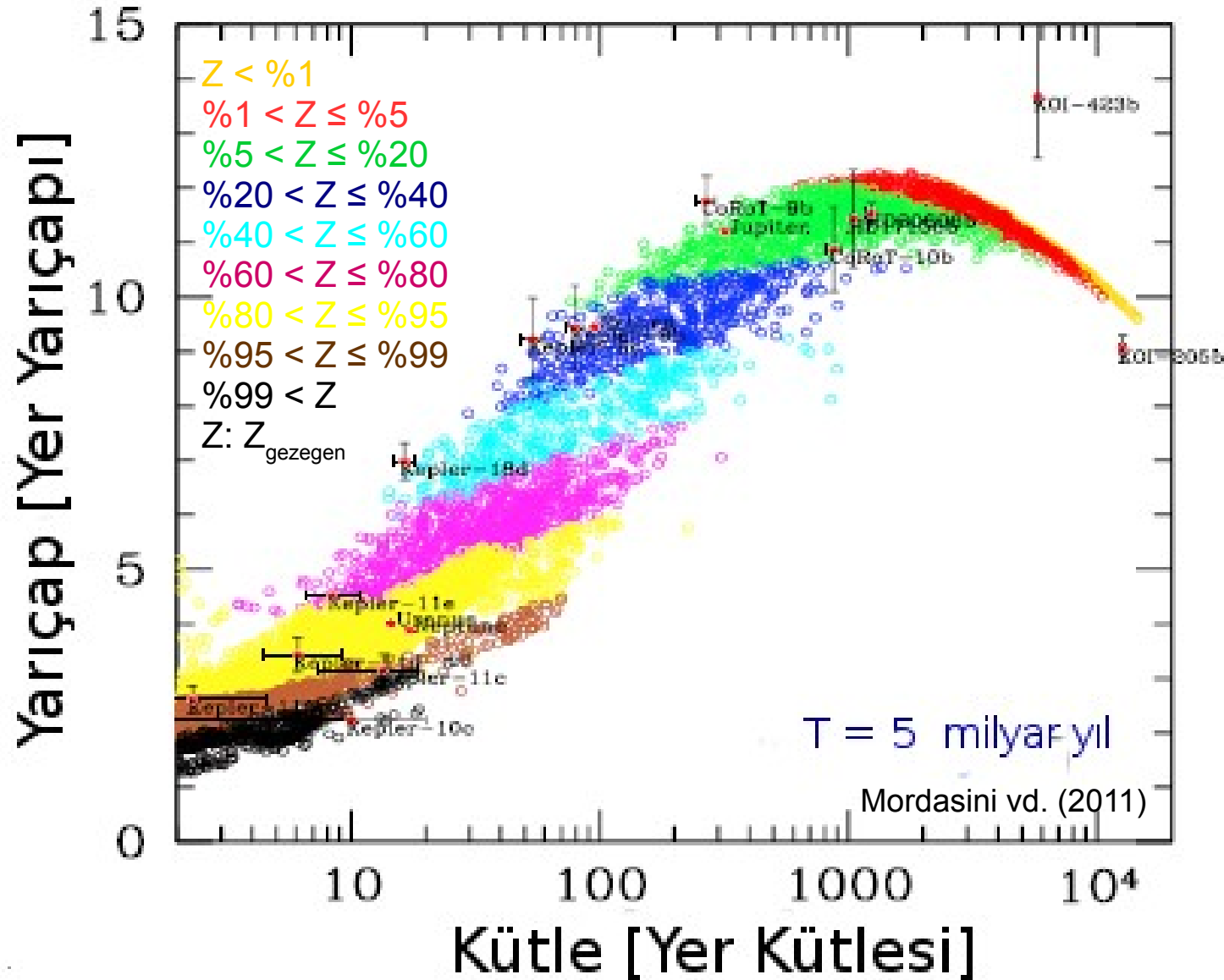
Sağda. exoplanet.eu verileri kullanılarak oluşturulan gözlemsel gezegen popülasyonu. Teorik popülasyonla aynı parametre aralığını içeren bölge maviyle gösterilmiştir.

Popülasyon Sentezi: Gözlem-Teori Karşılaştırması – II Kütle Dağılımı

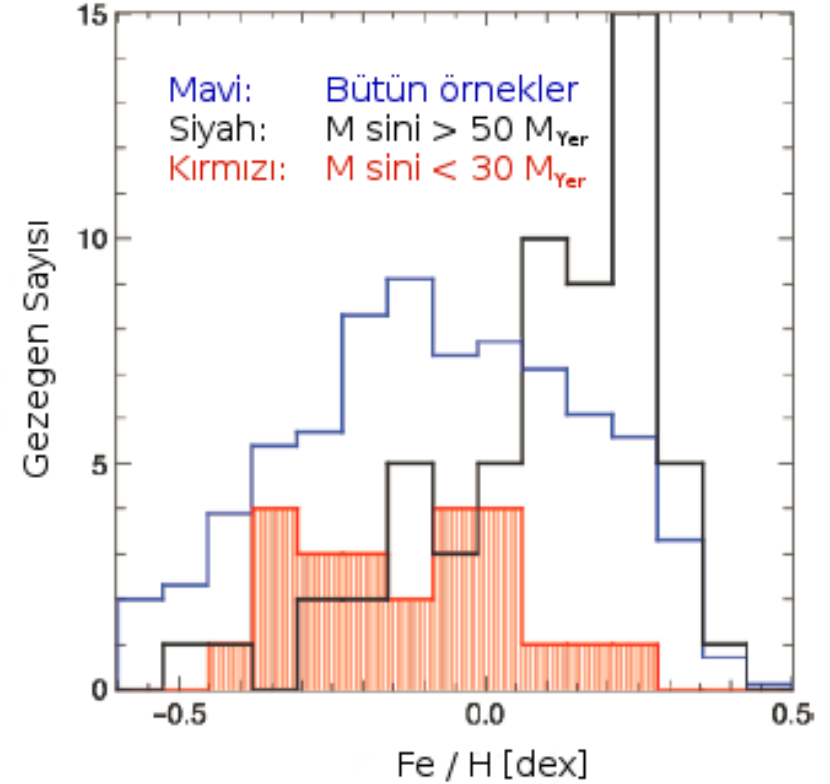
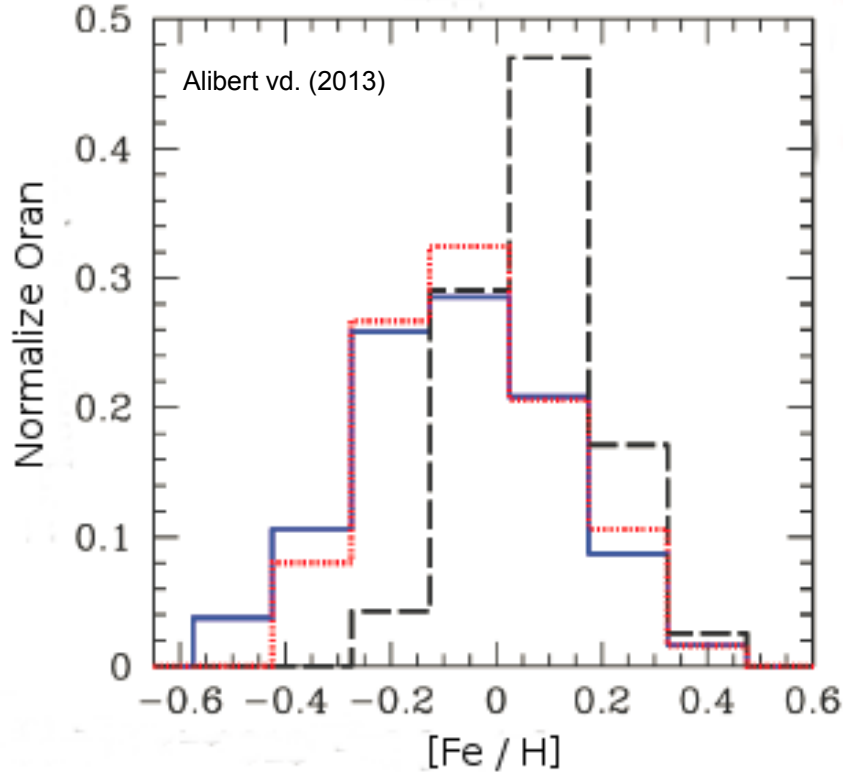


Teorik çalışmalar sonucu elde edilen gezegen popülasyonlarında kütle dağılımı (solda) ile dikine hız gözlemleriyle ulaşılmış ve gözlemsel yanlışlıklardan arındırılmış gözlemsel kütle dağılımı karşılaştırması (sağda, kırmızı). $\sim 50 M_{\text{yer}}$ kütlesinden sonra beklenen sayıca azalma ve küçük 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!

Popölasyon Sentezi: Gözlem-Teori Karşılaştırması – III Kütle-Yarıçap İlişkisi



Popölasyon 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.