

### Astrometric Method

$$\theta'' = \left( \frac{M_p}{M_*} \right) \left( \frac{a}{r} \right) \approx \frac{10^{-3}}{r(\text{pc})} \left[ \frac{P(\text{yr})}{M_*(\odot)} \right]^{2/3} M_p (J)$$

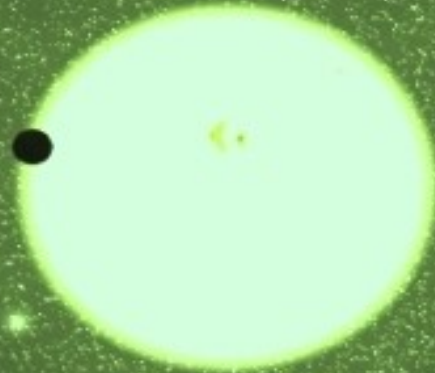
$$V_r (m/s) \approx \frac{30}{[P(\text{yr})]^{1/3}} \frac{M_p (J) \sin i}{[M_*(\odot)]^{2/3}}$$

### Microlensing Method

$$R_E^2 = \frac{4GMD}{c^2}, \quad D = \frac{D_{ds} D_d}{D_s}, \quad t_0 = \frac{R_E}{V_e}$$

$$t_0 = \frac{2D_L \theta_E}{V_L} = \frac{2D_L}{V_L} \sqrt{\frac{4GM(1 - D_d/D_s)}{c^2 D_d}}$$

$$A = \frac{u^2 + 2}{u(u^2 + 4)^{1/2}}, \quad u = \text{impact parameter} \quad B \geq \frac{\lambda D}{r} \approx \left( \frac{\lambda}{10 \mu\text{m}} \right) \left( \frac{D}{10 \text{pc}} \right) \left( \frac{r}{1 \text{AU}} \right)^{-1} m$$



### Radial Velocity Method

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

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

### Direct Detection

### Effective Temperature

$$T_p = \frac{(1 - A)^{1/4}}{\sqrt{2}} \left( \frac{R_*}{r} \right)^{1/2} T_*$$

$$A_{\oplus} \sim 0.39, \quad T_* \sim 5770 \text{K}, \quad r_{\oplus} \sim 1 \text{AU}$$

$$\Rightarrow T_p \sim 280 \text{K} \Rightarrow \text{Greenhouse Effect!}$$

### Transit Method

$$\frac{\Delta F}{F} = \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2, \quad t = \frac{P_p}{\pi} \left( \frac{R_* \cos \delta + R_p}{a_p} \right)$$

$$i_{\min} = \cos^{-1} \left( \frac{R_*}{a_p} \right), \quad \cos i = \frac{R_* \sin \delta}{a_p}$$

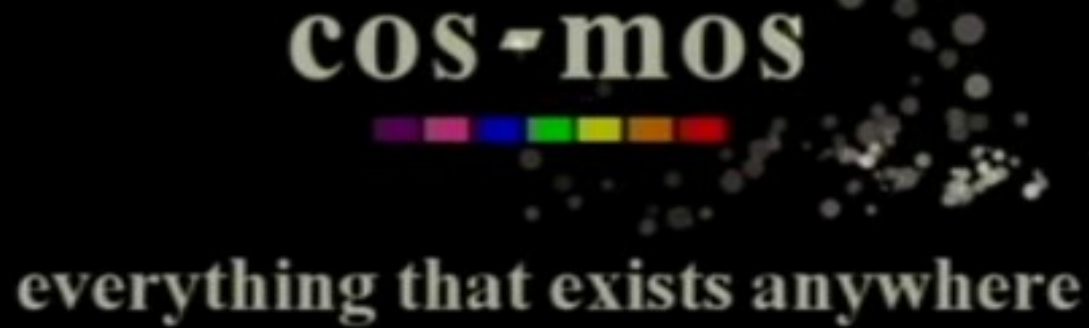
# AST413 Gezegen Sistemleri ve Oluşumu

## Ders 5 : Diğer Keşif Yöntemleri

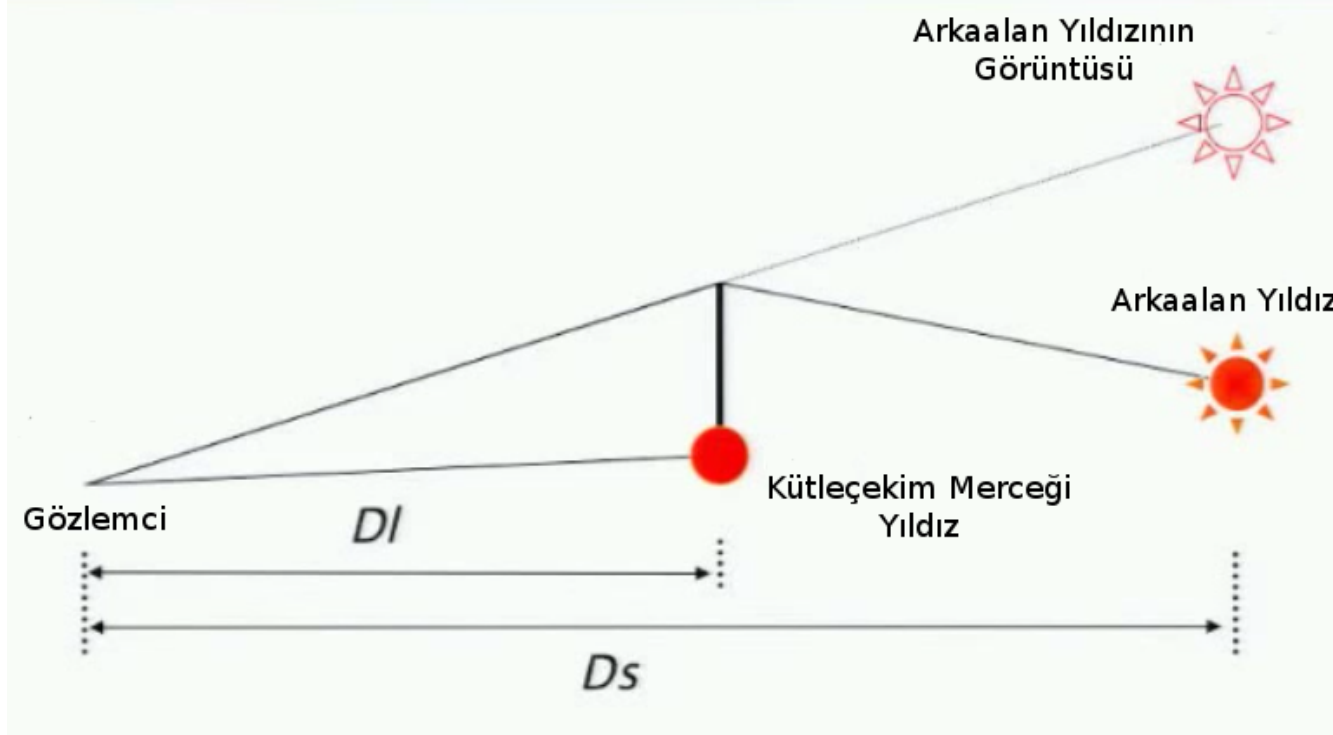
# Kütleçekimsel Mercek Yöntemi



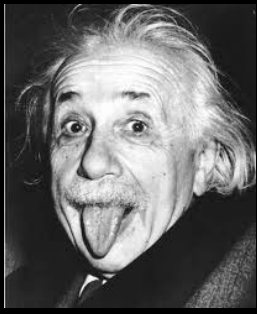
# Kütleçekim Merceği Yöntemiyle Gezegen Keşfi



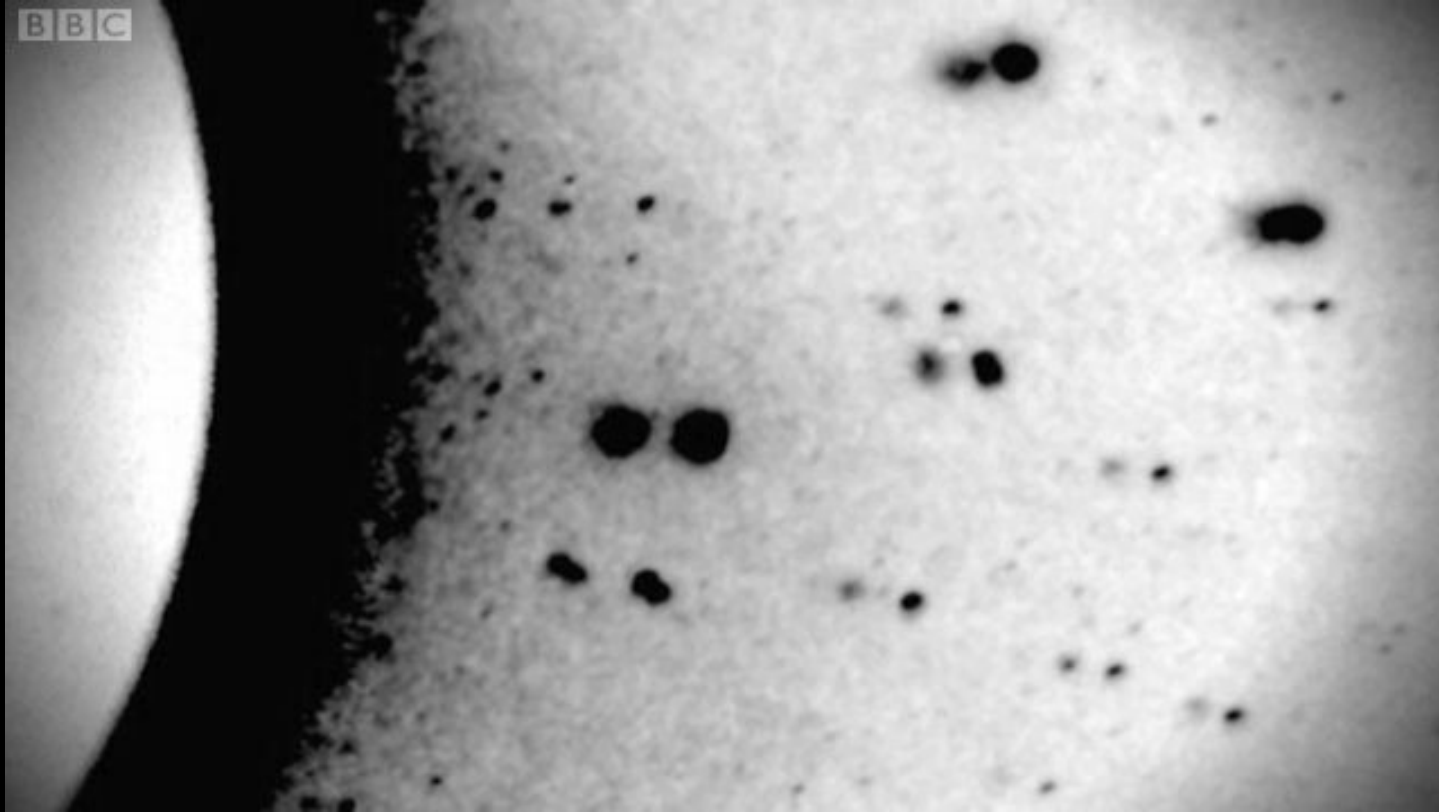
# Kütleçekimsel (Mikro)Mercek



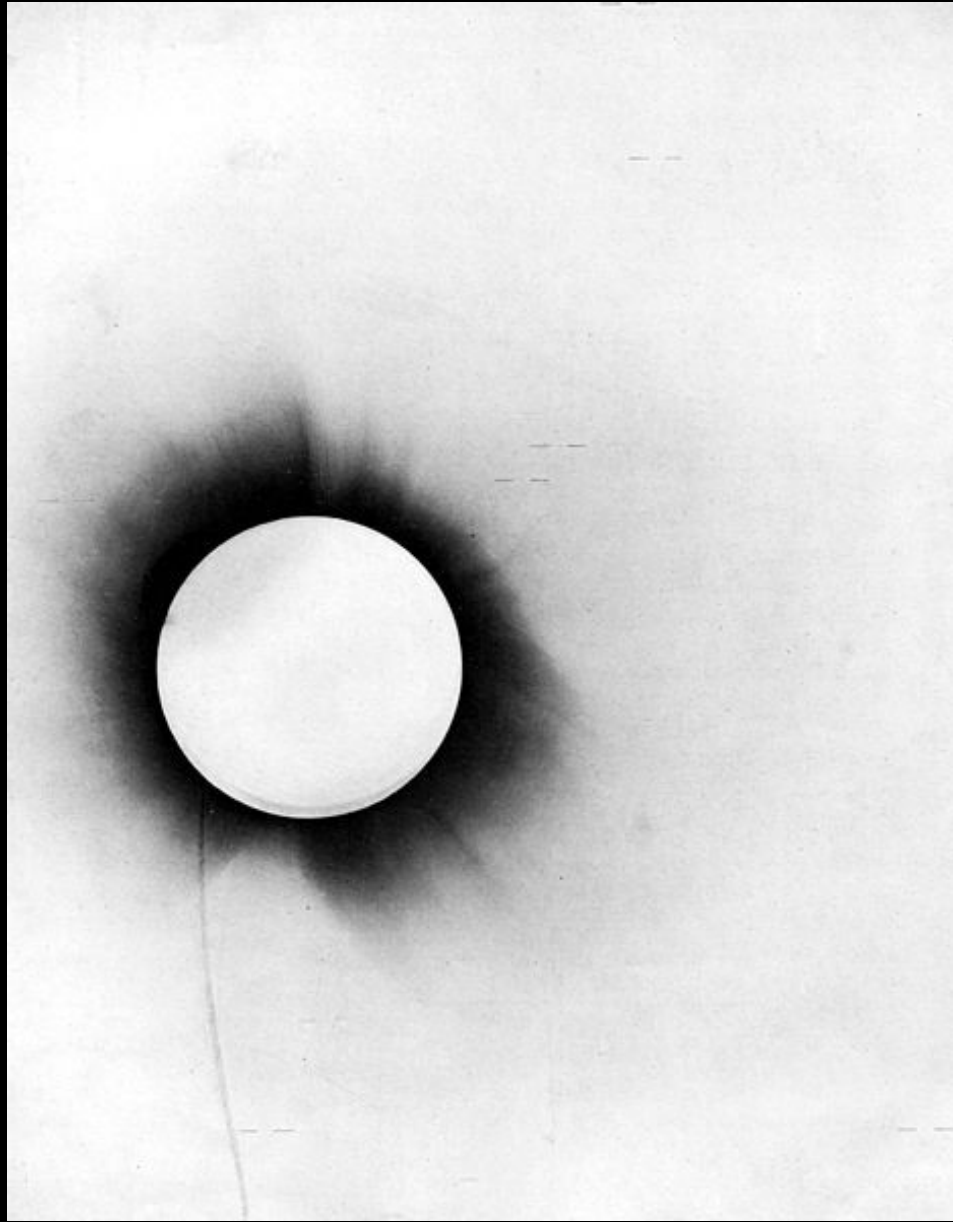
Bizden uzak parlak bir yıldız düşünelim. Her ne kadar yıldızlar bize çok uzak oldukları için gökyüzümüzdeki hareketleri çok küçük olsa da onların birer uzay hızları olduğunu biliyoruz. Bu uzay hareketi nedeniyle bize daha yakın bir yıldızın gözlemciyle bir arkaalan yıldızının arasından geçmesi mümkündür. Öndeki yıldız kütleçekim etkisi nedeniyle çevresindeki uzayın geometrisini değiştirdiğinden arkaalan yıldızından gelen ışığı “bükecek” ve normalde başka bir yönde ilerleyecek fotonları bize doğru yönlendirebilecektir. Kütleçekim etkisi nedeniyle tıpkı bir mercek gibi davranan bu yıldıza bu nedenle “kütleçekimsel mikromercek” adı verilir. Bu sayede arka plandaki yıldızı gökyüzümüzdeki olması gereken noktadan başka bir noktada ve “daha parlak” görürüz!



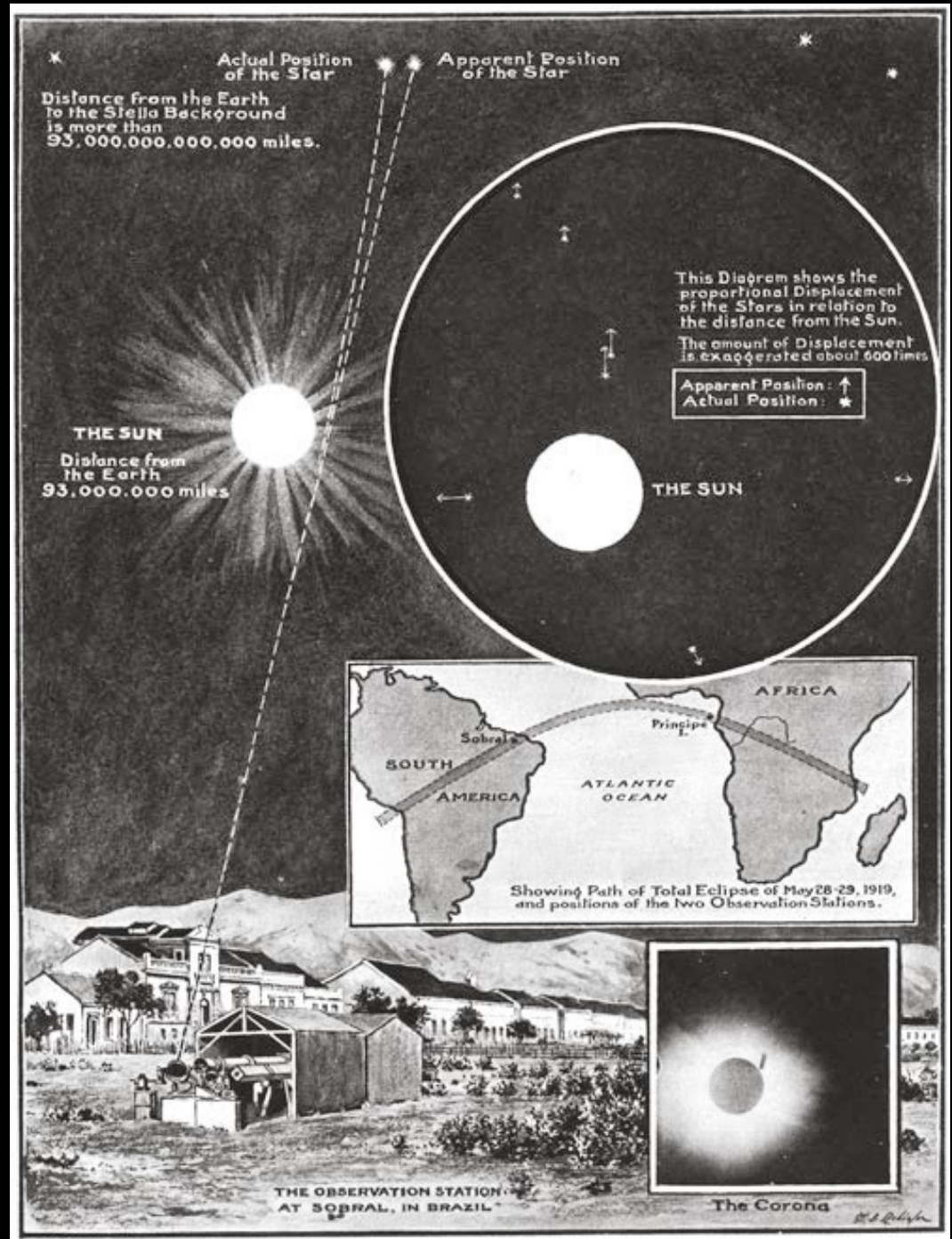
## 1919 Güneş Tutulması



Einstein, Newton Yasalarıyla uyumlu olmayan bir şekilde uzayın kendisinin kütle tarafından büküldüğünü düşünüyordu. Bu düşüncesini ispatlayan ilk gözlemsel olgu Sir Arthur Eddington tarafından gerçekleştirilen 1919 Güneş Tutulması gözlemleridir. 1919 Tutulması'ndan 6 ay önce, gökyüzünde tutulmanın gerçekleşeceği alanda Hyadaes yıldızlarının gece gözlemlerini gerçekleştirdi ve bu yıldızların konumlarını hassas olarak ölçtü. 6 ay sonra 29 Mayıs 1919'da Afrika'nın batısındaki São Tomé ve Príncipe adası ile Sobral, Ceará, Brezilya'da eş zamanlı olarak gözlenen tutulma sırasında; Hyades yıldızları Güneş'in kütleçekimsel etkisinden dolayı ışığın yönünü saptırması nedeniyle, tam da Einstein'ın öngördüğü kadar farklı noktalarda gözlemlendi.



Eddington'ın 1920'de yayınladığı tutulma fotoğrafı



London News Gazetesi'nde yayınlanan 1919 Tutulması Haberi

# Einstein Yarıçapı

$$\theta = \frac{4GM}{rc^2}$$



**Örnek 1.** Güneş'in ( $M = 2 \times 10^{30}$  kg) yüzeyini sıyrarak geçen ( $r = 7 \times 10^8$  m) ışık

$$\theta = (4 * 6.67 \times 10^{-11} * 2 \times 10^{30}) / (7 \times 10^8 * (3 \times 10^8)^2)$$
$$\theta = 1''.747$$

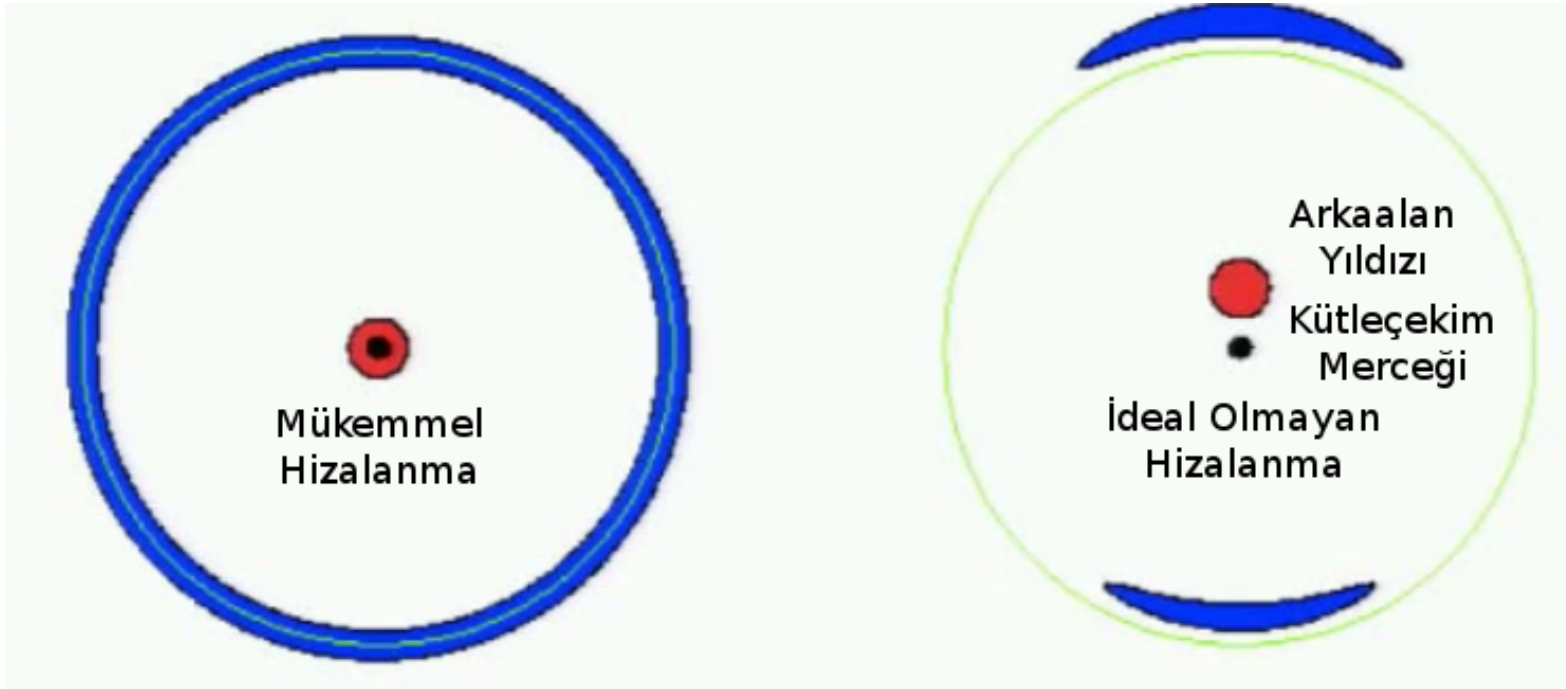
kadar yolundan sapar.

**Örnek 2.** 100 kg kütleye sahip bir insanın kütle merkezinin 10 cm uzağından geçen ışık

$$\theta = (4 * 6.67 \times 10^{-11} * 100) / (0.1 * (3 \times 10^8)^2)$$
$$\theta = 6''.11 \times 10^{-19}$$

kadar yolundan sapar.

# Einstein Diski



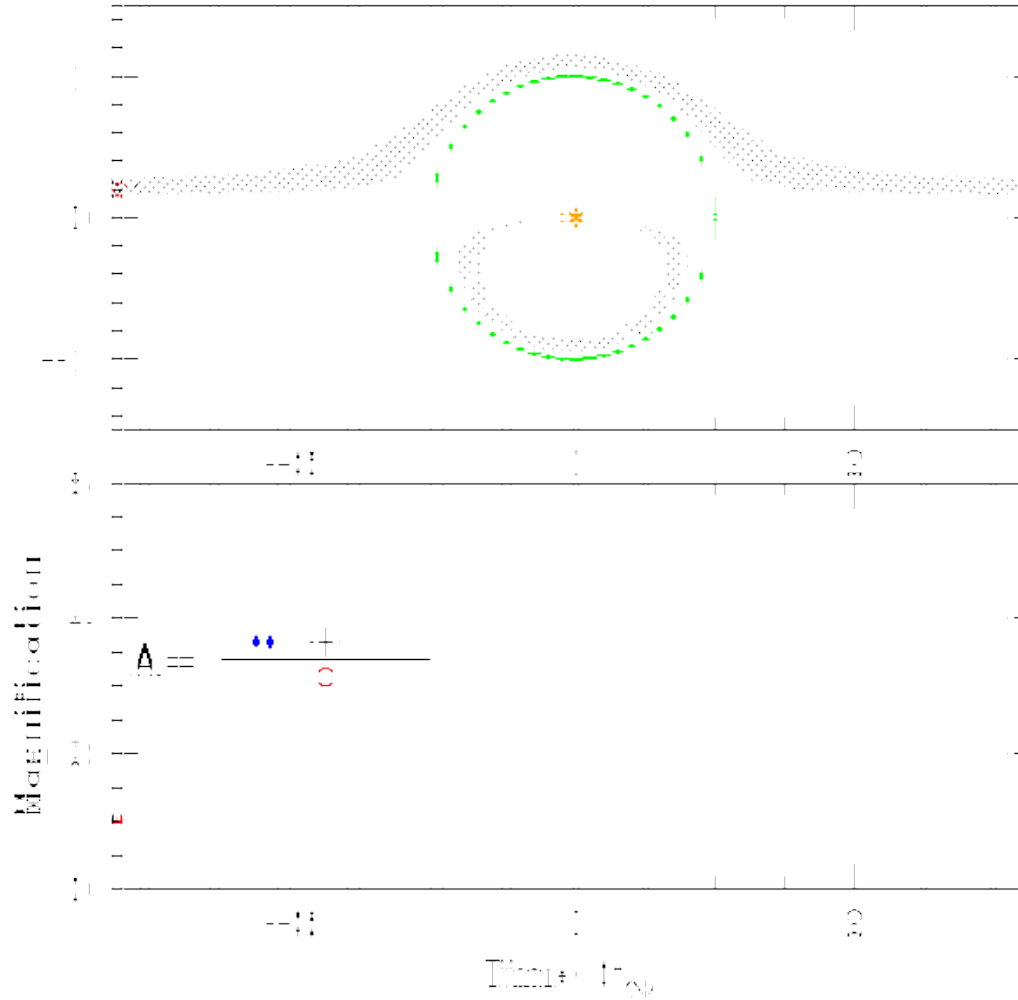
İdeal olmayan hizalanma durumunda oluşan iki görüntü arasındaki uzaklık  $2\theta_e$  kadardır.

$$\text{Büyütme} = (\text{Görüntü Alanı}) / (\text{Kaynağın Alanı})$$

Her ne kadar büyütme (ing. magnification) terimi kullanılıyorsa da söz konusu olan galaksiler gibi geniş kaynaklar değil de nokta kaynaktan gelen yıldız ışığı olduğunda, ışığı daha geniş alana yaydığımız için hizalanmanın olduğu süre boyunca arkaalan yıldızını daha parlak görürüz!



Aşağıda bir yıldızın (ortadaki sarı yıldız) uzay hareketi sırasında önünden geçtiği uzak ama daha parlak başka bir yıldız (kırmızı) ile mükemmel olmayan hizalanmasını görüyorsunuz. Mavi renk, gözlenmekte olan kırmızı yıldızdan alınan ışığı göstermektedir. Gözlenen arkaplan yıldızının (kırmızı) parlaklığı önünden geçen kütleçekim merceği (sarı yıldız) nedeniyle ani olarak artmaktadır. Yeşil çember, sarı yıldız için Einstein yarıçapını göstermektedir. Grafiklerde x-ekseninin konum değil, zaman olduğuna dikkat ediniz!



## Zaman Ölçekleri

**Gerçekleşme sıklığı:** Bir yıldız için ~100 bin yıl! (çözüm çok sayıda yıldız uzun süre gözleyebilecek bir deney / düzenek tasarlamak!)

**Kütleçekimsel merceğin "olayının" gerçekleşme süresi ( $t_E$ ):** Birkaç günle birkaç yüz gün arasında.

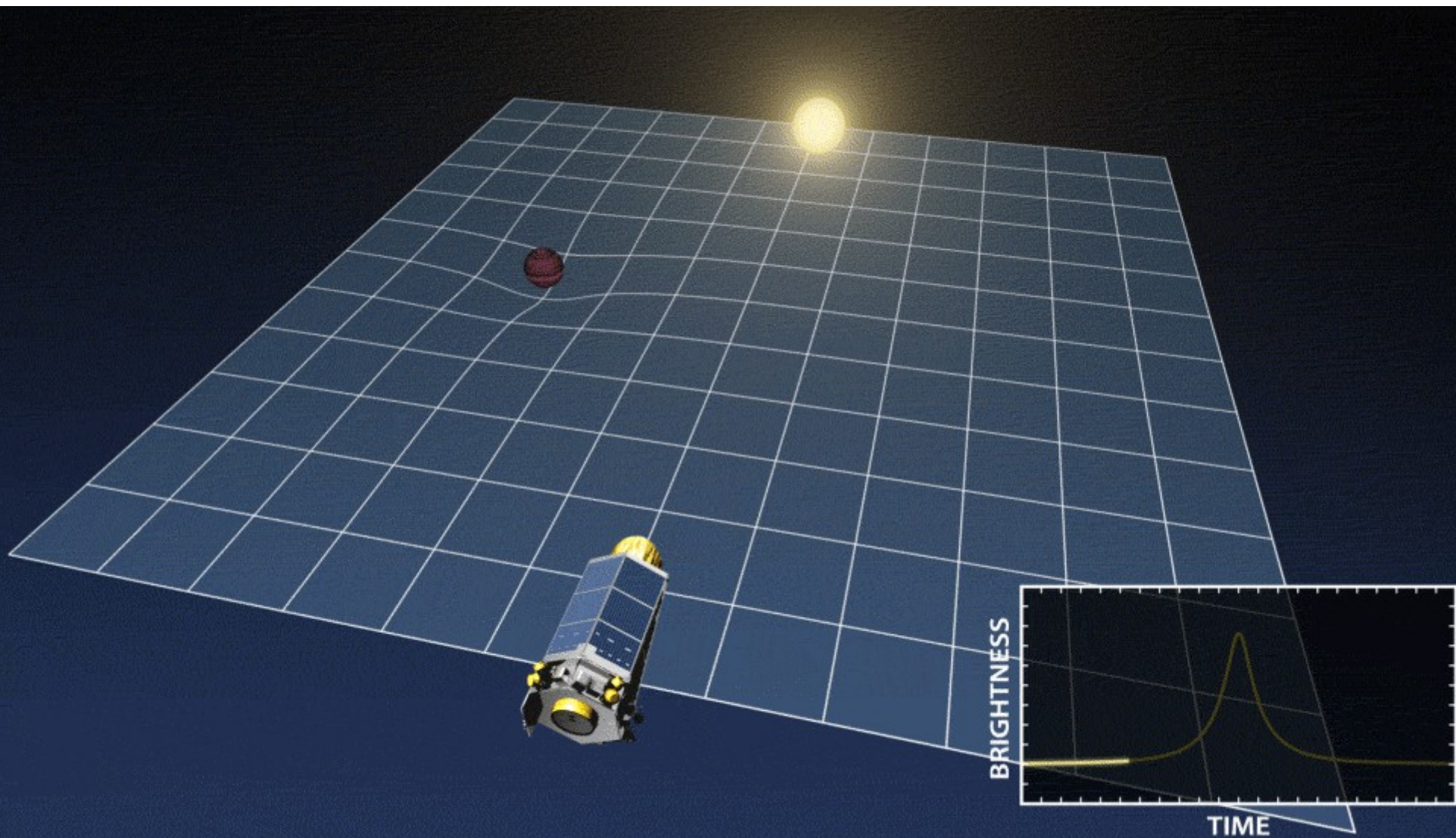
Tipik zaman ölçeği:

$$t_E = \frac{\theta_E}{\mu} = 25 \text{ gün} \sqrt{\left( \frac{M}{0.5 M_{\text{Güneş}}} \right)}$$

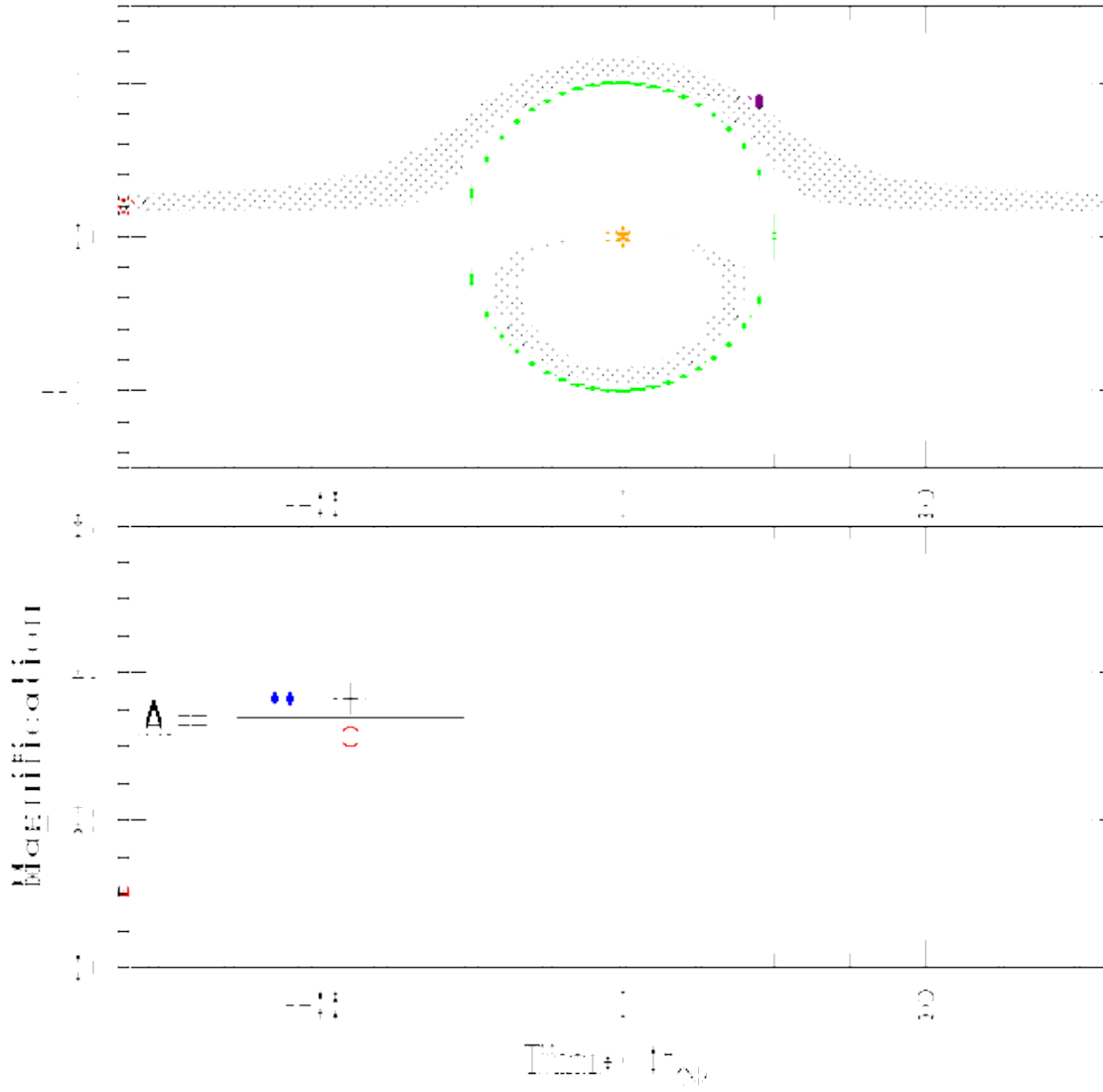
$\mu$  (kütleçekimsel merceğin yıldızının teğetsel uzay hızı -açısal-):

1 – 15 milyaysaniyesi (mas) / yıl

$\theta_E$  (Einstein Yarıçapı): 0.1 – 2 mas (mercek kütlesine bağlı)



Şimdi ortadaki sarı yıldızdan belirli bir uzaklıkta bir gezegen (mor içi dolu daire) olduğunu düşünelim. Arkaplandaki yıldızın ışığı kütleçekim merceği yıldız ile hizalanmaya başladığı anda bir miktar artar. Kütleçekim merceği yıldızın etrafındaki gezegen de kütlesi nedeniyle uzayı bir miktar bükeceğinden arka plan yıldızının ışığında genliği ve süresi düşük ikinci bir artışa neden olur!



## Gezegen Barındıran Bir Kütleçekim Mercek Yıldızı

Gezegenin neden olduğu kütleçekimsel merceğin “olayının” gerçekleşme süresi ( $t_g$ ):  
Gezegenin kütlesine bağlı olarak birkaç saatle birkaç gün arasında

$$t_g = \sqrt{q} t_E = 1 \text{ gün} \sqrt{\left(\frac{M_g}{M_{\text{mercek}}}\right)}$$

$q$ : gezegenle barınak yıldızının kütlelerinin oranı): Jüpiter-Güneş ikilisi için yaklaşık 1/1000 olduğundan mikromercek olayının gerçekleşme süresi yaklaşık

$$1 \text{ gün} / \sqrt{1000} \sim 50 \text{ dakika}$$

Gezegen Einstein yarıçapına ne kadar yakın ise neden olacağı parlama yüksek olduğundan yakalanması da o kadar kolay!

$$a \approx r_E = \theta_E D_{\text{mercek}} \approx 2.8 \text{ AB} \sqrt{\left(\frac{M}{0.5 M_{\text{Güneş}}}\right)}$$

**Önemli Sonuç:** Denklemde de görülebileceği gibi  $0.5 M_{\text{güneş}}$ 'lik bir kütleçekimsel merceğin için gezegenin yıldızına uzaklığı 2.8 AB ise yakalanma olasılığı maksimumdur. ( $2 M_{\text{güneş}}$ 'lik bir merceğin için rakam 5.6 AB'ye yükselir!). Yani kütleçekimsel merceğin yöntemi daha önce gördüğümüz yöntemlerden farklı olarak yıldızına uzak gezegenleri keşfetmek konusunda daha başarılıdır!

# Kütleçekimsel Mercek Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

## Avantajları:

- ✓ Son verilen denklemde de görülebileceği gibi  $0.5 M_{\text{güneş}}$ 'lik bir kütleçekimsel mercek için gezegenin yıldızına uzaklığı  $2.8 AB$  ise yakalanma olasılığı maksimumdur. ( $2 M_{\text{güneş}}$ 'lik bir mercek için rakam  $5.6 AB$ 'ye yükselir!). Yani kütleçekimsel mercek yöntemi daha önce gördüğünüz yöntemlerden farklı olarak yıldızına uzak gezegenleri keşfetmek konusunda daha başarılıdır!
- ✓ Bu nedenle bu yöntemle “buz sınırının” (ing. snow line) ötesinde gezegen keşfetmek mümkündür!
- ✓ Yörüngesi büyük gezegenlerin yanı sıra yıldızı olmayan, “serbest dolaşan gezegenleri” (ing. free floating planets) de keşfetme imkanı sağlar!
- ✓ Yakın gezegenlere duyarlı olmadığından diğer yöntemlerden bu yönde gelen yanlışlıkların zıttı bir yanlışlıkla onları tamamlar!
- ✓ Ne gezegeni barındıran mercek yıldızdan ne de gezegenden doğrudan ışık almak gibi bir zorunluluk yoktur! “Göremediğimiz yıldızların etrafında göremediğimiz gezegenleri arıyoruz!” (Debra Fischer, 2000)
- ✓ Galaksi içerisinde pek çok konum ve oldukça uzak mesafelerde (1-8 kpc) gezegen keşfine olanak sağlar!
- ✓ Daha büyük kütleli gezegenleri (yaratacakları mercekleme etkisi daha büyük olacağından) bulmak daha kolaydır. Kütle alt limiti “Ay kütlesi” olarak verilir ki oldukça küçük gezegenleri bile bulmaya olanak sağladığı görülmektedir.

## Dezavantajları:

- ✓ Parlamaya neden olan hizalanma kısa sürelidir ve tamamen tesadüfen gerçekleştiği için keşif yöntemi alet bakımından (adanmış özel teleskoplar, özel geniş alan gören CCD'ler,) oldukça talepkardır.
- ✓ Hizalanmanın kısa süreli olması ve yıldız ve gezegenden (çoğunlukla) ışık alınamıyor oluşu cismin parametrelerinin duyarlı belirlenmesini ve barınak yıldızın uzun süreli çalışılmasını imkansız hale getirmektedir. “Göremediğimiz yıldızların etrafında göremediğimiz gezegenleri arıyoruz!”

# OGLE

Optical Gravitational Lensing Experiment



## PLANET

*Probing Lensing Anomalies NETWORK*

# MOA

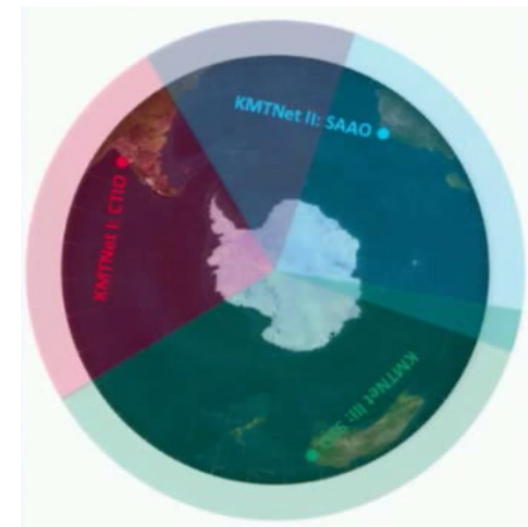
**Microlensing Observations in Astrophysics**

## RoboNet 1.0



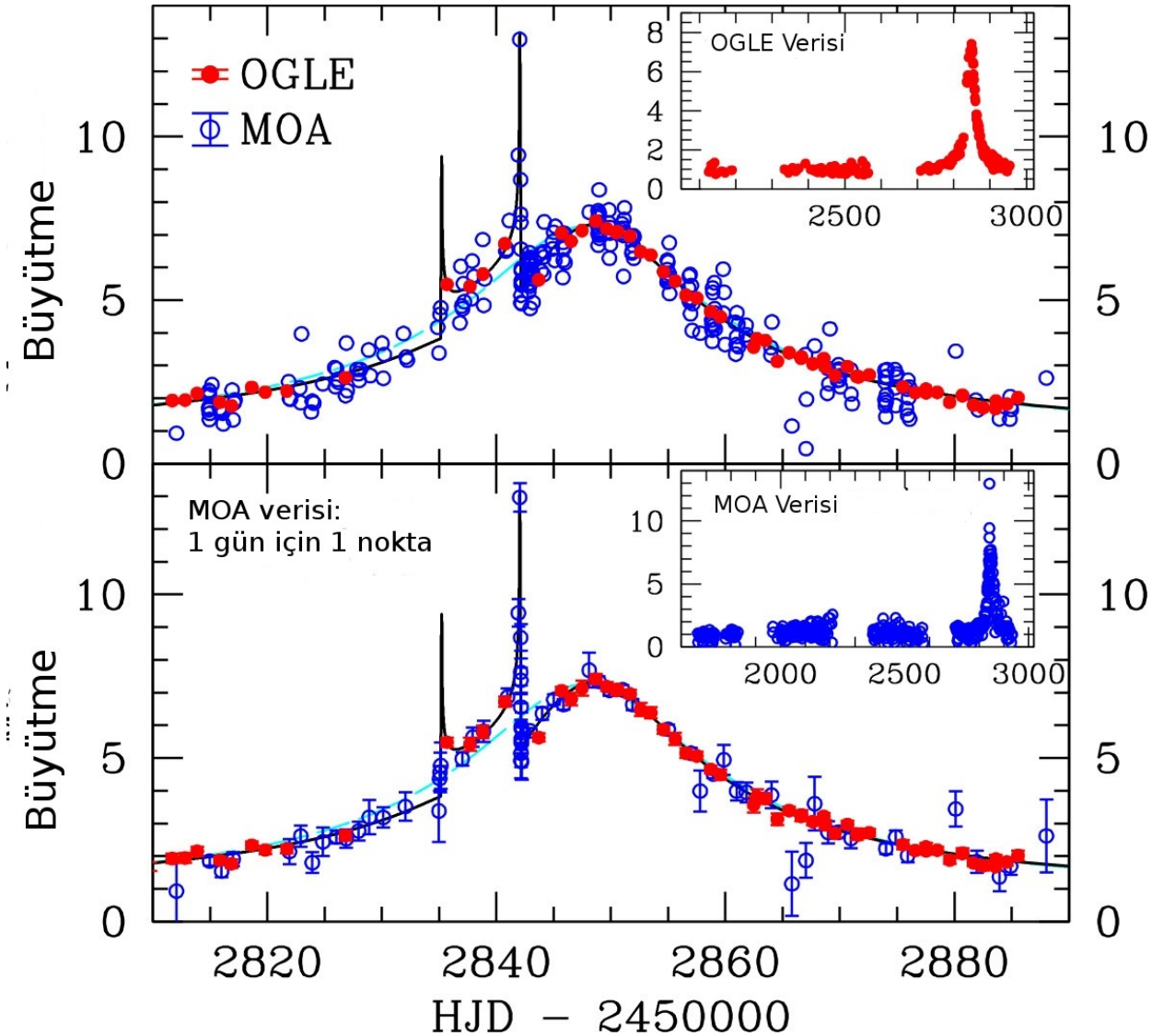
## MicroFUN 2007

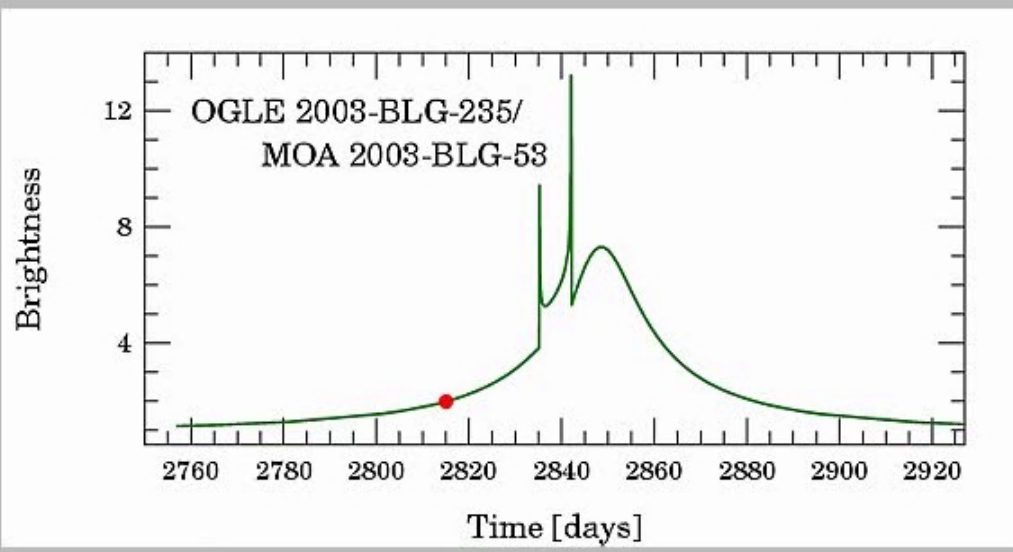
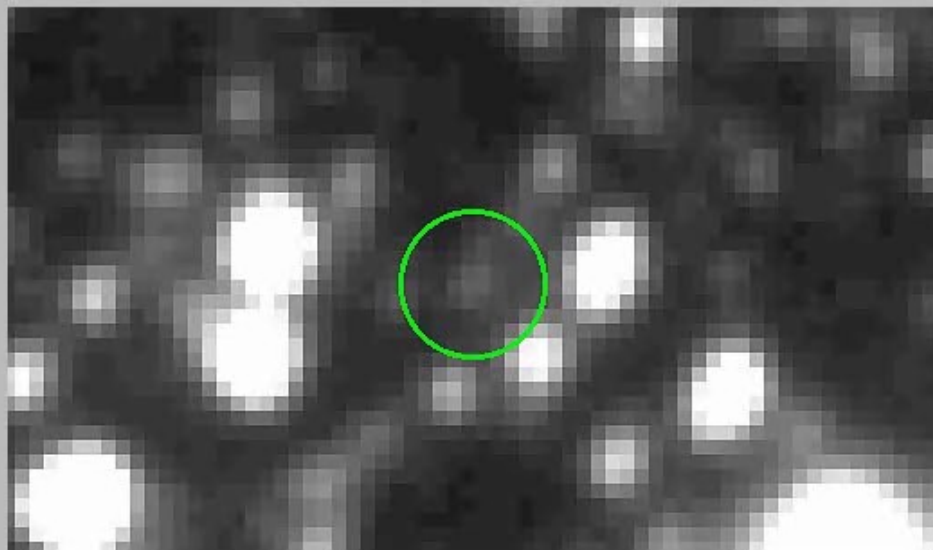
**MICROLENSING FOLLOW-UP NETWORK**

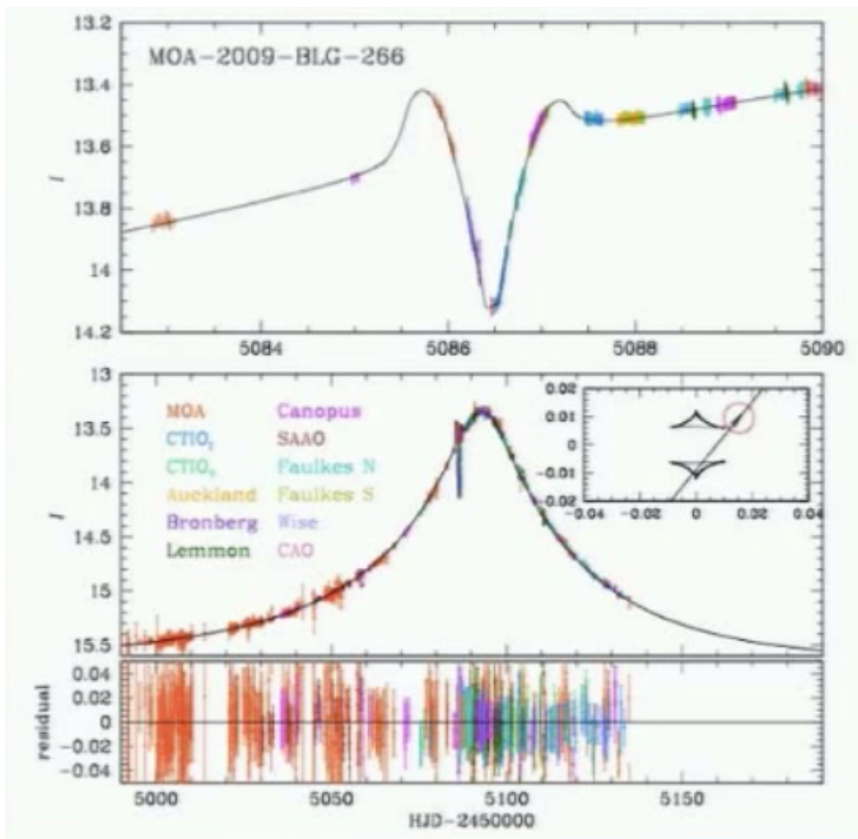


Kore Kütleçekimsel Mercek Teleskop Ağı (KMTN):

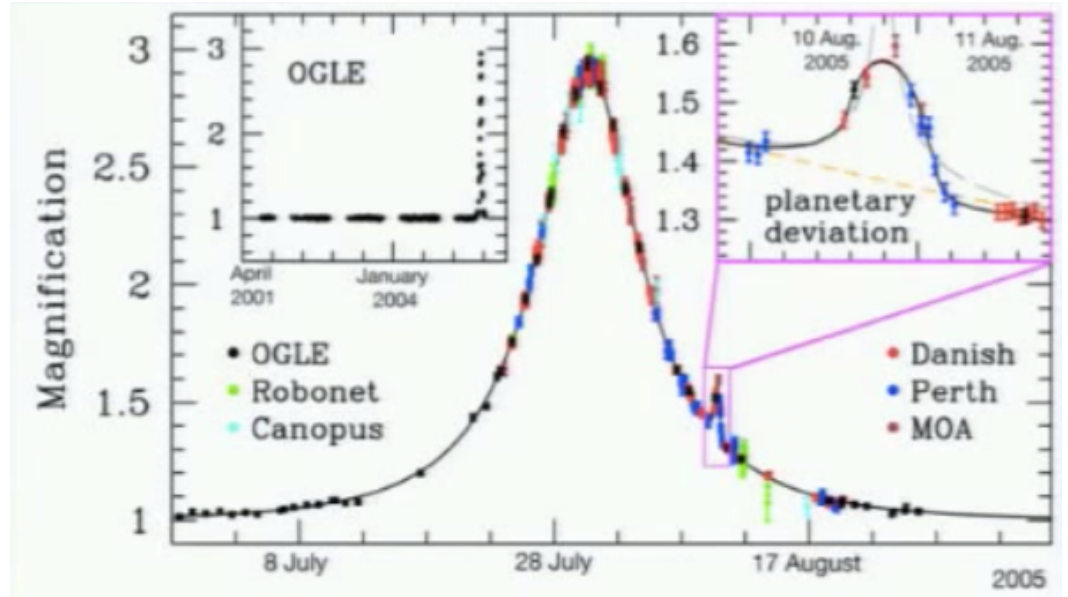
# Keşfedilen İlk Gezegen: OGLE-2003-BLG-235/MOA-2003-BLG-53



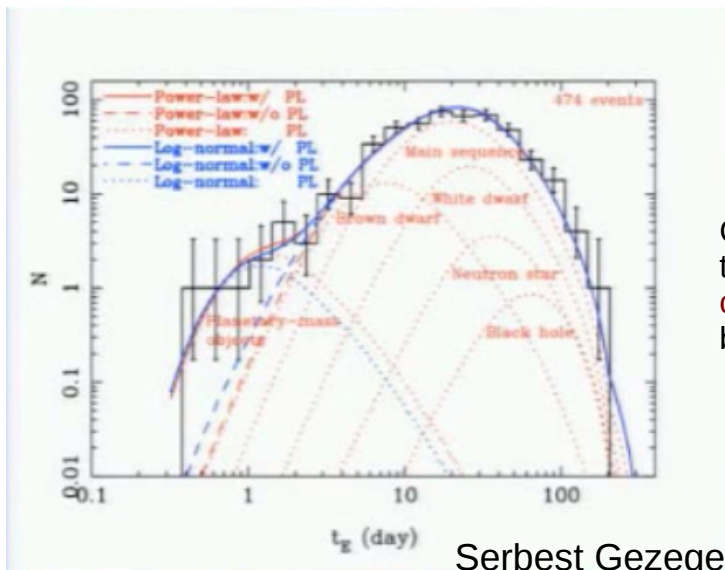




MOA,  $\mu$ Fun, RoboNet, Planet verileri  
(Muraki vd. 2001):  $\sim 10 M_{\text{YER}}$

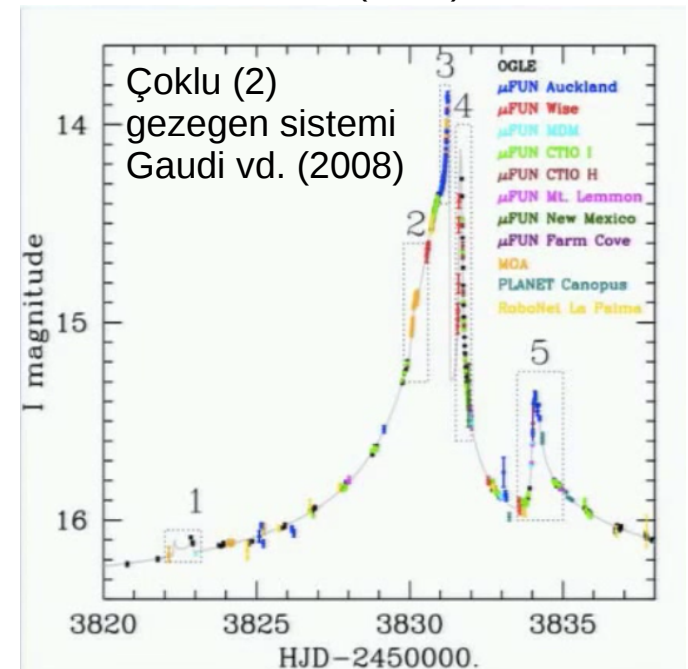


$\sim 5.5 M_{\text{yer}}$  kütleli bir "Süper Dünya"  
Beaulieu vd. (2006)



Gezegen tanımı gereği bu tür cisimlere "kahverengi cüce altı cisimler" (sub brown dwarf) diyoruz!

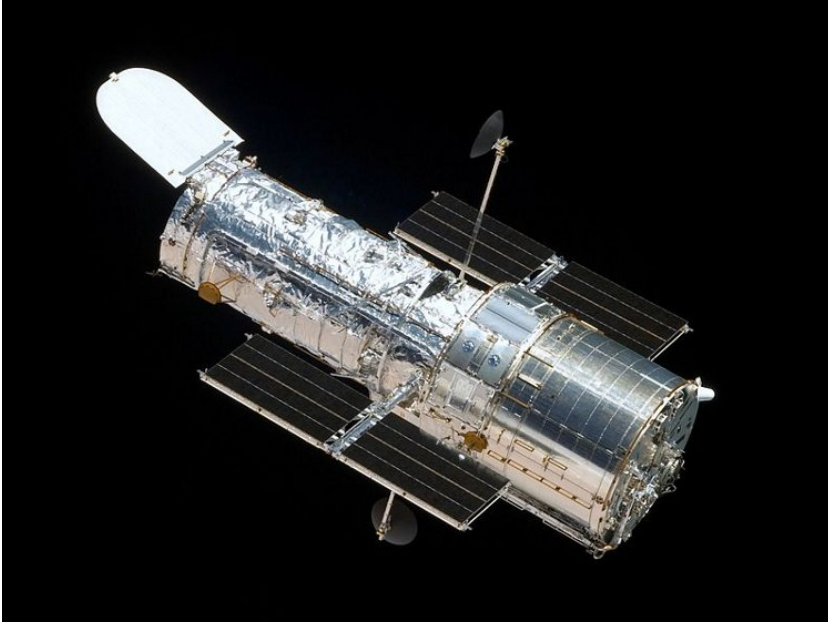
Serbest Gezegen Sumi vd. (2011)



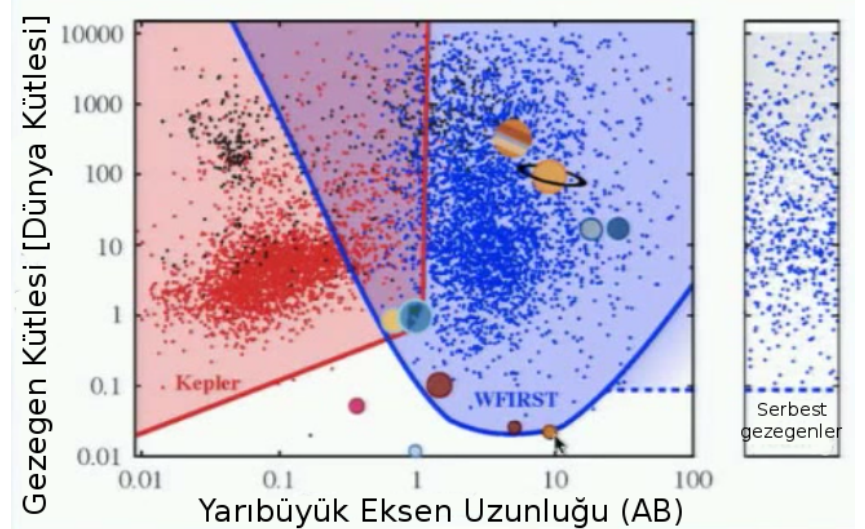
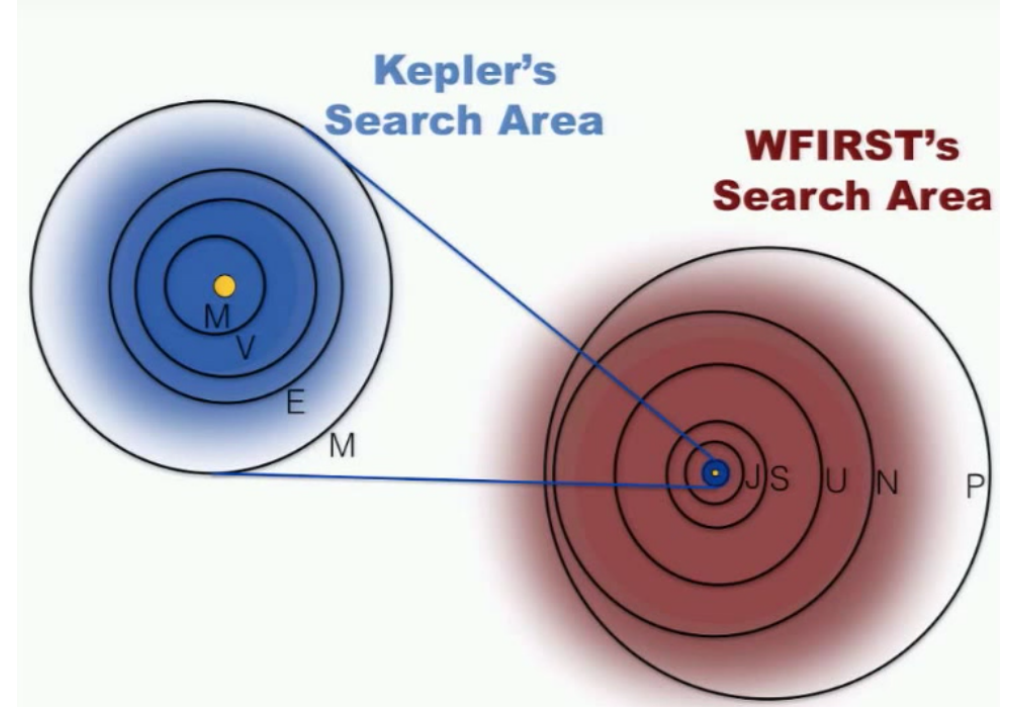
Çoklu (2) gezegen sistemi  
Gaudi vd. (2008)



# WFIRST: Wide Field Infrared Survey Telescope (Geniş Alan - Kızılöte Araştırma Teleskobu)



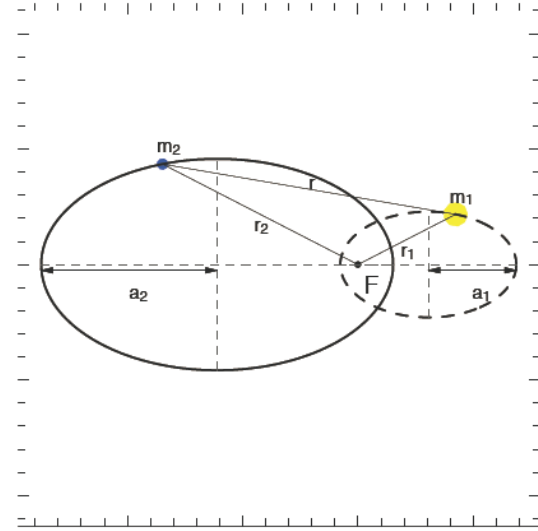
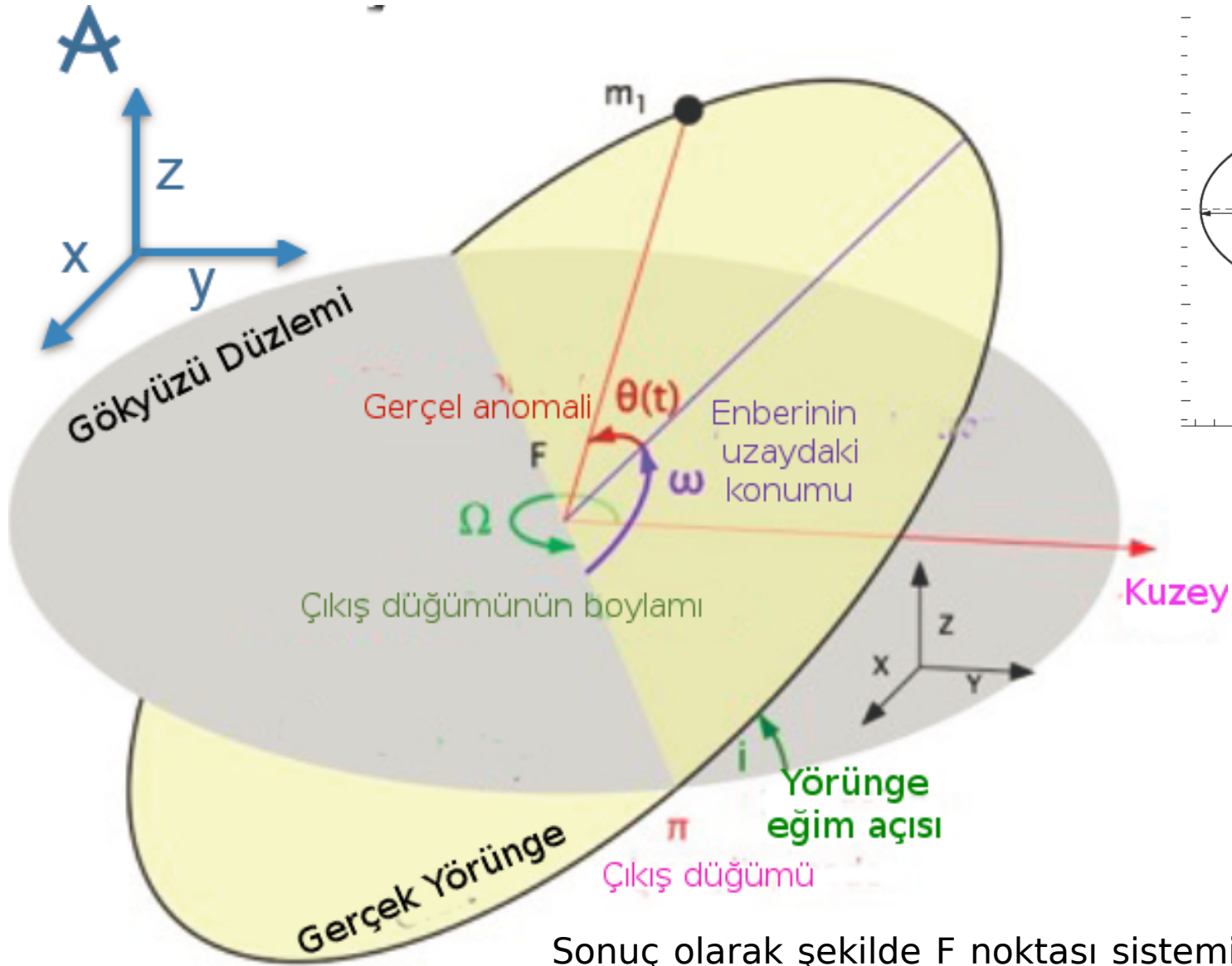
WFIRST henüz yapım aşamasında olup, 2020'li yılların ortasında uzaya gönderilmesi beklenmektedir.



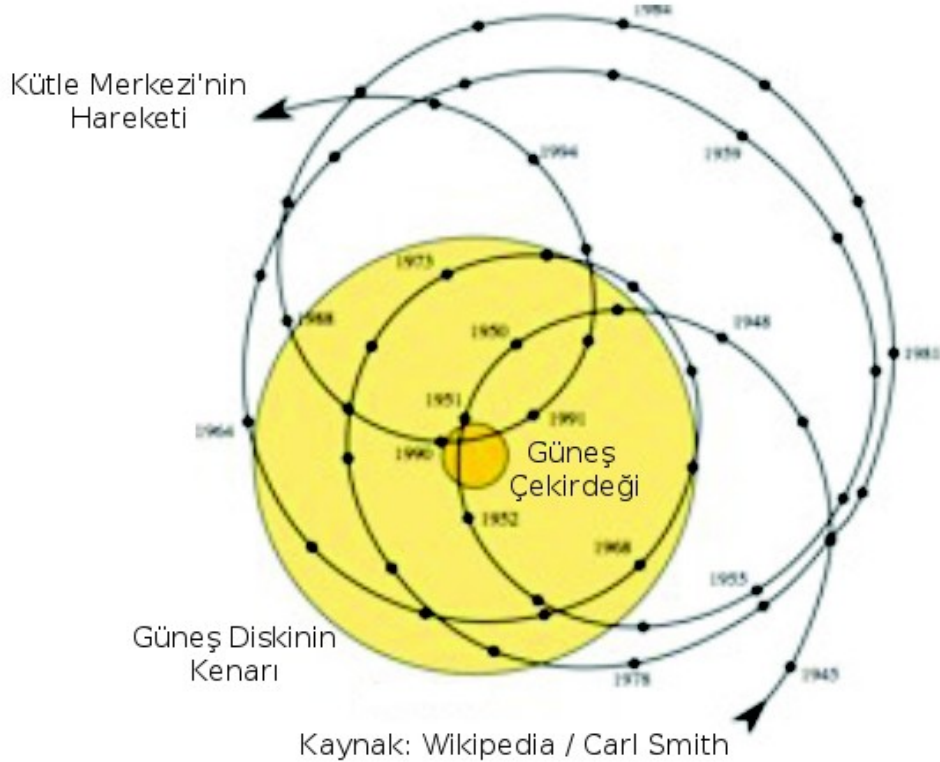
# Astrometri



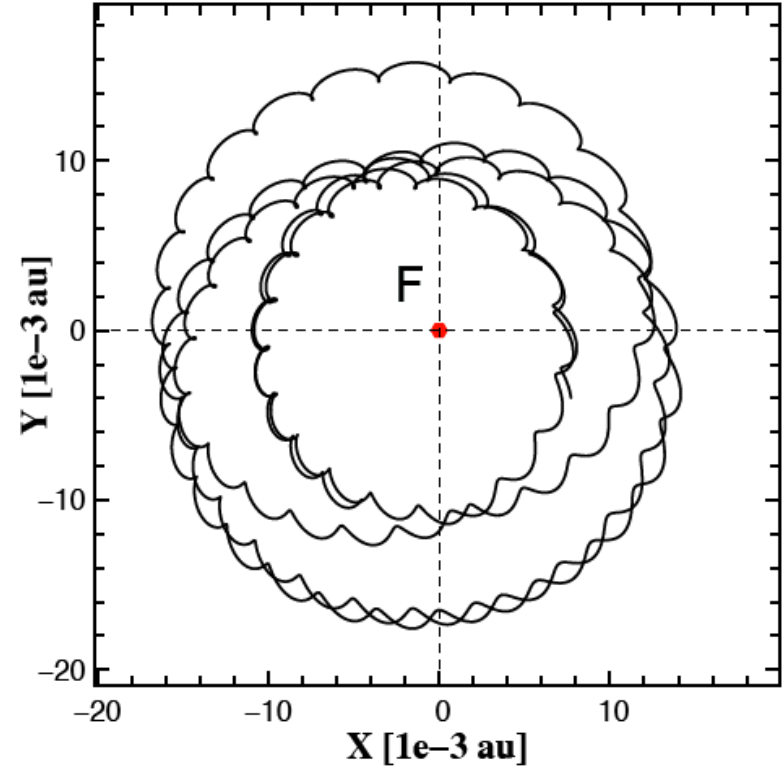
# “Astrometri kütle merkezi odaklı yörüngeyi ölçer”



Sonuç olarak şekilde  $F$  noktası sistemin kütle merkezi,  $m_1$  ise kütle merkezi etrafında yörünge hareketi yapmakta olan yıldızdır! Bu yöntemde gezegen gözlenemeyebilir!



Güneş'in gezegenlerle ortak kütle merkezinin etrafındaki hareketi (yörüngesi). Gözlemsel noktalar Güneş Sistemi'nin kütle merkezinin Güneş'in disk merkezine göre konumunu göstermektedir.



$1 M_{\text{güneş}}$  kütleli bir yıldızın ( $P_1 = 44^{\text{gün}}$ ,  $e_1 = 0.47$ ,  $m_{p1} = 2.2 M_{\text{jüp}}$ ), ( $P_2 = 1000^{\text{gün}}$ ,  $e_2 = 0.14$ ,  $m_{p2} = 6.7 M_{\text{jüp}}$ ), ( $P_3 = 3000^{\text{gün}}$ ,  $e_3 = 0.00$ ,  $m_{p3} = 0.9 M_{\text{jüp}}$ ) parametrelerine sahip üç gezegenle ortak kütle merkezi etrafındaki hareketi (yörüngesi)

Astrometri yönteminde ölçülebilen lineer uzaklıklar değil, açısal uzaklıklardır. Ölçülen bu açısal uzaklığın değişim genliğine “astrometrik sinyal” adı verilir. Burada  $d$  yıldızın parsek biriminde uzaklığı,  $M_1$  ve  $M_2$  sırasıyla yıldızın ve gezegenin kütleleri,  $P$  yıl biriminde yörünge dönemidir.  $a_1$ : Yıldızın yörünge yarı büyük ekseninin gökyüzü düzlemi üzerindeki izdüşümüdür.

$$\alpha_1 = \frac{a_1}{d} = \frac{M_2}{d} \left( \frac{P}{M_1 + M_2} \right)^{3/2}$$

$M_1 \gg M_2$  yaklaşımı uygulanırsa yıldızın uzaklığının bilinmesi durumunda gezegenin kütlesi bulunabilir!

$$M_2 = \alpha_1 d \left( \frac{M_1}{P} \right)^{3/2}$$

**Sonuç 1.** Astrometri yöntemiyle gezegen keşfi için oldukça küçük açısal uzaklık ölçümüne ihtiyaç duyulur.

**Sonuç 2.** Yıldızın uzaklığına kuvvetle bağlı kalınmaktadır.

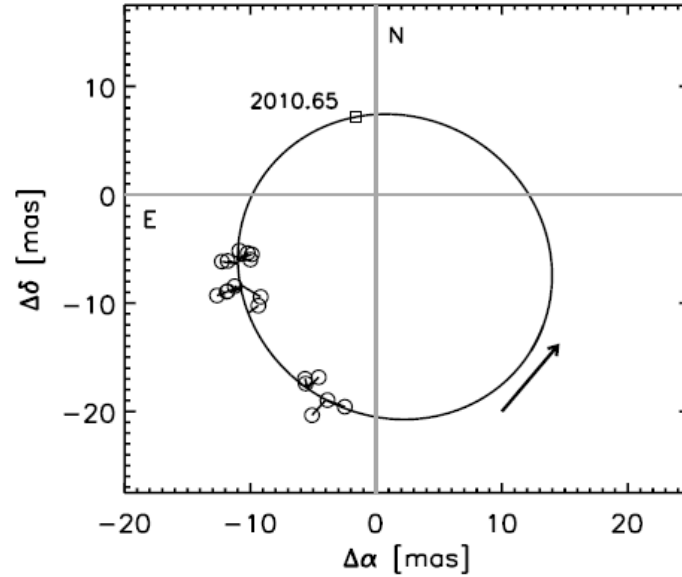
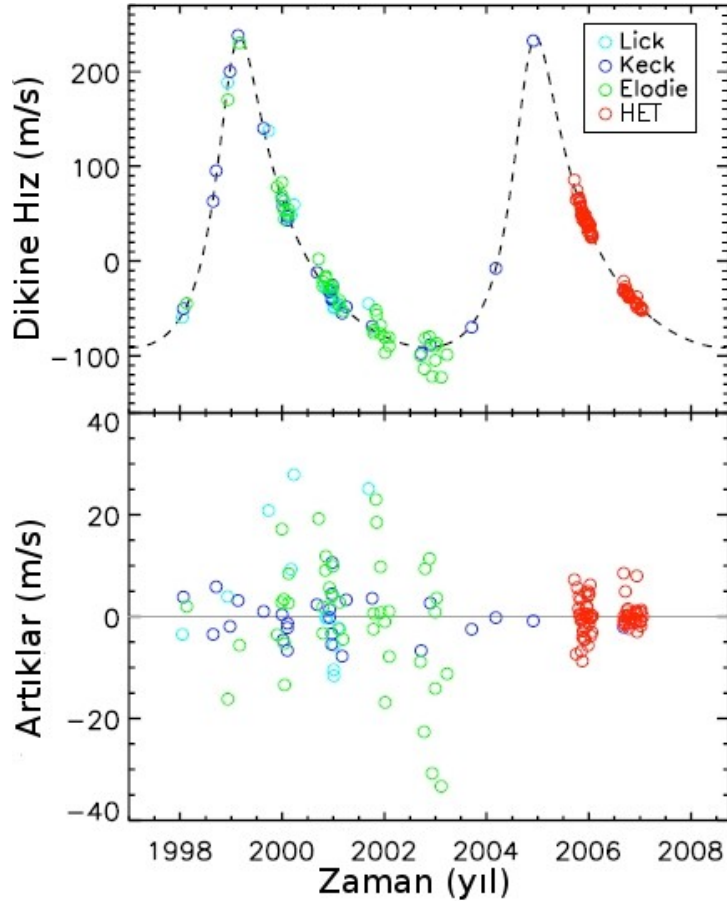
**Sonuç 3.** Büyük yörünge dönemli gezegenleri keşfetmeye daha duyarlıdır.

**Sonuç 4.** Ölçümlerde yüksek ve uzun dönemde kararlı bir duyarlılığa ihtiyaç duyulur

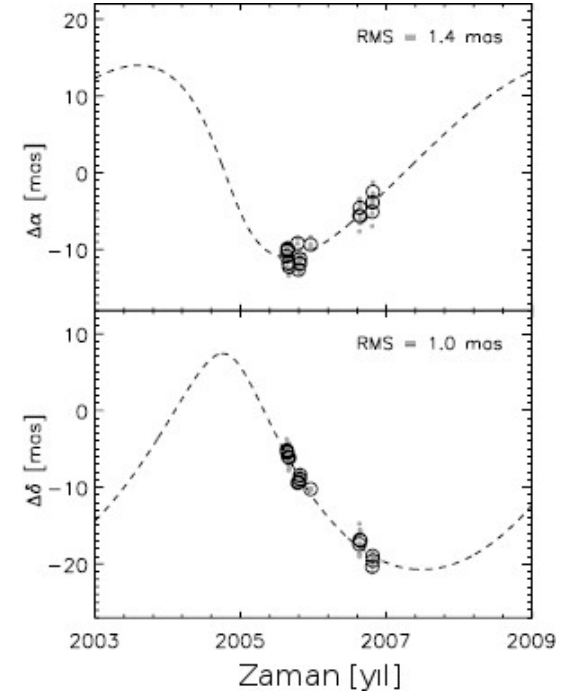
## Gerekli Astrometrik Duyarlılıklar

<u>Gezegen</u>		<u>Dönemi</u>	<u><math>d_*(10 \text{ pc})</math></u>	<u><math>d_*(50 \text{ pc})</math></u>	
Jüpiter	@	11.86 yıl	497	99	$10^{-6}$ yaysn
Jüpiter	@	1 yıl	95	19	$10^{-6}$ yaysn
Neptün	@	1 yıl	5	1	$10^{-6}$ yaysn
Neptün	@	5 yıl	15	3	$10^{-6}$ yaysn
Süper Dünya ( $5 M_{\text{Yer}}$ )	@	1yıl	1.5	0.3	$10^{-6}$ yaysn
Süper Dünya ( $5 M_{\text{Yer}}$ )	@	5 yıl	4.4	0.9	$10^{-6}$ yaysn
Dünya ( $1 M_{\text{Yer}}$ )	@	1 yıl	0.3	0.06	$10^{-6}$ yaysn

# HD 33636b: Astrometriyle Gerçek Kütle



HST Fine Guide Sensor  
Astrometrik Gözlemleri  
 $P = 2117$  gün (Bean vd. 2007)

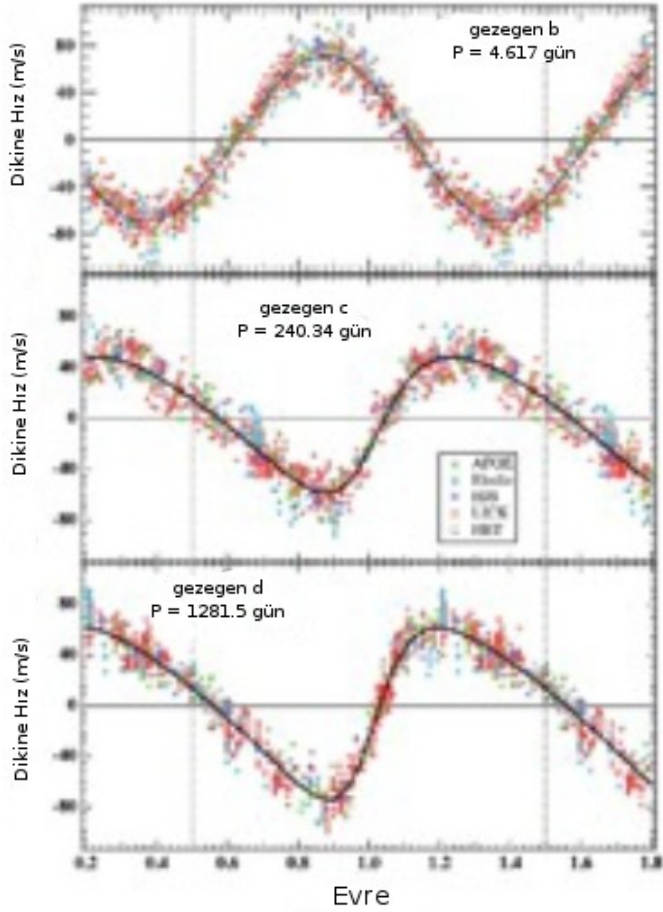


Astrometrik Yörünge  
 $i \sim 3^\circ.75$

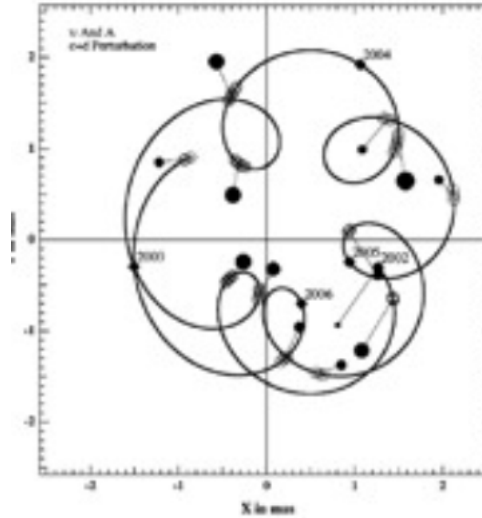
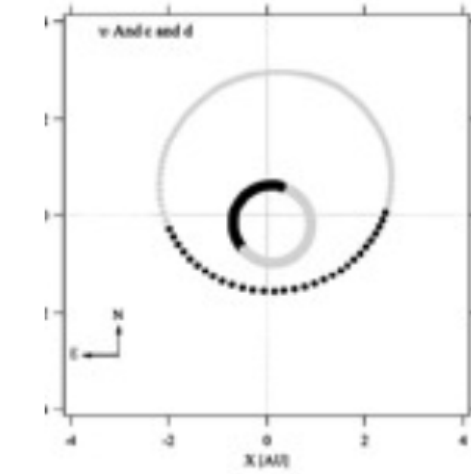
HD 33636'nın dikine hız değişimi  
Hesaplanan kütle  $m_2 \sin i = 9.3 M_{\text{jüp}}$

$m_2 = 142 (+/- 11) M_{\text{jüp}} \rightarrow$  2. cisim bir gezegen  
değil, geç M tayf türünden bir yıldız bileşen!

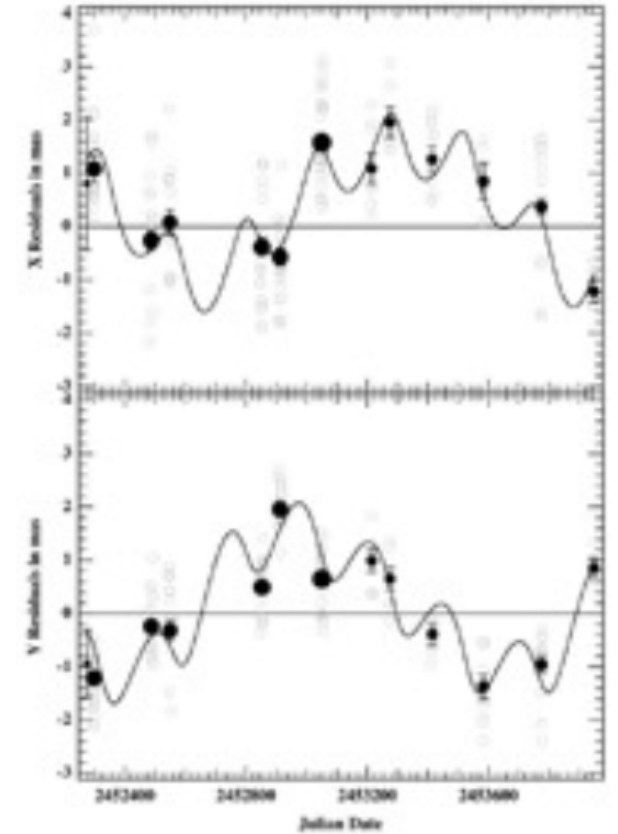
# υ And: Astrometriyle Gerçek Kütle



ups And'nın dikine hız değişimi  
 $P_b \sim 4^{\text{gün}}.6$ ,  $P_c \sim 240^{\text{gün}}$ ,  $P_d \sim 1281^{\text{gün}}$



HST Fine Guidance Sensor  
ups And'nın Astrometrik Gözlemleri

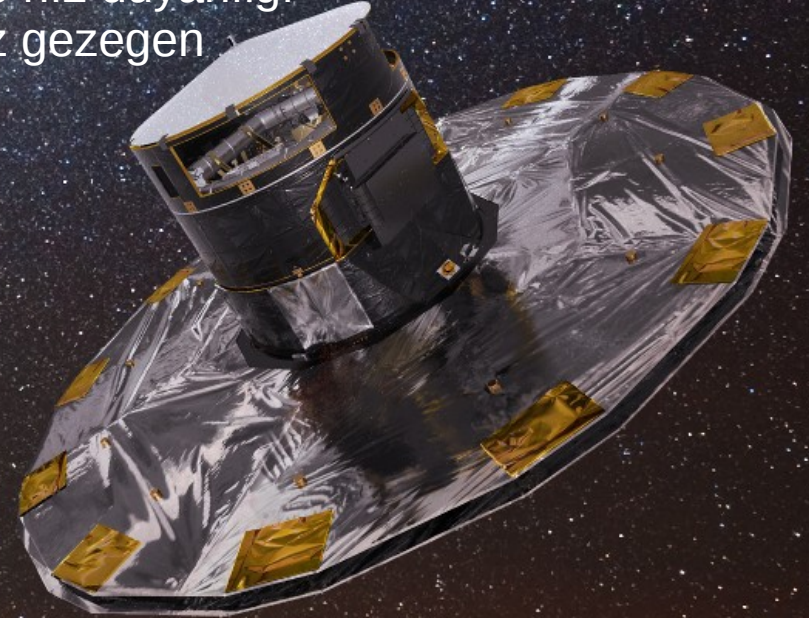


Yörünge Çözümü  
(McArthur vd. 2010)

$i_c = 8^\circ$	$m_b \sin i$	$0.7 M_{\text{jüp}}$
$i_c = 24^\circ$	$m_c$	$12 M_{\text{jüp}}$
	$m_d$	$10 M_{\text{jüp}}$

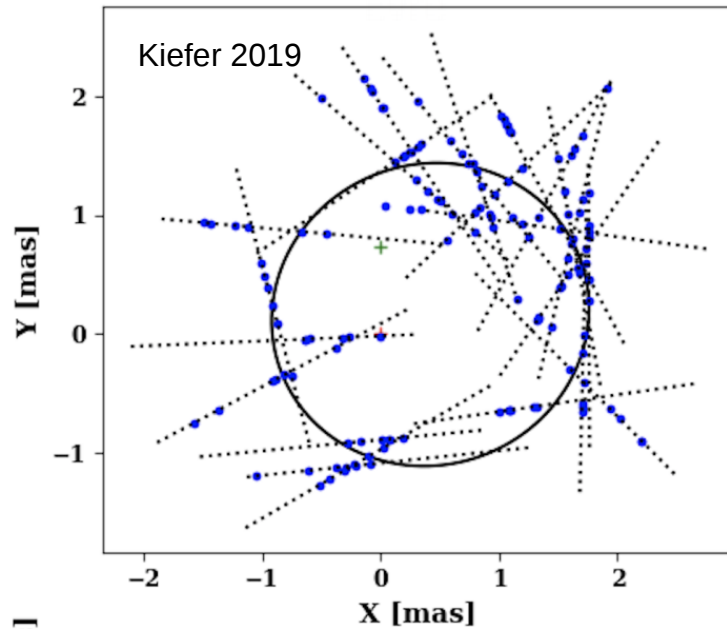
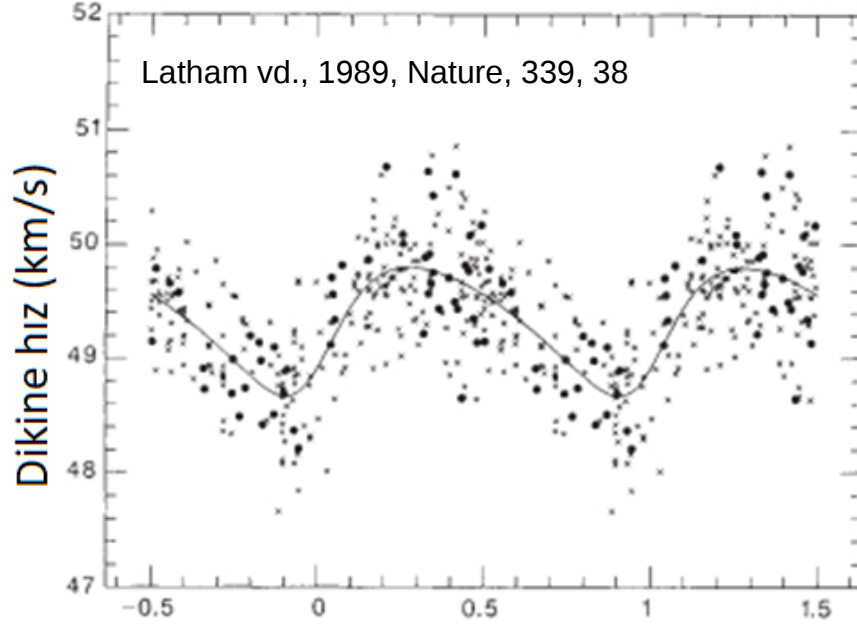
## Gaia Astrometri Gözlemevi:

- ✓ 19 Aralık 2013'te uzaya gönderildi.
- ✓ Enberide 263bin, enötede 707bin km uzakta (Lissajous yörünge)
- ✓ Yörünge dönemi 180 gün
- ✓ Planlanan çalışma süresi: 5 yıl
- ✓ Hedef: 1 milyar cismin duyarlı konum gözlemleri
- ✓ Her bir cisim için 5 yıl süresince ortalama 70'er ölçüm
- ✓ **Astro:** G2V tayf türünden  $3^m$ - $12^m$  yıldızlar için  $5$ - $16 \mu''$ ,  $15^m$  yıldızlar için  $24 \mu''$ ,  $20^m$  yıldızlar için  $540 \mu''$  astrometrik duyarlılık
- ✓ **BP/RP:** Mavi (330-680 nm) ve kırmızı (640-1050 nm) bantlarda G2V tayf türünden  $3^m$ - $12^m$  yıldızlar için  $\sim 4^{mmag}$ ,  $18^m$  yıldızlar için  $20^{mmag}$ ,  $20^m$  yıldızlar için  $\sim 50^{mmag}$  fotometrik duyarlılık
- ✓ **RVS:** 1 km/s ( $V=11^m.5$ ) and 30 km/s ( $V=17^m.5$ ) dikine hız duyarlılığı
- ✓ Astrometri yöntemiyle binlerce uzun dönemli dev gaz gezegen keşfedeceği tahmin ediliyor.





# HD 114762b (Latham vd. (1989)) ve Gaia Gözlemleri (Kiefer 2019)



Parameters	median	1- $\sigma$ confidence interval
$P$ [days]	83.915	83.912 – 83.918
$e_b$	0.566	0.555 – 0.578
$\omega$ [°]	201.3	200.3 – 202.3
$\Delta T_p$ [JD]	-0.0017	-0.1879 – -0.1861
$M_b \sin i$ [ $M_J$ ]	10.72	10.33 – 11.10
$M_\star$ [ $M_\odot$ ]	0.80	0.76 – 0.84
$\pi$ [mas]	25.90	25.45 – 26.35
$a$ [mas]	1.00	0.90 – 1.10
$I_c$ [°]	4.87	4.02 – 5.91
$M_b$ [ $M_J$ ]	140	113 – 173
$a_{ph}$ [mas]	1.35	1.12 – 1.64
$\Delta V$	8.6	7.6 – 9.6
$\Delta\mu$ [mas/yr]	1.14	0.57 – 1.96

*Accounting for HD 114762 B*

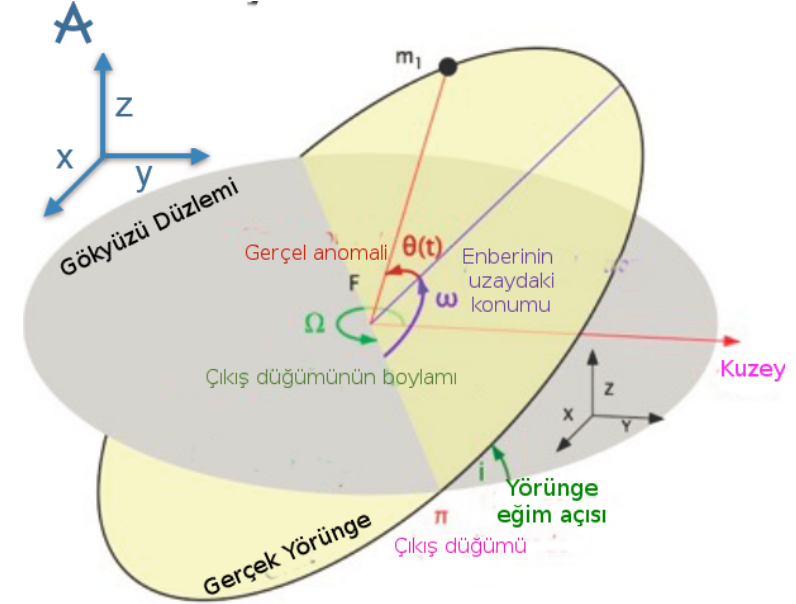
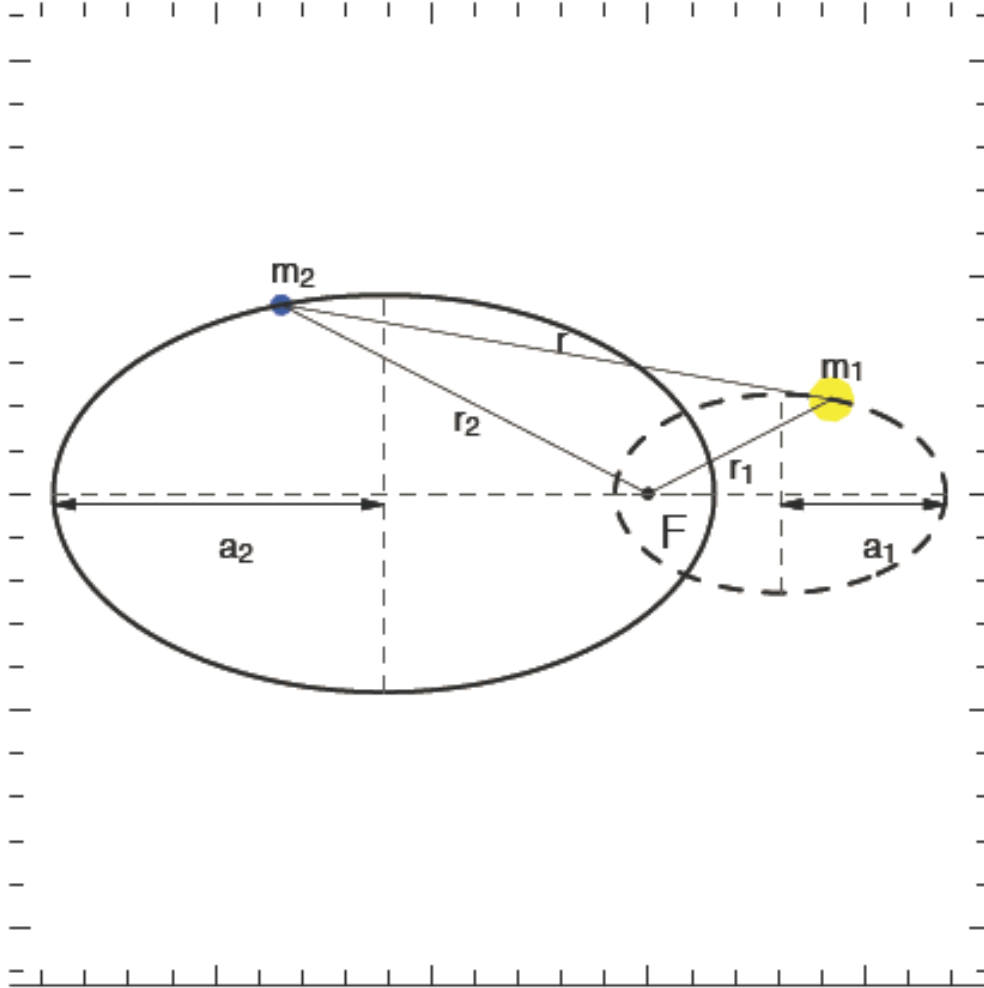
$I_c$ [°]	6.23	4.97 – 8.16
$M_b$ [ $M_J$ ]	107	80 – 137
$a_{ph}$ [mas]	1.06	0.81 – 1.33
$\Delta V$	9.8	8.6 – 11.3
$\Delta\mu$ [mas/yr]	0.94	0.46 – 1.60

Görüldüğü gibi dikine hızdan  $m_2 \sin i \sim 11 M_{jüp}$  olduğu bulunan bu cismin Gaia astrometrisinden elde edilen yörünge eğim açısı  $4^\circ.87$  'dir. Bu da cismin  $\sim 140 M_{jüp}$  kütlede M tayf türünden bir yıldız bileşen olduğunu göstermektedir.

# Doğrudan Görüntüleme Tekniği



# “Doğrudan görüntüleme göreli yörüngeyi ölçer”



Sonuç olarak bu kez gezegenin yıldız etrafındaki yörüngesi (görelî yörünge) gözlenmiş olur. Yıldızın ortak kütle merkezi etrafındaki yörüngesi çözülemeyebilir.

Doğrudan görüntüleme yönteminde de ölçülebilen lineer uzaklıklar değil, açısal uzaklıklardır. Ölçülen bu açısal uzaklığın değişim genliğine bu kez “doğrudan görüntüleme sinyali” adı verilir. Burada  $d$  yıldızın parsek biriminde uzaklığı,  $M_1$  ve  $M_2$  sırasıyla yıldızın ve gezegenin kütleleri,  $a_r$  görelî yörüngenin yarı büyük eksen uzunluğu,  $P$  ise yıl biriminde yörünge dönemidir.  $a_r$ : Yıldızın ortak kütle merkezi etrafındaki hareketinin çözülemediği durumda gökyüzü düzlemi üzerinde gezegen-yıldız arası uzaklığa karşılık gelmektedir.

$$\alpha_r = \frac{a_r}{d} = \frac{P^{2/3} (M_1 + M_2)^{1/3}}{d}$$

$M_1 \gg M_2$  yaklaşımı uygulanırsa yıldızın uzaklığı bilirse bile bu kez ikinci cismin kütlelerini bulamazsınız ancak sinyal de bu şekilde ikinci cisim kütlelerinden bağımsız hale gelir.

$$\alpha_r = \frac{P^{2/3} M_1^{1/3}}{d}$$

**Sonuç 1.** Doğrudan görüntüleme tekniğiyle oldukça küçük açısal ayrıklıkları ölçme imkanı vardır.

**Sonuç 2.** Ancak problem çok parlak bir yıldızın yanındaki çok sönük olan gezegende foton toplamaktır.

**Sonuç 3.** Bu nedenle yıldızına uzak gezegenler gözlenebilmektedir.

## Gerekli Ölçüm Duyarlılığı

		<u>Dönemi</u>	<u><math>d_*(10 \text{ pc})</math></u>	<u><math>d_*(50 \text{ pc})</math></u>	
Gezegen	@	1 yıl	100	20	$10^{-6}$ yaysn
Gezegen	@	5 yıl	290	58	$10^{-6}$ yaysn
Gezegen	@	11.86 yıl	520	104	$10^{-6}$ yaysn
Gezegen	@	30 yıl	965	193	$10^{-6}$ yaysn
Gezegen	@	100 yıl	2154	430	$10^{-6}$ yaysn

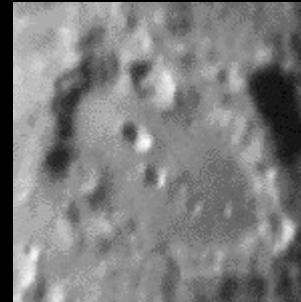


## Ana Problem:

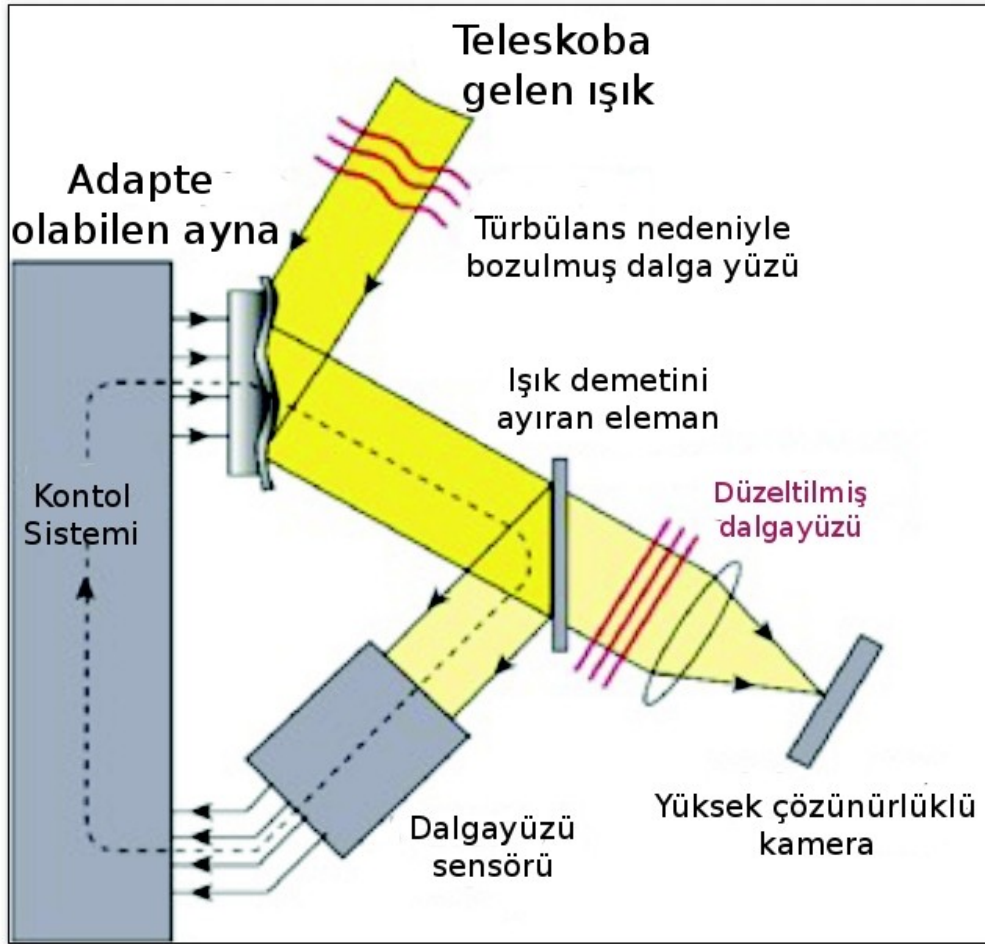
Atmosferik türbülans kaynaklı  
sintilasyon (titreşim)

Çözümlerden biri yüksek ve nemin düşük  
olduğu yerlere gitmek:

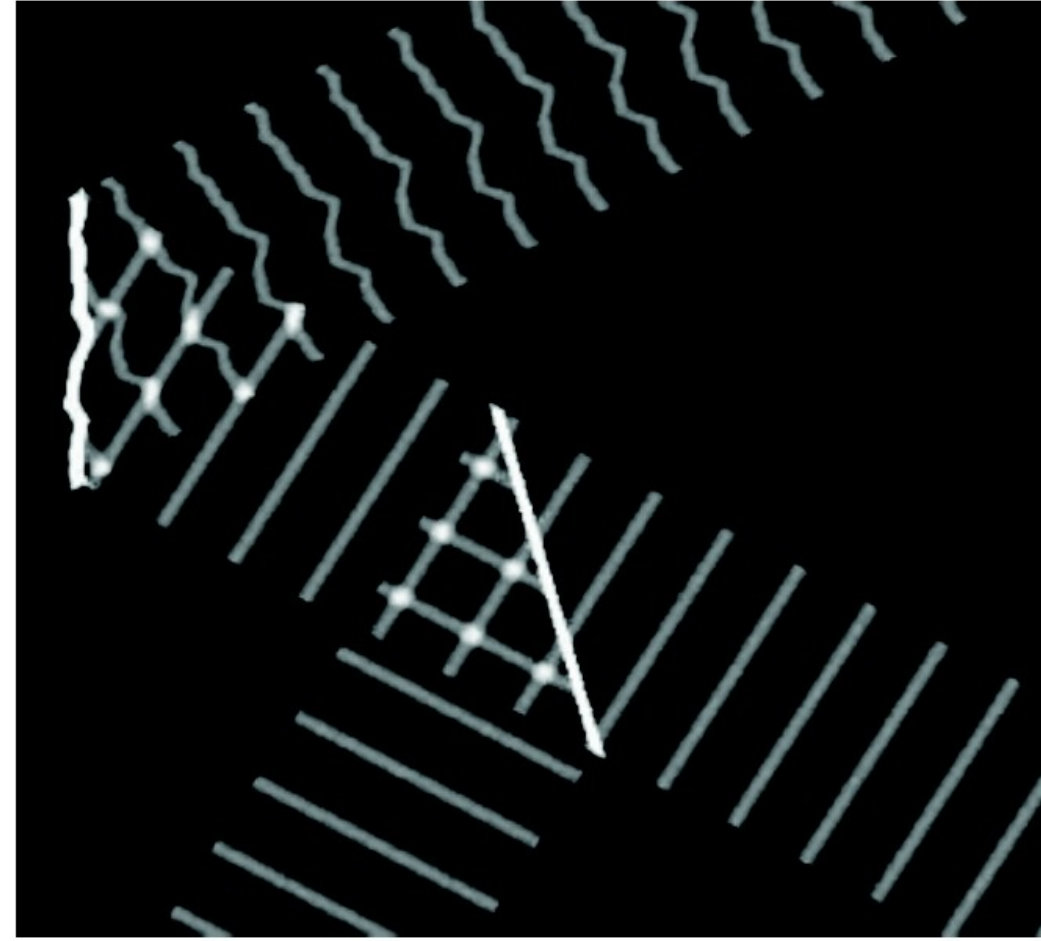
- Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi (1250m):  $\sim 3-6''$
- TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (2500m):  $\sim 1-3''$
- La Silla Gözlemevi, Şili (2400m): ort.  $0''.8$
- Mauna Kea, Hawai (4205m): ort.  $0''.6$



# Adaptif Optik



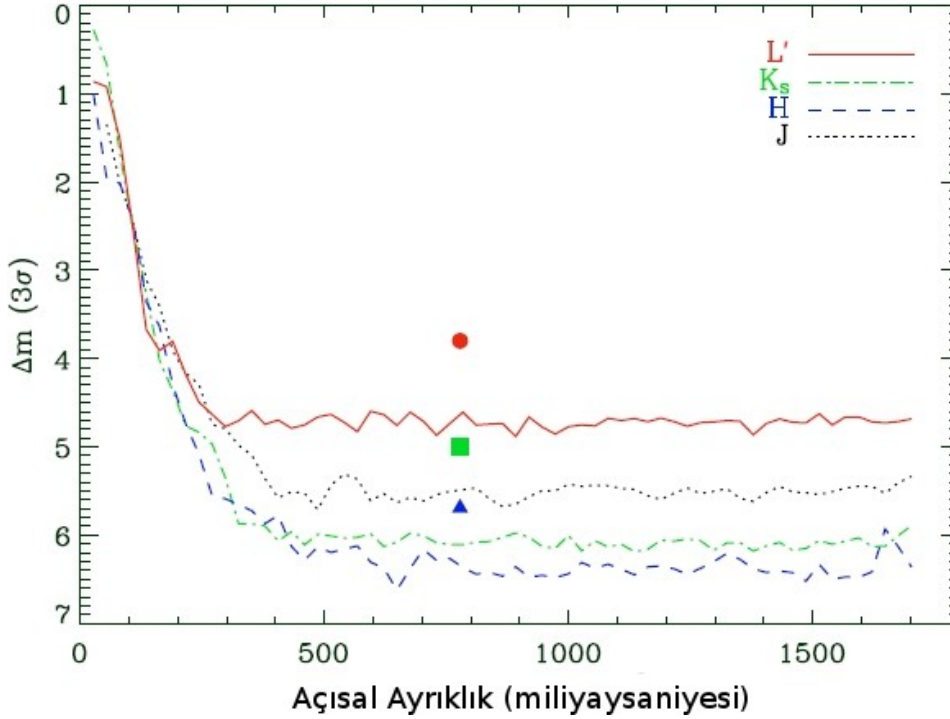
© CFAO/Lawrence Livermore National Laboratory



© Lacombe 2001

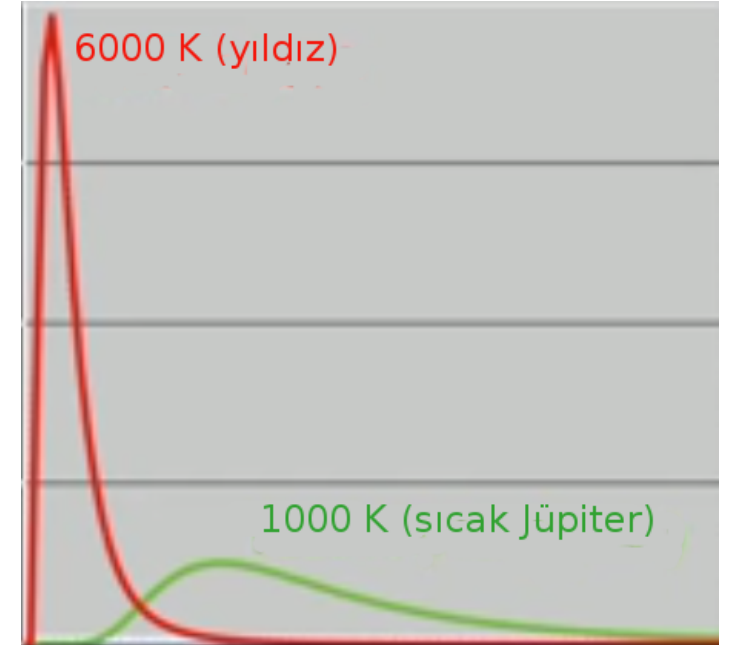


## 2. Problem: Parlak yıldız problemi!



Şekilde 4 ayrı fotometrik bantta (J,H,K,L) gezegenin tespit edilebilmesinin mümkün olduğu Gezegen-Yıldız parlaklık farklarının açısal ayrıklığa göre değişimi verilmiştir (Chauvin vd. 2004).

**Sonuç:** Gezegenle yıldızın arasında 5 kadir (100 kat parlaklık) fark olması halinde dahi, gezegeni tespit edebilmek için yıldızına uzaklığının (gözlem yapılan fotometrik banda göre değişmekle birlikte) 250 miliyaysaniyesi civarında olduğu söylenebilir. Bu oldukça büyük bir açısal ayrıklıktır ve bizi keşif için en yakın gezegen sistemleriyle sınırlar!



**Çözüm 1:** Gezegenin ışınımının yıldızın ışınımından daha baskın olduğu dalgalılarına gitmek!

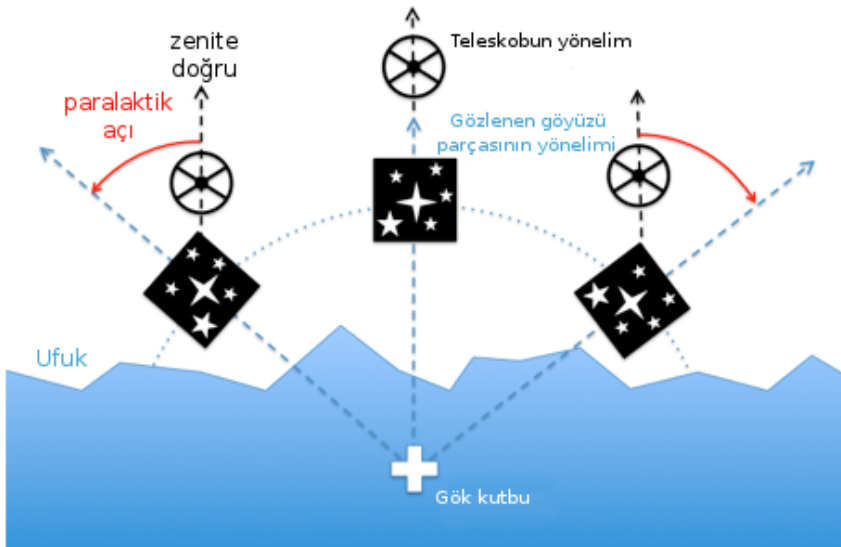
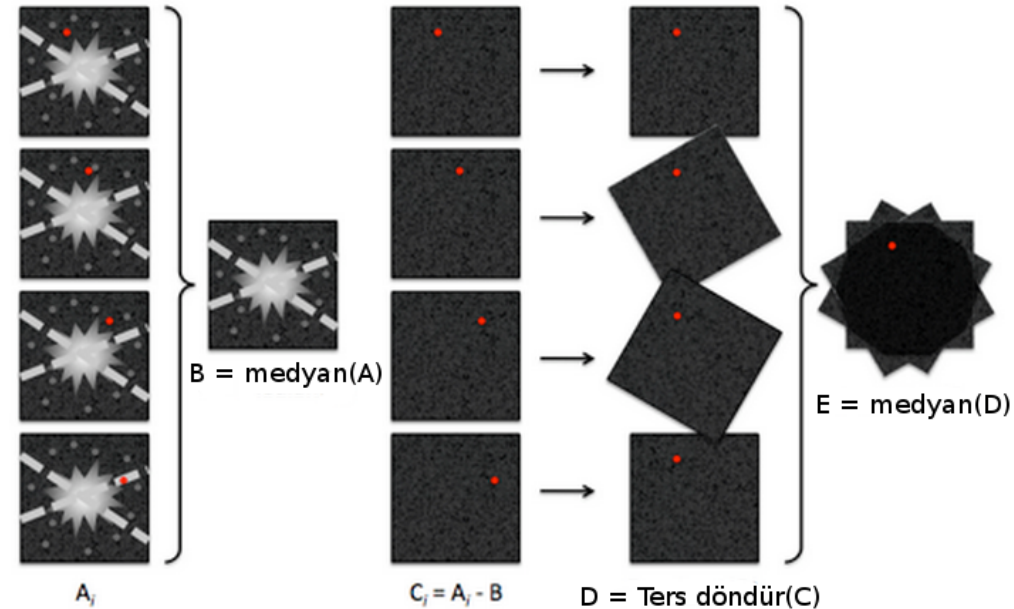
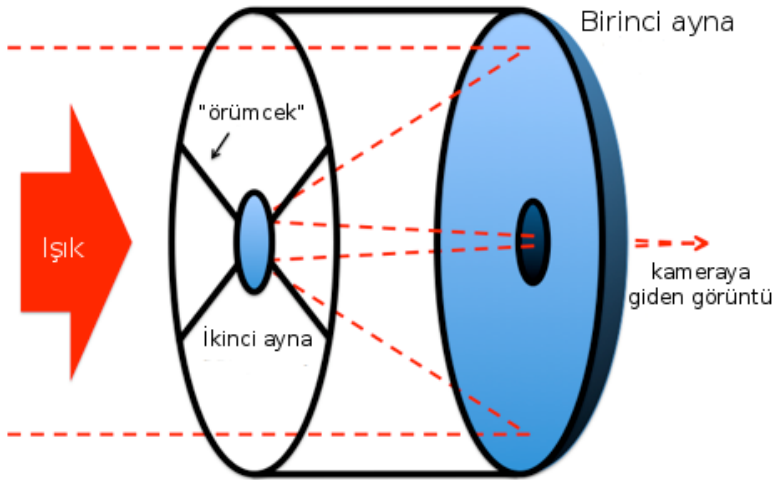
**Çözüm 2:** Işınım gücü daha düşük yıldızlar etrafında gezegen aramak (örn. M cüceleri!)



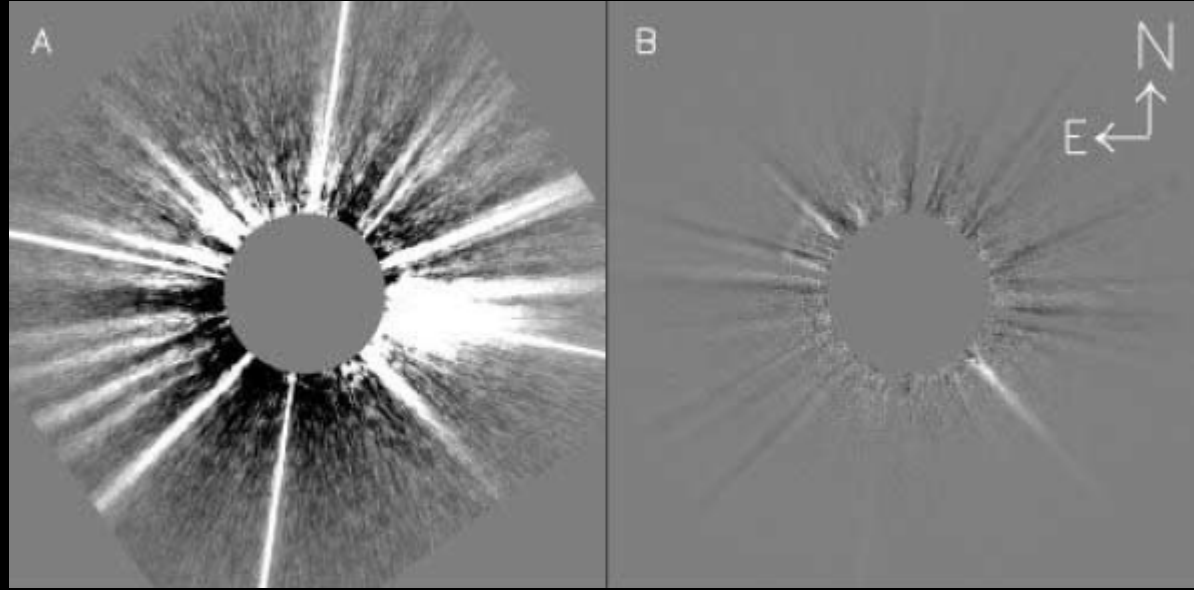
# Açısal Diferansiyel Görüntüleme Angular Differential Imaging (ADI)

## 3. Problem:

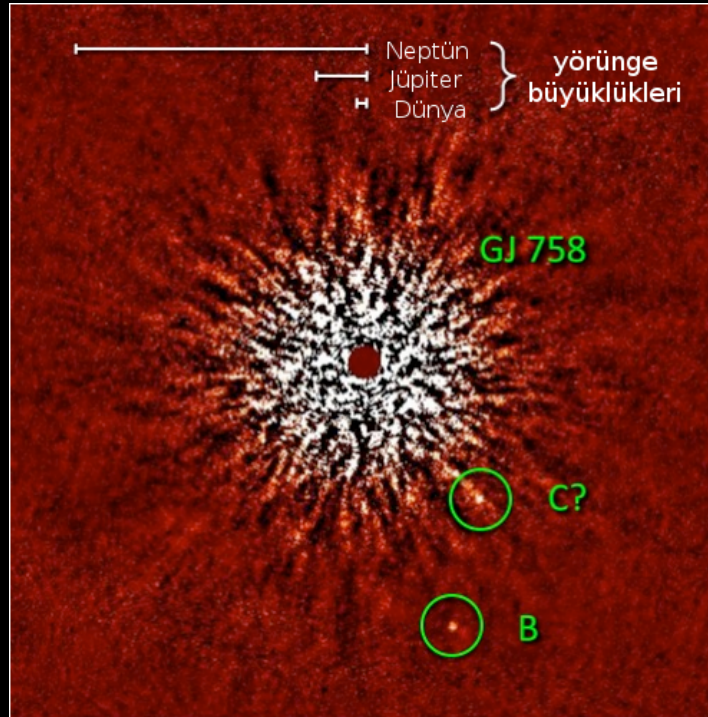
### Parlak yıldız problemi - 2



**Çözüm:** Standart gözlemlerde CCD üzerinde yıldızlar hep aynı pozisyonlara gelir ve böylece üstüste birleştirilebilirler. Ancak ADI için teleskop gökyüzüne hep tepesi zenite gelecek şekilde yönlendirilir. Böylece olası bir gezegenin yıldıza göre gökyüzündeki pozisyonu sürekli değişir. Gece boyunca alınan tüm görüntülerin medyanı alınırsa gezegen hep aynı piksele gelmeyeceği için medyana etki etmez. Bu median görüntü tüm görüntülerden çıkarıldığında geriye sadece gezegen görüntüsü kalır. Gezegenin olduğu piksel konumlarını üstüste denk getirmek için görüntüler tekrar (bu kez ters yönde!) döndürülür ve tekrar median birleştirilir. Sonuç olabildiğince yıldız ışığından arındırılmış gezegen görüntüsüdür! Bu tekinçe **ADI tekniği** adı verilir.

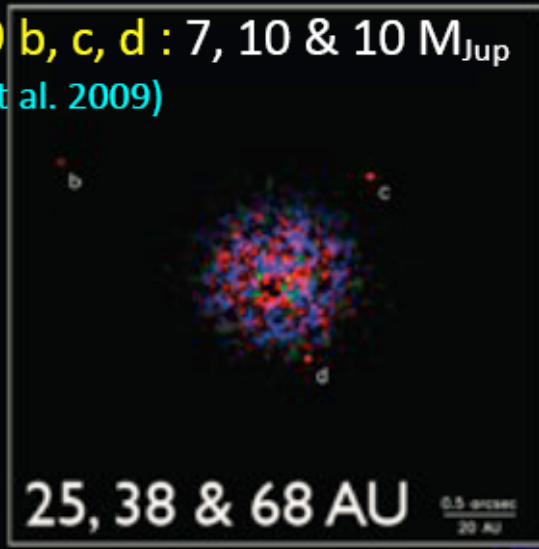


A. Vega'nın çevresindeki (ortada kapatılmış disk) piksellerdeki Vega kaynaklı ışık.  
B. Aynı bölgenin Açıl Diferansiyel Görüntüleme sonrası görüntüsü (Marois vd. 2006)



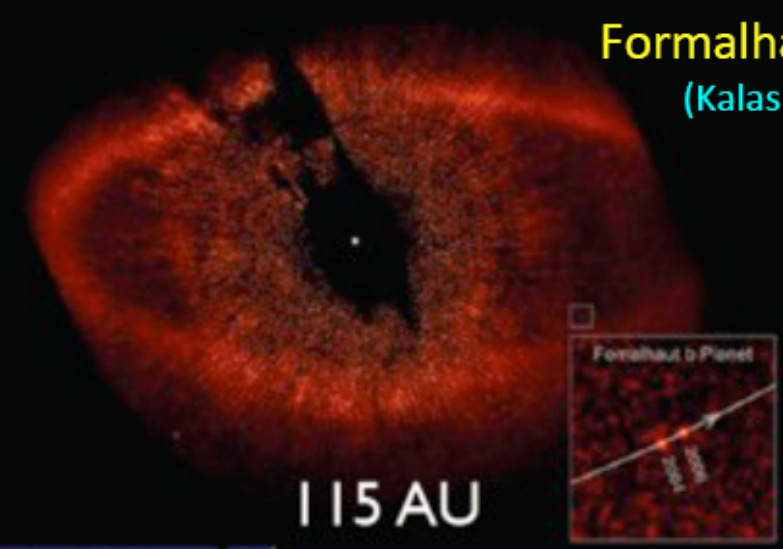
GJ 758 Yıldız Sistemi  
Thalmann vd. (2009)

**A5 V** HR8799 b, c, d : 7, 10 & 10  $M_{Jup}$   
(Marois et al. 2009)



25, 38 & 68 AU

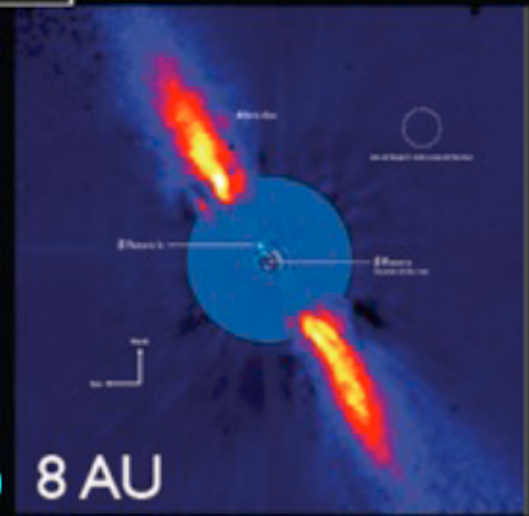
**Formalhaut b** : 3  $M_{Jup}$   
(Kalas et al. 2009)



115 AU

**A4 V**

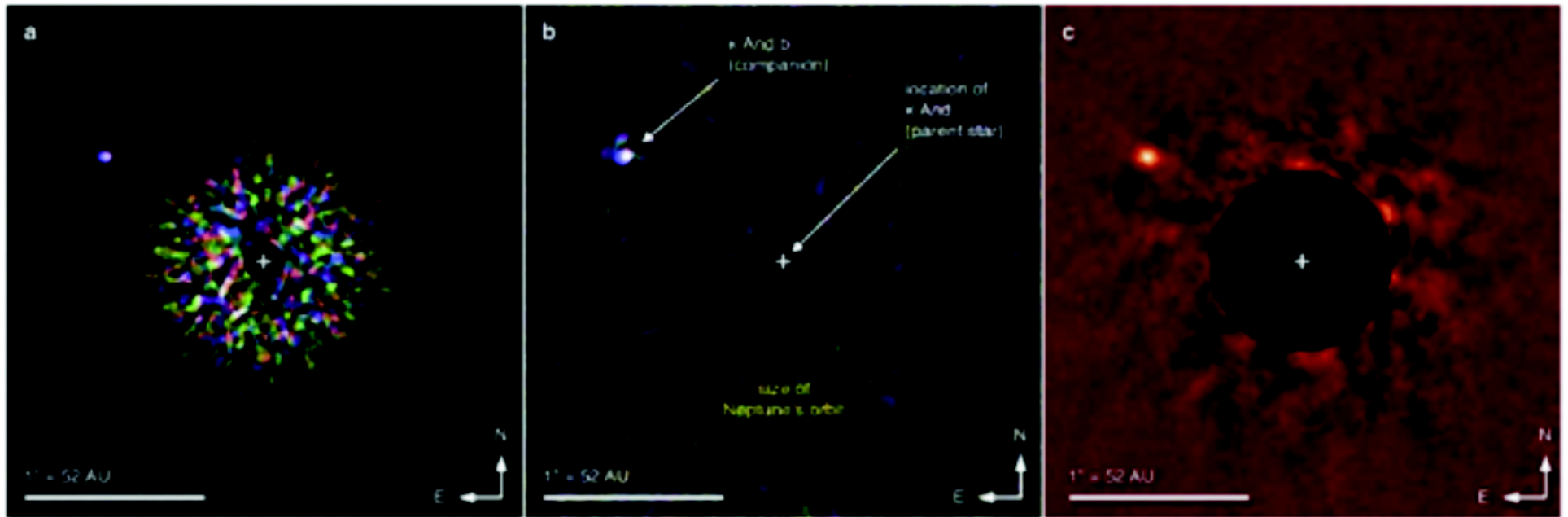
**A6 V** Beta Pic b : 8  $M_{Jup}$   
(Lagrange et al. 2009, 2010)



8 AU

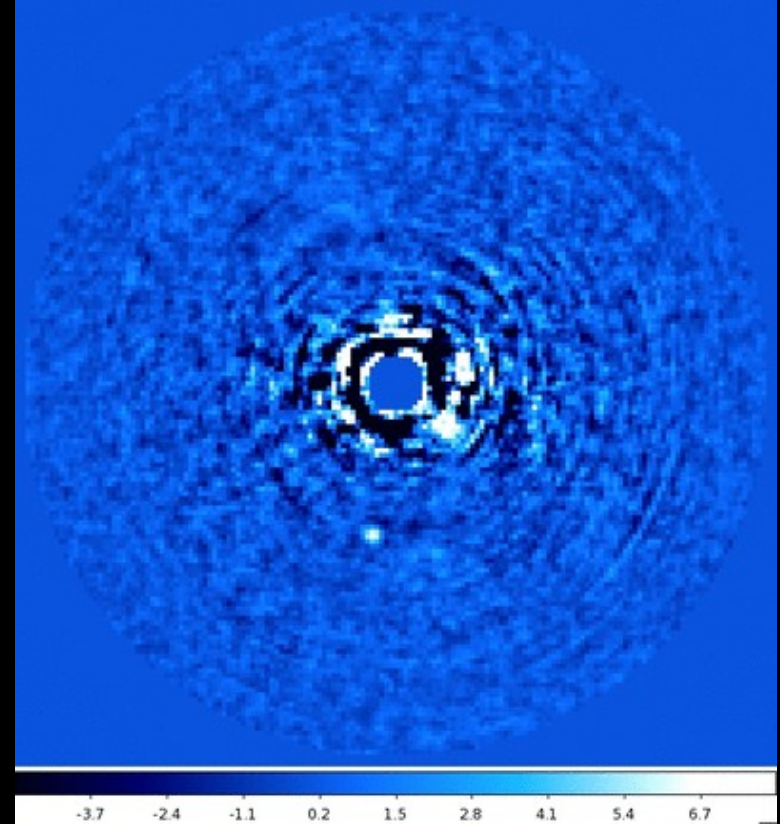
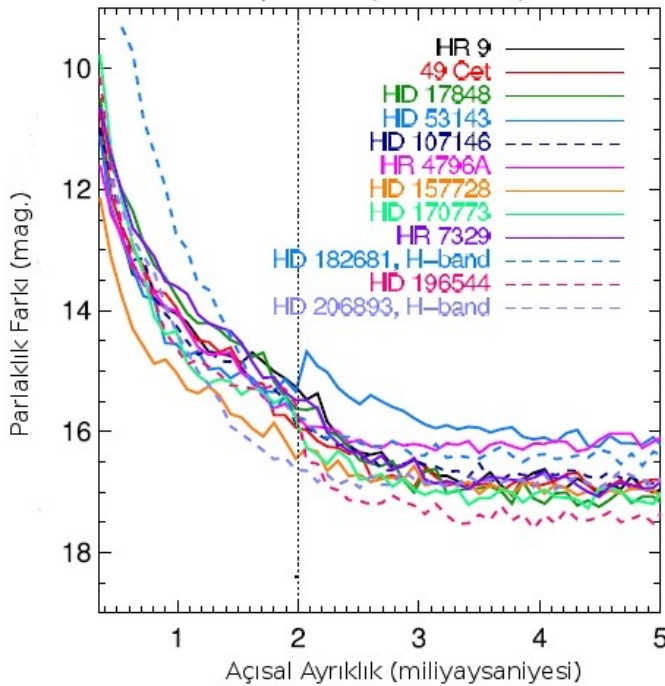
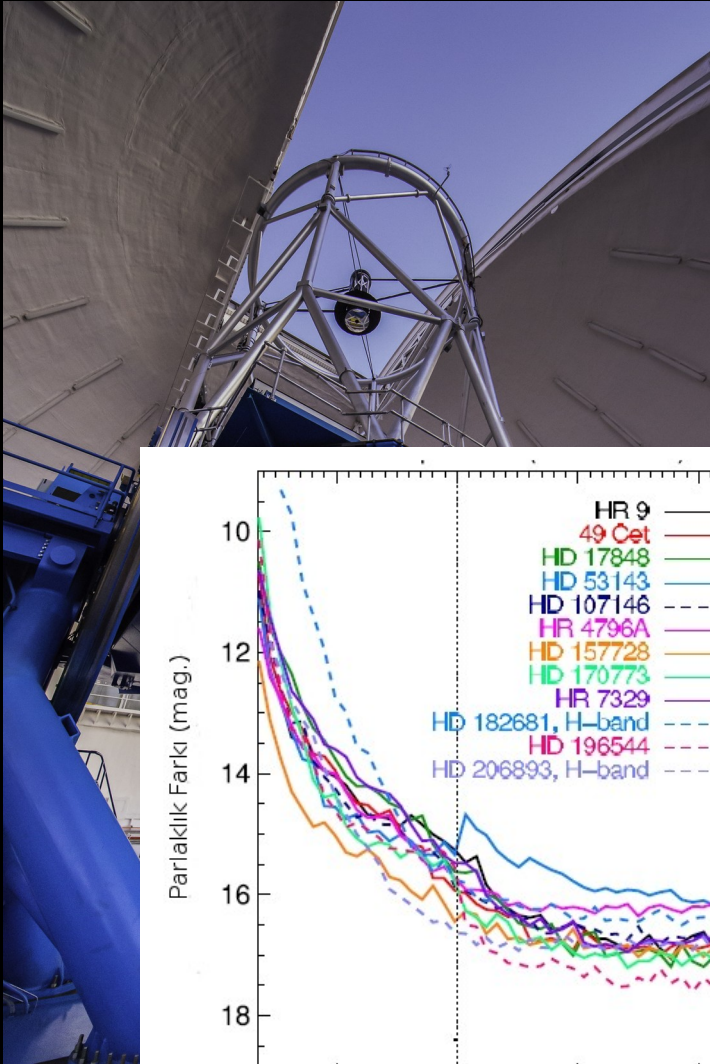
Disk Karasızlığıyla Oluşmuş Olabilecek **Büyük Kütleli** ve **Yıldızından Uzak** (sıcaklığın düşük olduğu diskin dış bölgelerindeki) Gezegenlere Örnekler Tamamı doğrudan görüntüleme yöntemiyle keşfedilmiştir.

# B9 Tayf Türünden Bir Yıldız: $\kappa$ And + $12.9 M_{\text{jüpiter}}$ @55 AB



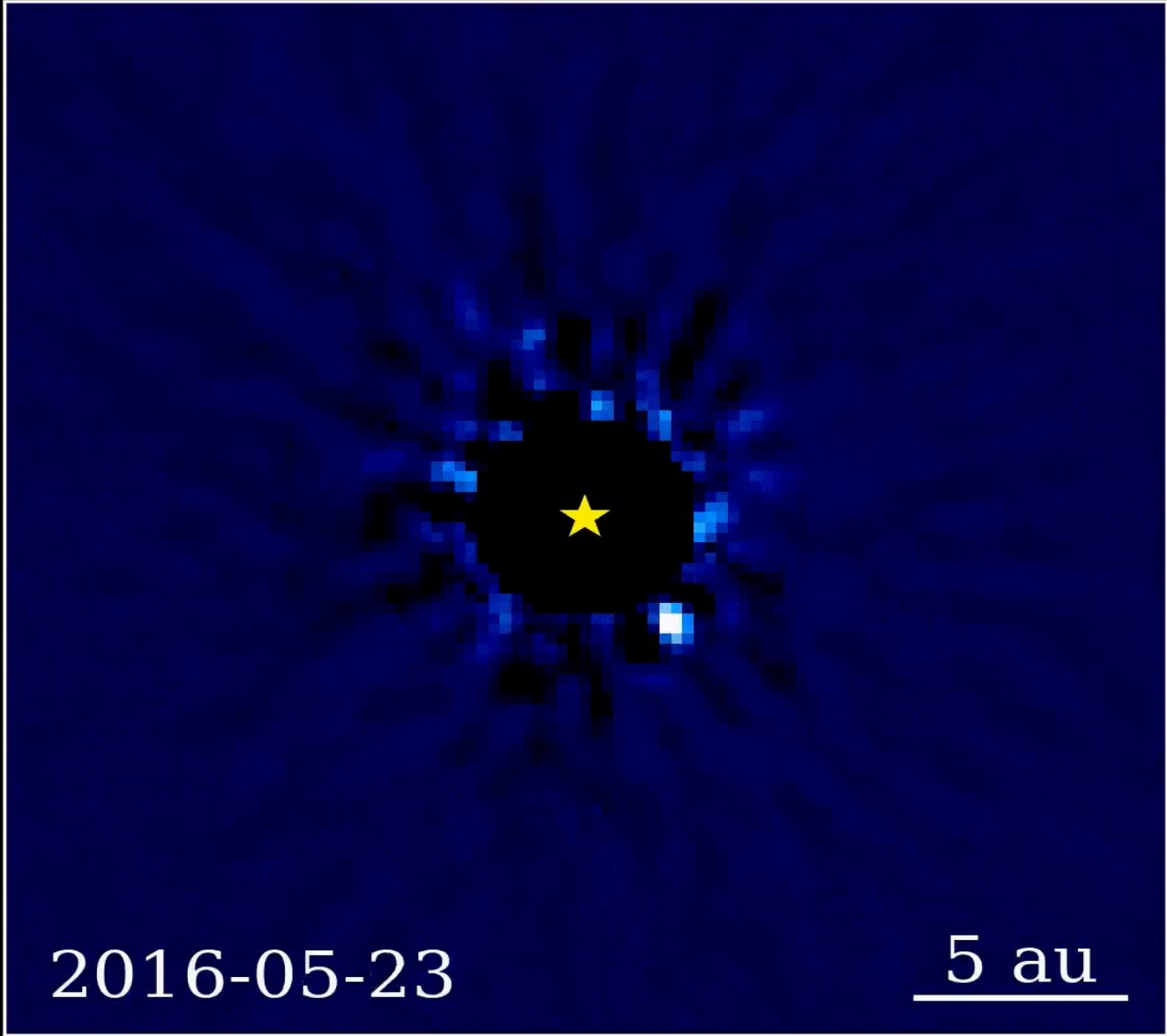
Carson et al. 2013

# GPI (Gemini Planet Imager)



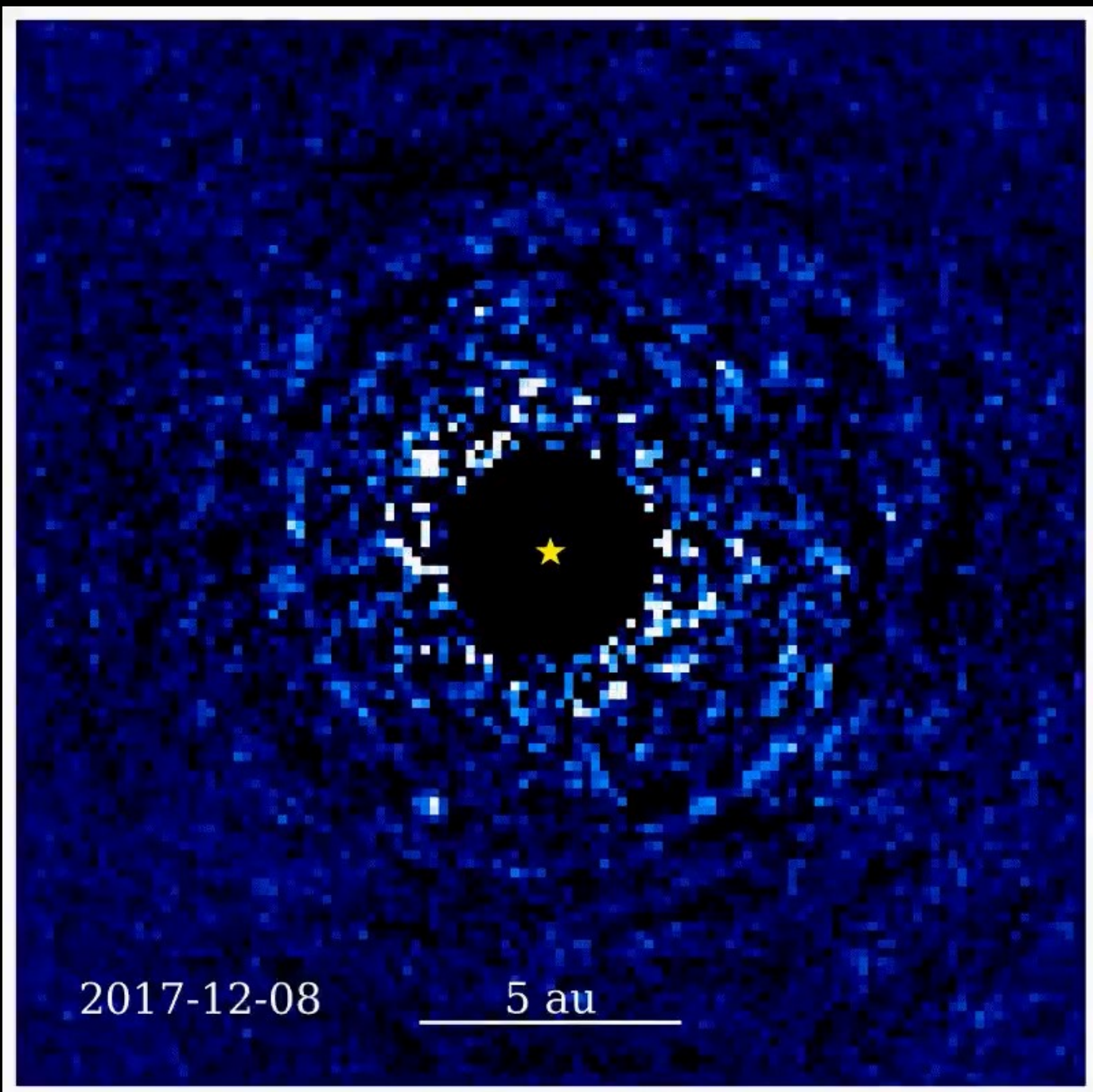
51 Eri b gezegenin yörünge hareketi

GPI'nın etrafında gezegen tespit edebileceği yıldızlar için Gezegen-Yıldız parlaklık farklarının açısal ayrıklığa göre değişimi grafiği (Wahhaj vd. 2013)



2016-05-23

5 au



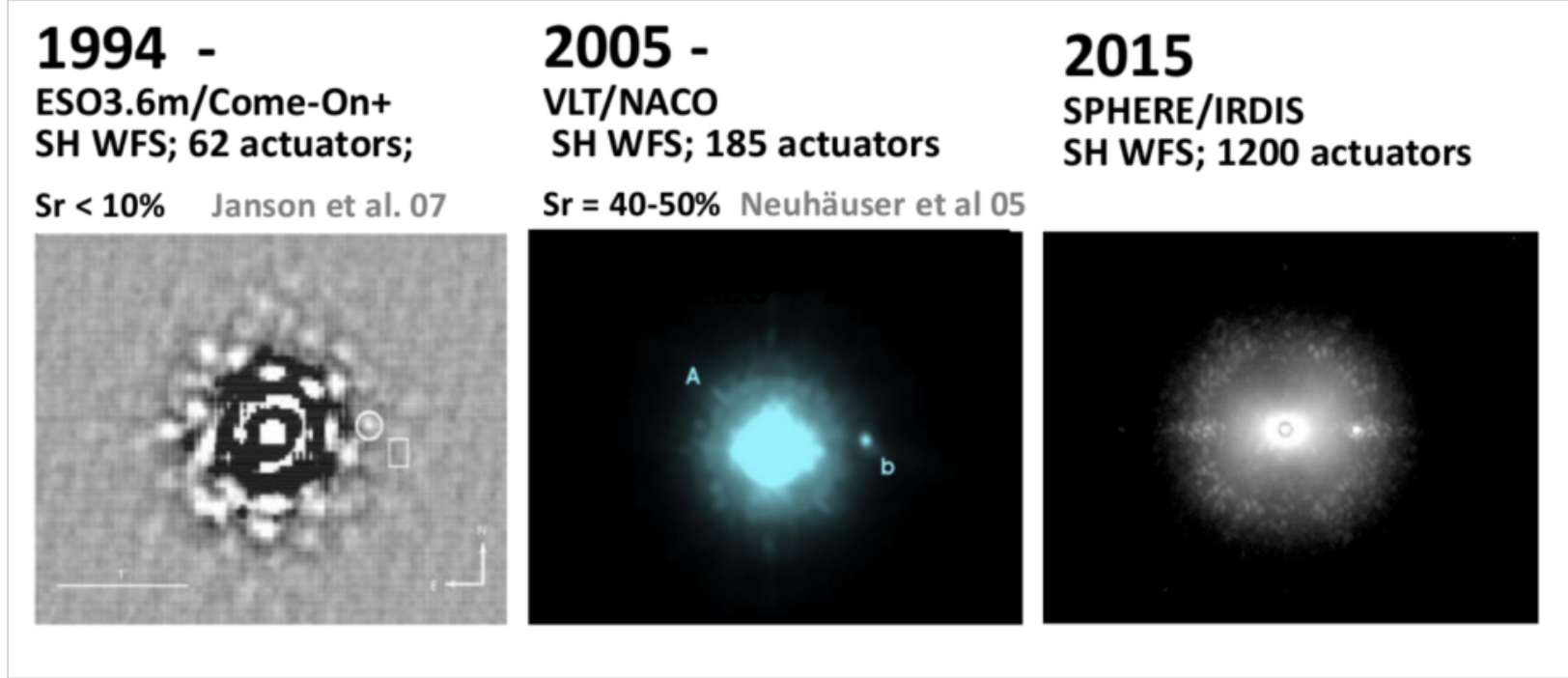


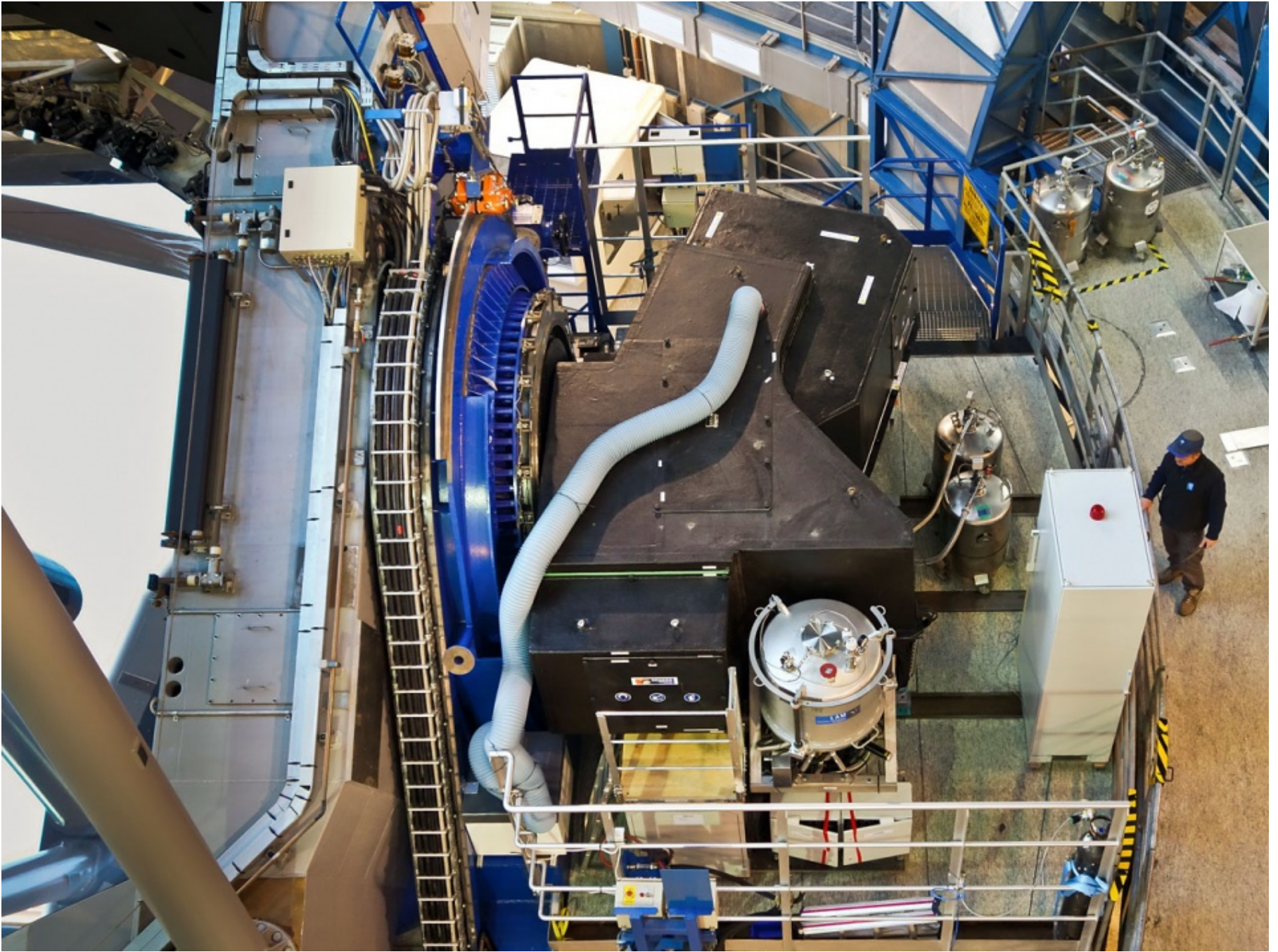
Figure 2. Observation fo the young GQ Lupi star (K7V;  $V = 11.4$ ;  $K = 7.1$ ) hosting a brown dwarf companion located at 730 mas with three generations of ESO AO instruments: ESO3.6m/Come-On+, NaCo and SPHERE at VLT.

20 yıllık bir süre zarfında değişen teknolojiyle artan doğrudan görüntüleme hassasiyeti GQ Lupi çift sistemine bağlı kahverengi cüce bileşenin, yıldızının ışığından giderek daha iyi ayrılarak gözlenebilmesini sağlamıştır.



Telescope	AO/Instruments	1 <sup>st</sup> Light	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Coronagraphs	Diff. techniques
Palomar	PALAO/PHARO	2000	1.1 – 2.5	CLC/4QPM/OVC	ADI
Subaru	CIAO	2000	0.9 – 5.0	CLC	ADI
Keck	NIRC2-OSIRIS-NIRSPEC	2001	0.9 – 5.0	CLC/OVC	ADI
VLT	NACO	2002	1.0 – 5.0	CLC/FQPM/APP/OVC	SDI/PDI/ADI
Gemini-N	ALTAIR/NIRI	2003	1.1 – 2.5	CLC	ADI
VLT	MACAO/SINFONI	2004	1.0 – 2.5		IFS
Gemini-S	NICI	2007	1.1 – 5.0	CLC	SDI/ADI
Subaru	AO188/HiCIAO	2008	1.1 – 2.5	CLC/PIAA/8QPM	SDI/PDI/ADI
Palomar	PALAO/PHARO-P1640	2009	1.1 – 1.7	APLC/OVC	IFS/ADI
LBT	FLAO/LMIRCAM	2012	1.0 – 5.0	CLC/OVC	ADI
Magellan	MagAO/VisAO-CLIO	2012	0.6 – 5.0	CLC	ADI
Gemini-S	GPI	2013	1.1 – 2.3	CLC/ALC	IFS/ADI/PDI
VLT	SPHERE	2014	0.5 – 2.3	CLC/ALC/4QPM	IFS/ADI/PDI
Subaru	SCEAO/HiCIAO-CHARIS	2016	0.5 – 2.2	PIAA	IFS/ADI/PDI

8 – 10 metre sınıfı teleskoaplarda çalıştırılmakta olan doğrudan görüntüleme cihazlarının güncel bir listesi (Chauvin 2018).

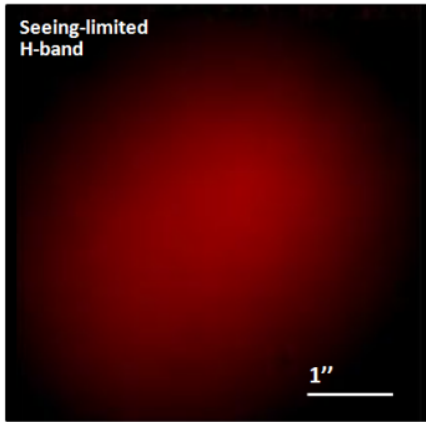


VLT'de bağı doğrudan görüntülemenin yanı sıra polarimetri de yapabilen SPHERE cihazı.  
<https://www.unige.ch/sciences/astro/exoplanets/en/projects/sphere/>

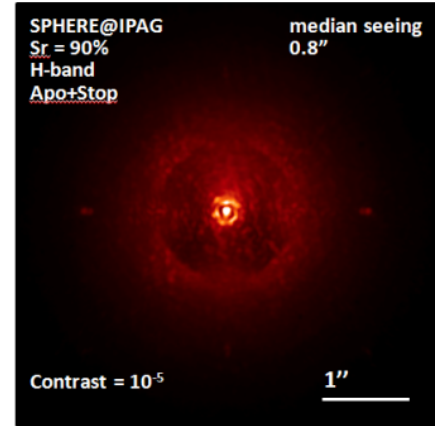
# Doğrudan görüntüleme tekniği ile gezegen arayan projeler

Table 3. Deep imaging surveys of young ( $< 100$  Myr) and intermediate-old to old ( $0.1 - 5$  Gyr), nearby ( $< 100$  pc) stars dedicated to the search for planetary mass companions. We have indicated the telescope and the instrument, the imaging mode (I: standard imaging; Sat-I: saturated imaging; Cor-I: coronagraphic imaging ; SDI: simultaneous differential imaging; ADI: angular differential imaging; ASDI: angular and spectral differential imaging), the filters, the field of view (FoV), the number of stars observed (#), their spectral types (SpT) and ages (Age).

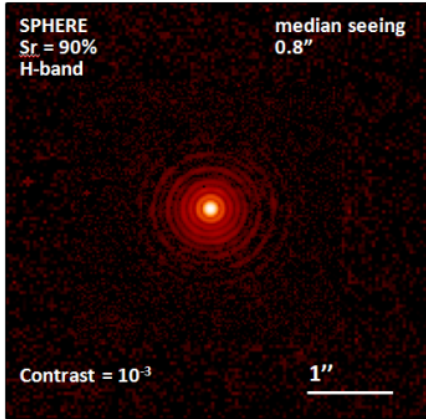
Reference	Telescope	Instr.	Mode	Filter	FoV (as)	#	SpT	Age (Myr)
Nakajima+94	Palomar	AOC	Cor-I	<i>I</i>	60	24	G-M	Field
...								
Chauvin+03	ESO3.6m	ADONIS	Cor-I	<i>H, K</i>	13	29	G-M	$\lesssim 50$
Neuhäuser+03	NTT	Sharp/Sofi	Sat-I	<i>K/H</i>	20	33	A-M	$\lesssim 50$
Lowrance+05	<i>HST</i>	NICMOS	Cor-I	<i>H</i>	19	45	A-M	10 – 600
Masciadri+05	VLT	NaCo	Sat-I	<i>H, K</i>	14	28	KM	$\lesssim 200$
Biller+07	VLT/MMT	NaCo/ARIES	SDI	<i>H</i>	5	45	G-M	$\lesssim 300$
Kasper+07	VLT	NaCo	Sat-I	<i>L'</i>	28	22	G-M	$\lesssim 50$
Lafrenière+07	Gemini-N	NIRI	Sat-ADI	<i>H</i>	22	85	F-K	10-5000
Apai+08	VLT	NaCo	SDI	<i>H</i>	3	8	FG	12-500
Chauvin+10	VLT	NaCo	Cor-I	<i>H, K</i>	28	88	B-M	$\lesssim 100$
Heinze+10ab	MMT	Clio	Sat-ADI	<i>L', M</i>	15.5	54	F-K	100-5000
Janson+11	Gemini-N	NIRI	Sat-ADI	<i>H, K</i>	22	15	BA	20-700
Vigan+12	Gemini-N/VLT	NIRI	Sat-ADI	<i>H, K</i>	22/14	42	AF	10-400
Delorme+12	VLT	NaCo	Sat-ADI	<i>L'</i>	28	16	M	$\lesssim 200$
Rameau+13c	VLT	NaCo	Sat-ADI	<i>L'</i>	28	59	AF	$\lesssim 200$
Yamamoto+13	Subaru	HiCIAO	Sat-ADI	<i>H, K</i>	20	20	FG	$125 \pm 8$
Biller+13	Gemini-S	NICI	Cor-ASDI	<i>H</i>	18	80	B-M	$\lesssim 200$
Nielsen+13	Gemini-S	NICI	Cor-ASDI	<i>H</i>	18	70	BA	50-500
Wahhaj+13	Gemini-S	NICI	Cor-ASDI	<i>H</i>	18	57	A-M	$\sim 100$
Janson+13	Subaru	HiCIAO	Sat-ADI	<i>H</i>	20	50	A-M	$\lesssim 1000$
Brandt+14	Subaru	HiCIAO	Sat-ADI	<i>H</i>	20	63	A-M	$\lesssim 500$
Chauvin+15	VLT	NaCo	Sat-ADI	<i>H</i>	14	86	F-K	$\lesssim 200$
Meshkat+15ab	VLT	NaCo	APP-ADI	<i>L'</i>	28	20	AF	$\lesssim 200$
Bowler+15	Keck/Subaru	NIRC2/HiCIAO	Cor-ADI	<i>H</i>	10/20	78	M	$\lesssim 200$
Galicher+16	Keck	NIRC2	Cor-ADI	<i>H, K</i>	10	229	A-M	$\lesssim 200$
	Gemini-N/S	NIRI/NICI						
Durkan+16	<i>Spitzer</i>	IRAC	I	$4.5 \mu\text{m}$	312	73	A-M	$\lesssim 200$



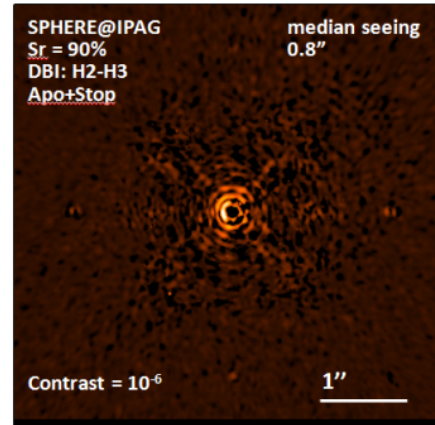
0- Uncorrected PSF



II- Stellar-Light Attenuation  
. Pupil and Image Control  
. Coronagraphy



I- High Angular Resolution  
. XAO with HO DMs  
. Wavefront sensing (1.2kHz)  
. NCPA corrections



III- Differential techniques  
. Reference (RDI)  
. Spectral (SDI)  
. Polarimetric (PDI)  
. Angular (ADI)  
. Coherent (CDI)

Çeşitli görüntüleme, koronografi ile yıldız ışığının etkisini azaltma (ing. stellar attenuation) ve ileri görüntü işleme teknikleri ile doğrudan görüntüleme tekniği oldukça gelişmiş durumdadır. Bugüne kadar bulunan ötegezegenlerin sayısı 90 sistemde 110 tanedir. Bu gezegenlerin çoğu genç (sıcak olması nedeniyle de ışınımı yıldızdan alınanla karşılaştırıldığında (kontrast) yüksek, bir kısmı henüz dağılmamış öngezegen diskinin içinde, yıldızından (ve buz çizgisinden) uzak yeni oluşmuş gezegenlerdir. Bu anlamda yöntem, örnek uzayımızda önemli bir parametre aralığını taramakta ve diğer yöntemlerden gelen yanlışlıkları da dengelemektedir.

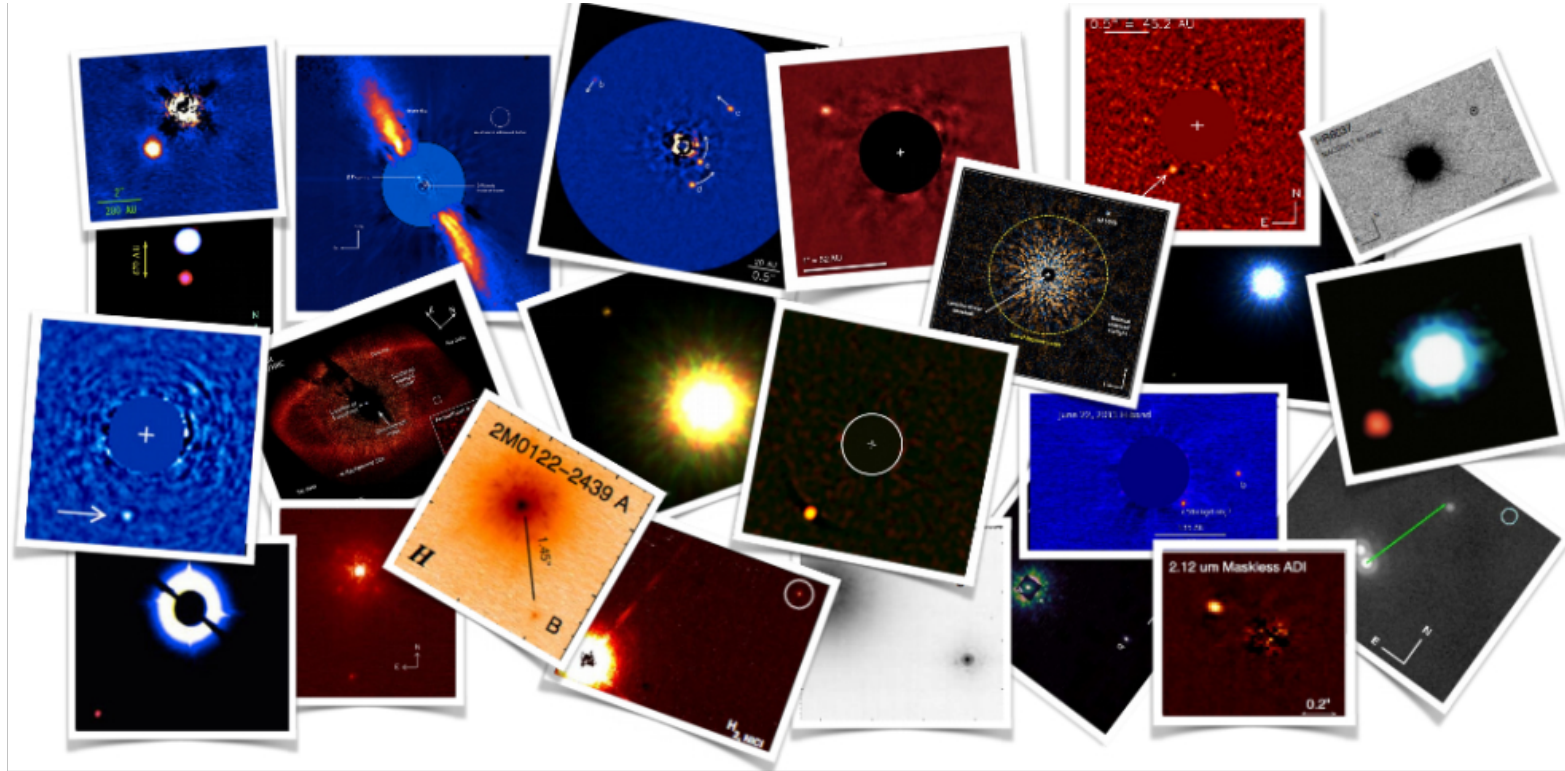


Figure 4. Non-exhaustive family portrait of exoplanets and/or planetary mass companions discovered in DI including the discoveries of (from right to left): DH Tau b, UScoCTIO 108 b, 51 Eri b, AB Pic b,  $\beta$  Pic b, Fomalhaut b, 2M0122-2439 b, HR 8799 bcde, RXJ1609 b, HD 106906 b,  $\kappa$  And b, HIP65426 b, CD-35 2722 b, GJ 504 b, HD 95086 b, GU Psc b, HIP 77900 b, HR 6037 b, 2M1207 b and 2M0143AB b.

Chauvin 2018

Doğrudan görüntüleme tekniği ile keşfedilmiş bazı gezegenler...

Table 2. Non-exhaustive, but illustrative list of substellar/planetary-mass companions and/or exoplanets discovered DI around young, nearby stars in the last two decades. Chauvin (2018)

Name	Primary			SpT	$\rho$ (as)	$\Delta$ (AU)	Companion		SpT	Date
	Asso.	Age (Myr)	d (pc)				$\Delta H$ (mag)	Mass <sup>a</sup> M <sub>jup</sub>		
Gl 229 B	Field	~ 500	5.8	M1V	7.8	45	10.0	35	T6.5	1995
...										
TWA 5 B	TWA	10	50	M3	2.0	100	4.9	20	M9	1999
HR 7329 B	$\beta$ Pic	20	48	A0	4.0	200	6.9	20	M8	2000
GSC 08047 B	Tuc-Hor	40	85	K1	3.2	250	6.9	25	M8	2003
2M1207 b	TWA	10	53	M8	0.78	41	5.7	3	L3	2004
AB Pic b	Tuc-Hor	40	45	K1	5.5	248	7.6	12	L1	2005
GQ Lup b	Lupus	1	140	K1	0.7	100	6.0	12	M8	2005
DH Tau b	Tau	2	140	M7	2.3	330	6.2	15	M8	2005
CHXR 73 b	Cha	2	160	M	1.3	210	5.2	12	M8	2006
CT Cha b	Cha	2	165	M	2.7	440	5.5	15	M8	2008
RXJ1609 b	Upp Sco	5	150	K7	2.2	330	7.8	8	L4	2008
HR 8799 (b)	Col	30	39.4	A5	1.72	68	12.5	7	L/T	2008
(c)	-	-	-	-	0.94	37	11.6	10	L/T	2008
(d)	-	-	-	-	0.66	26	11.6	10	L7	2008
(e)	-	-	-	-	0.39	15	11.5	10	L7	2010
$\beta$ Pic b	$\beta$ Pic	23	19.3	A6	0.4	9	10.0	8	L1	2008
Fomalhaut b	Field	200-400	7.7	A4	15.5	115	-	$\leq 3$	?	2008
$\kappa$ And b	Col?	10-150	51.6	B9	1.1	55	10.6	13	L5	2013
HD 95086 b	LCC	17	90.3	A8	0.6	61	13.1	5	L7	2013
GJ 504 b	Field	120	17.5	G0	2.5	44	16.3	4	T	2013
GU Psc b	AB Dor	140	48	M3	42	2000	8.1	11	T3.5	2014
51 Eri b	$\beta$ Pic	23	29.4	F0	0.55	13	14.4	2	T3	2015
HIP 65426 b	LCC	17	83.9	A2	0.83	92	11	9	L5	2017
PDS 70 b	UCL	3	113.4	K7	0.19	9.3	29	5	mid-L	2018

Doğrudan görüntüleme tekniği ile keşfedilmiş bazı gezegenler ve yıldızlarına ilişkin parametreler.

# Kaynaklar

- ✓ Bean, J. L., vd., 2007, "The Mass of the Candidate Exoplanet Companion to HD 33636 from Hubble Space Telescope Astrometry and High-Precision Radial Velocities", The Astronomical Journal, 134, 749
- ✓ Bennett, D.P., 2009, "Detection of Extrasolar Planets by Gravitational Microlensing", arXiv:0902.1761v1
- ✓ Bennett, D.B. vd, 2010, "Masses and Orbital Constraints for the OGLE-2006-BLG-109Lb,c Jupiter/Saturn Analog Planetary System", The Astrophysical Journal, 713, 837-855
- ✓ Beaulieu, J.P. vd. 2006, "Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing", Nature, 439, 437
- ✓ Bond, I.A. vd., 2004, "OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53: A Planetary Microlensing Event", The Astrophysical Journal, 606, L155-L158
- ✓ Chauvin G., vd., 2004, "A giant planet candidate near a young brown dwarf. Direct VLT/NACO observations using IR wavefront sensing", Astronomy & Astrophysics, 425, L29
- ✓ 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
- ✓ Gaudi, S. vd. 2008, "Discovery of a Jupiter/Saturn Analog with Gravitational Microlensing", "Introduction to Microlensing", in Proceedings of the Manchester Microlensing Conference
- ✓ Kalas, P., vd., 2008, "Optical Images of an Exosolar Planet 25 Light-Years from Earth", Science, 322, 1345
- ✓ Lagrange, A.M., vd., 2010, "A Giant Planet Imaged in the Disk of the Young Star  $\beta$  Pictoris", Science, 329, 57
- ✓ Marois, C. vd., 2006, "Angular Differential Imaging: A Powerful High-Contrast Imaging Technique", The Astrophysical Journal, 641, 556
- ✓ McArthur, B.E., 2010, "New Observational Constraints on the  $\nu$  Andromedae System with Data from the Hubble Space Telescope and Hobby-Eberly Telescope", The Astrophysical Journal, 715, 1203
- ✓ 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
- ✓ Sumi, T., 2011, "Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing", Nature, 453, 349-372
- ✓ Vahhaj, Z., vd., 2013, "The Gemini Planet-finding Campaign: The Frequency Of Giant Planets around Debris Disk Stars", The Astrophysical Journal, 773, 179