

### Astrometric Method

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

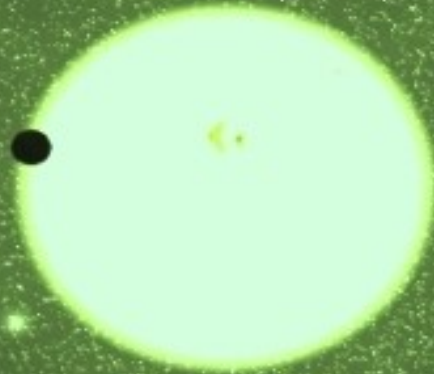
$$V_r (m/s) \approx \frac{30}{[P(\text{yr})]^{1/3}} \frac{M_p (J) \sin i}{[M_*(\odot)]^{2/3}}$$

### 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

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

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

# AST418 Gezegen Sistemleri ve Oluşumu

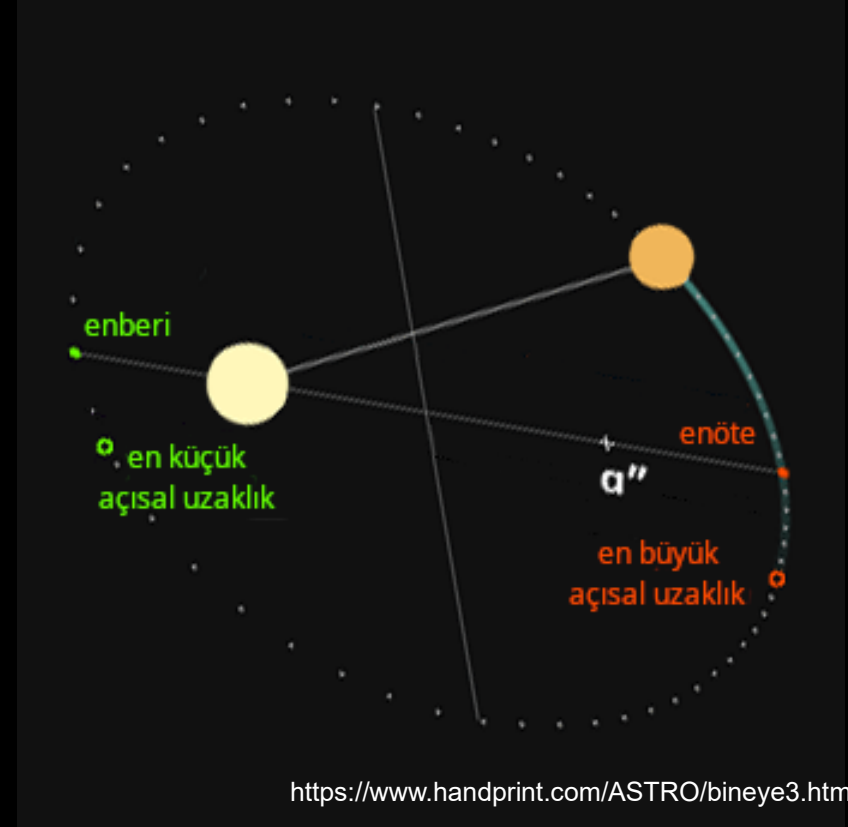
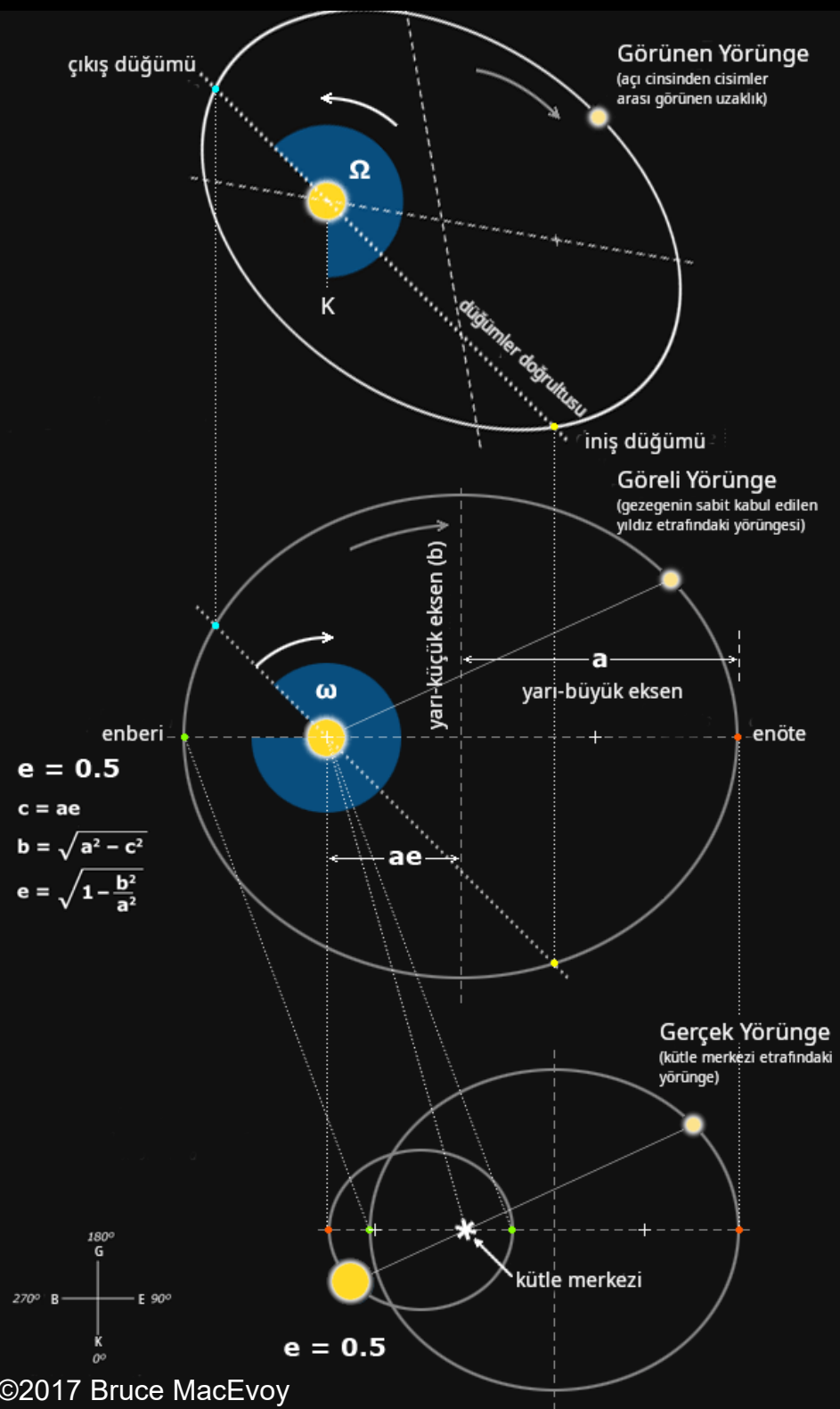
## Ders 6c : Diğer Keşif Yöntemleri Doğrudan Görüntüleme



# Doğrudan Görüntüleme Tekniği



# “Doğrudan görüntüleme görünen yörüngeyi ölçer”



Sonuç olarak bu kez gezegenin yıldız etrafındaki yörüngesinin gökyüzü üzerindeki izdüşümü (görünen 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. Aşağıdaki şekilde verilen doğrudan görüntüleme sinyalinin büyüklüğü Kepler’in 3. yasası ve küçük açı formülü kullanılarak kolaylıkla elde edilebilir.

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

$M_1 \gg M_2$  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.

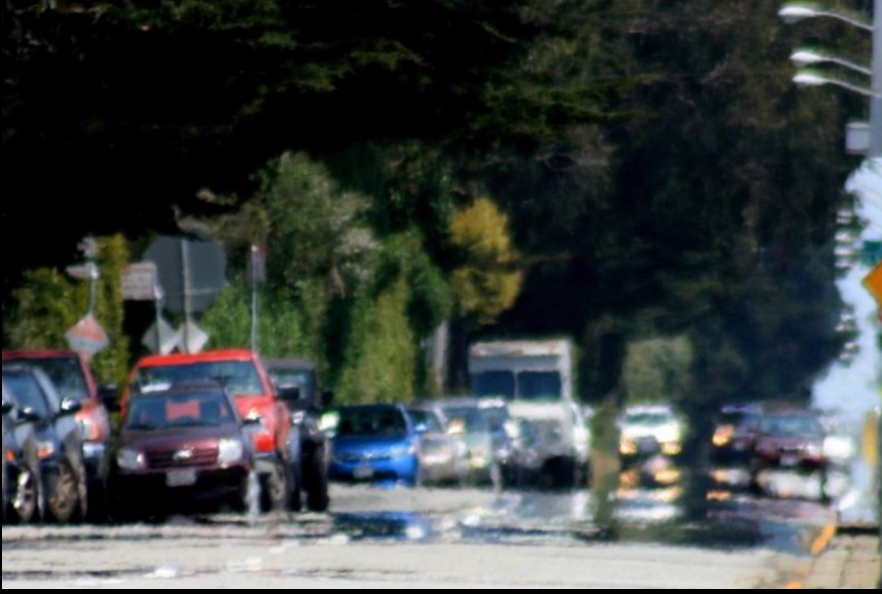
**Sonuç 2.** Ancak problem çok parlak bir yıldızın yanındaki çok sönük olan gezegende foton toplamaktır.

**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



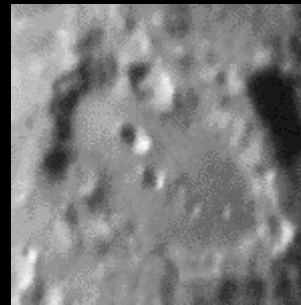
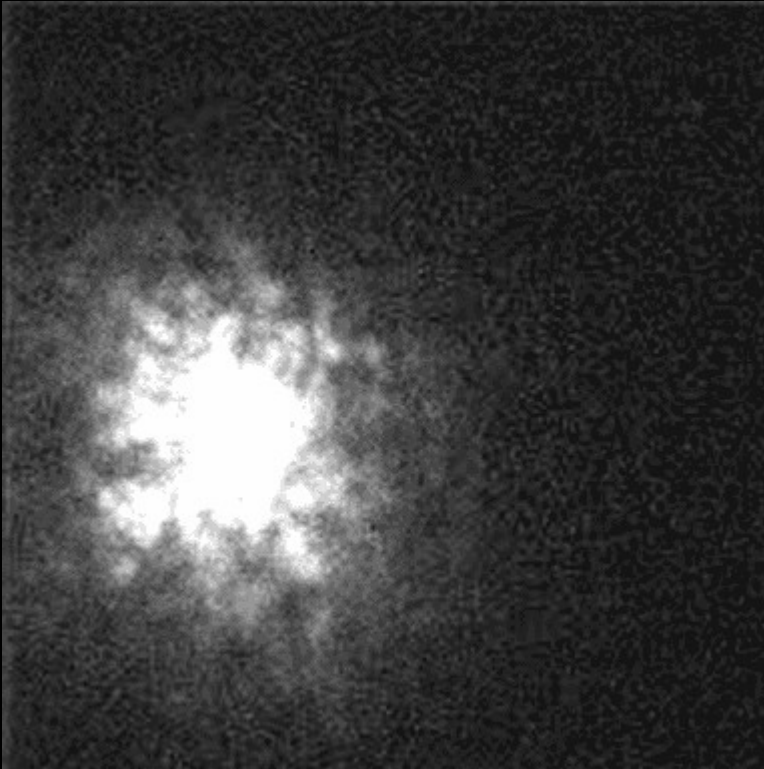


## Ana Problem:

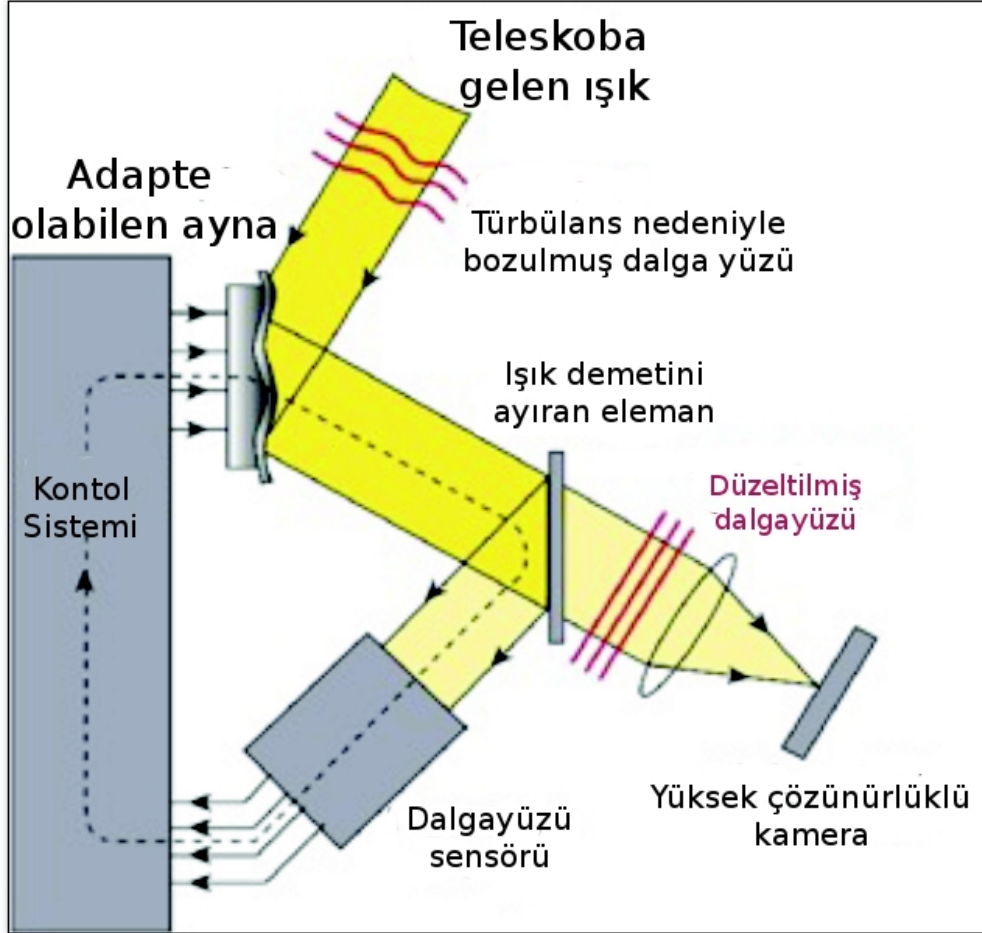
Atmosferik türbülans kaynaklı  
sintilasyon (titreşim)

Çözümlerden biri yüksek ve nemin düşük  
olduğu yerlere gitmek:

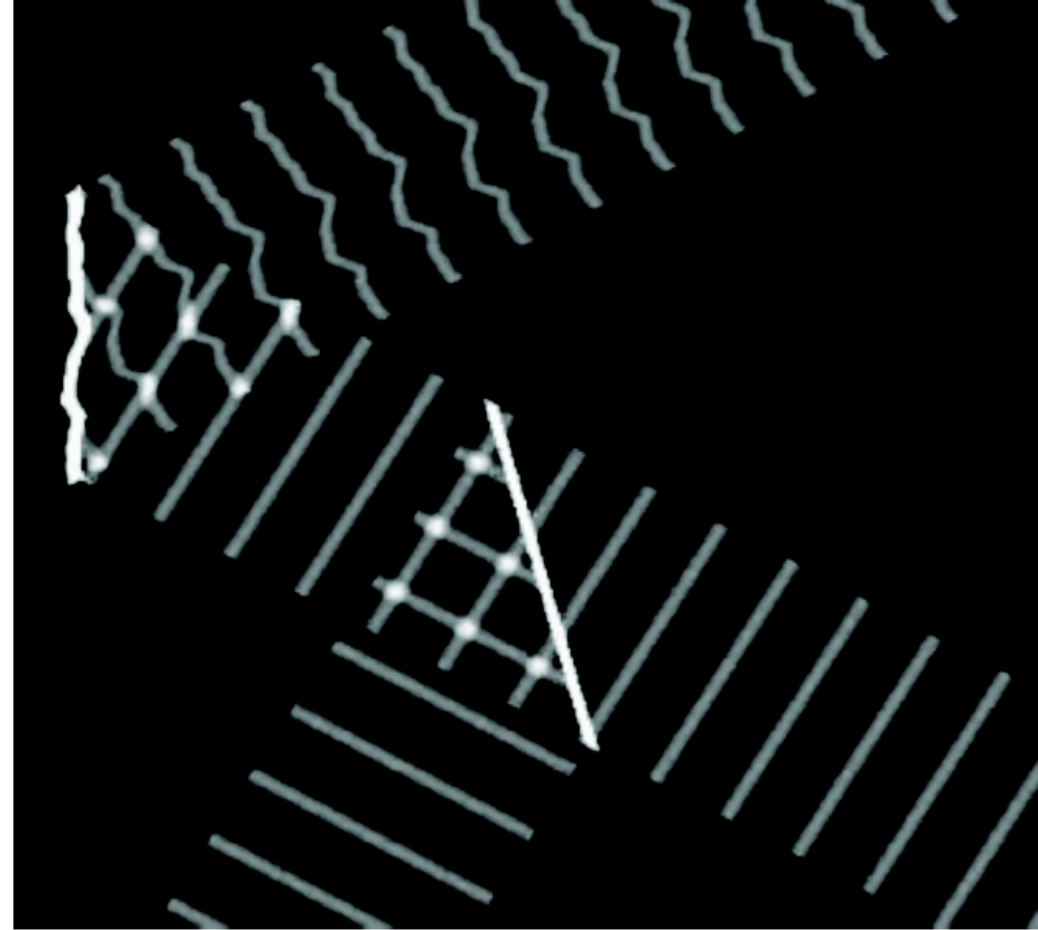
- Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi (1250m):  $\sim 3-6''$
- TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (2500m):  $\sim 1-3''$
- La Silla Gözlemevi, Şili (2400m): ort.  $0''.8$
- Mauna Kea, Hawaii (4205m): ort.  $0''.6$



# Adaptif Optik



© CFAO/Lawrence Livermore National Laboratory



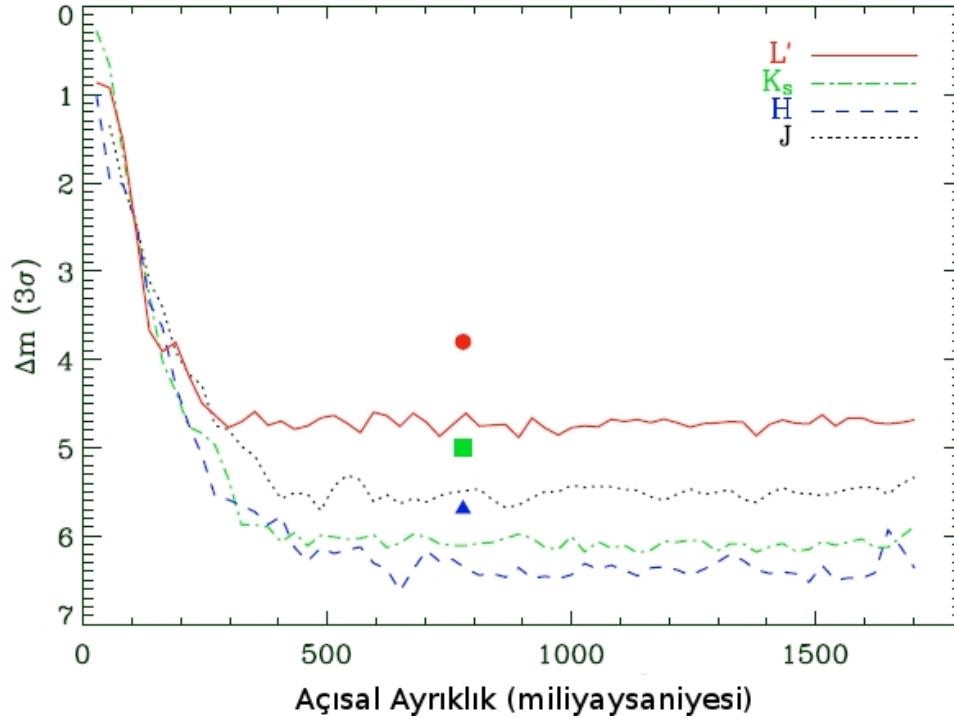
© Lacombe 2001

Çalışma prensibinin Gemini sisteminin simülasyonu ile anlatıldığı videolar için:

<https://www.youtube.com/watch?v=CyGRLr9H1x4>

[https://www.youtube.com/watch?v=3BpT\\_tXYy\\_I](https://www.youtube.com/watch?v=3BpT_tXYy_I)

## 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 fazla, yıldız ışığının daha az olduğu (yukarıdaki şekil yeşil ve kırmızı eğriler için farklı ölçeklere sahiptir. Bir yıldız her dalgaboyunda bir gezegene göre daha fazla ışınım yapar) uzun dalgaboylarında gözlem yapılması tercih edilir.

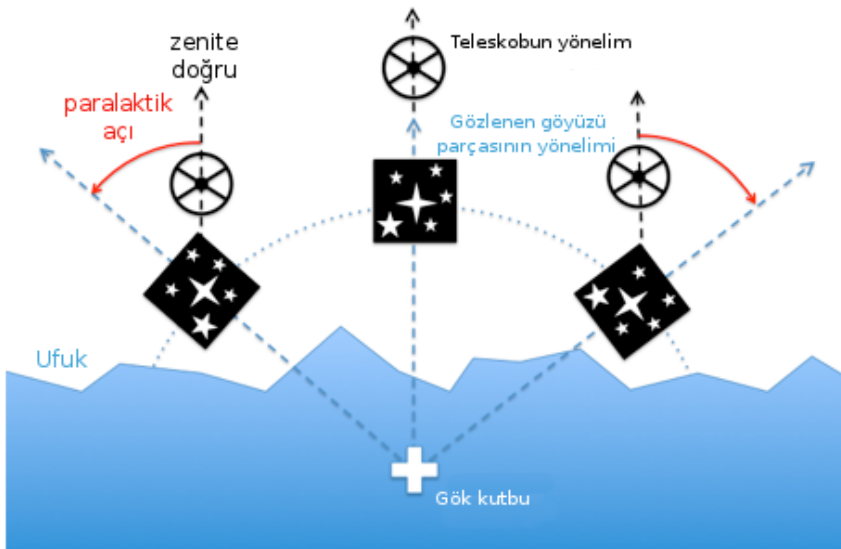
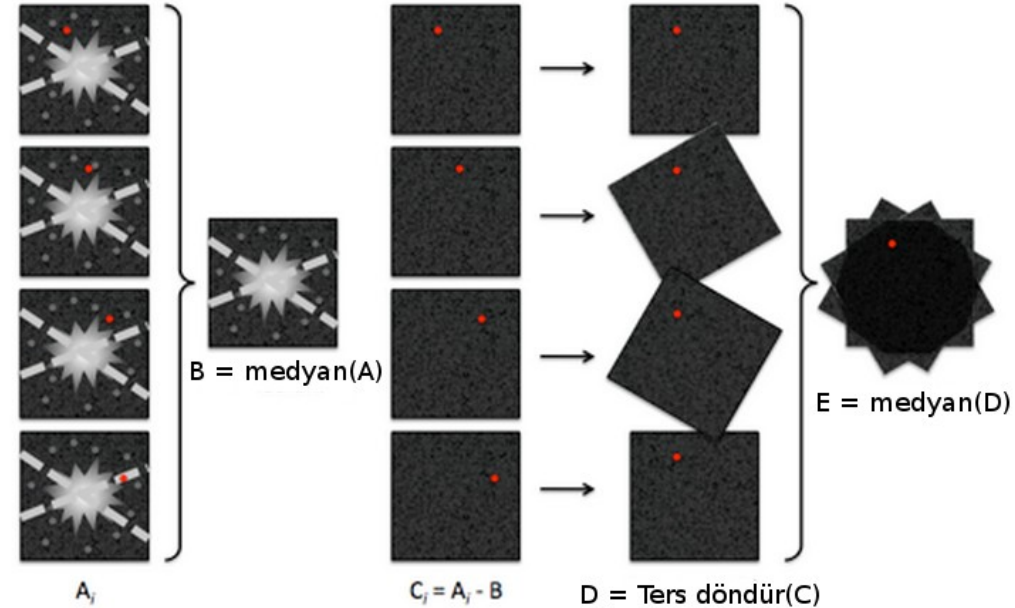
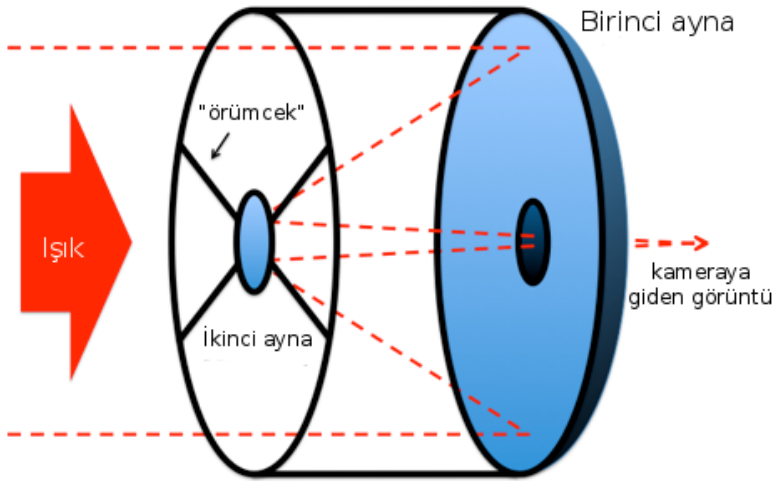
**Çözüm 2:** Işınım gücü daha düşük yıldızlar etrafında gezegen aramak (örn. M cüceleri!) Ancak bu yıldızlardan uzakta gezegen bulmak da öngezegen diskinin küçük olması nedeniyle güçtür.

# Açısal Diferansiyel Görüntüleme

## Angular Differential Imaging (ADI)

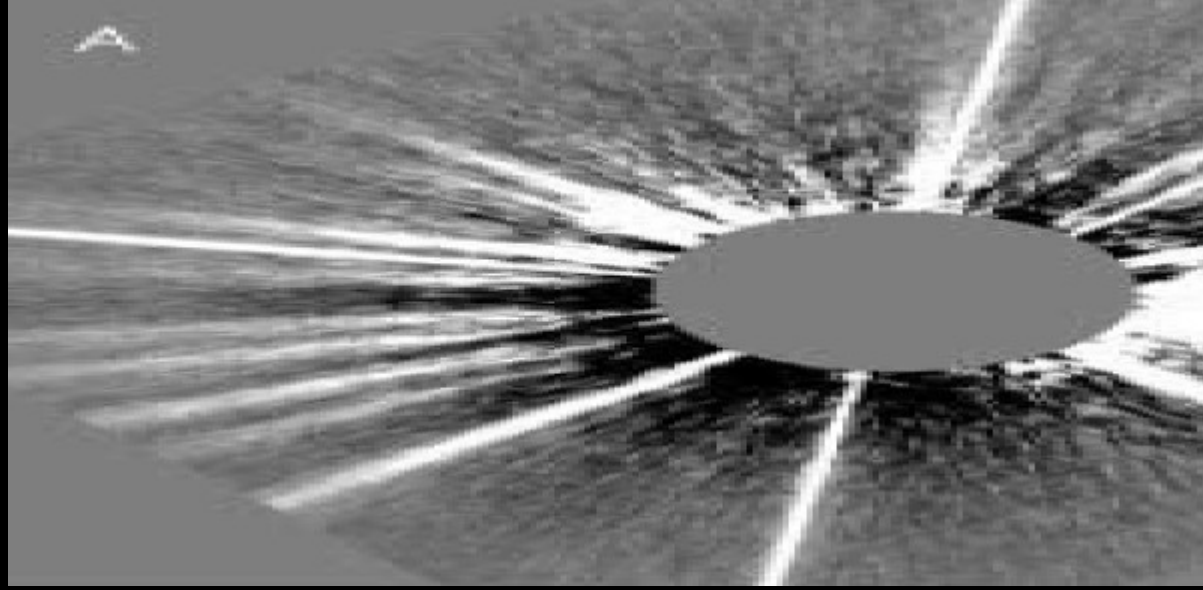
### 3. Problem:

### Parlak yıldız problemi - 2

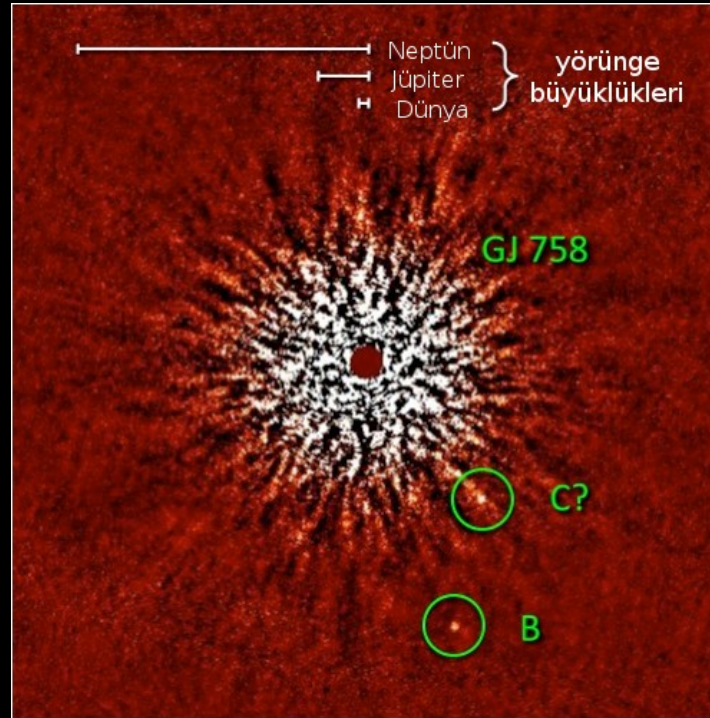


**Çözüm:** Standart gözlemlerde CCD üzerinde yıldızlar hep aynı pozisyonlara gelir ve böylece üstüste birleştirilebilirler. Ancak ADI için teleskop gökyüzüne hep tepesi zenite gelecek şekilde yönlendirilir. Böylece olası bir gezegenin yıldıza göre gökyüzündeki pozisyonu sürekli değişir. Gece boyunca 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. Gezegen 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 tekinğe **ADI tekniği** adı verilir.





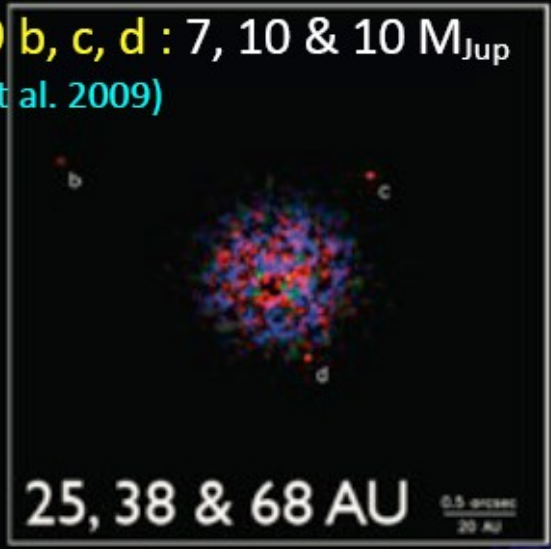
A. Vega'nın çevresindeki (ortada kapatılmış disk) piksellerdeki Vega kaynaklı ışık.  
B. Aynı bölgenin Açısal Diferansiyel Görüntüleme sonrası görüntüsü (Marois vd. 2006)



GJ 758 Yıldız Sistemi  
Thalmann vd. (2009)

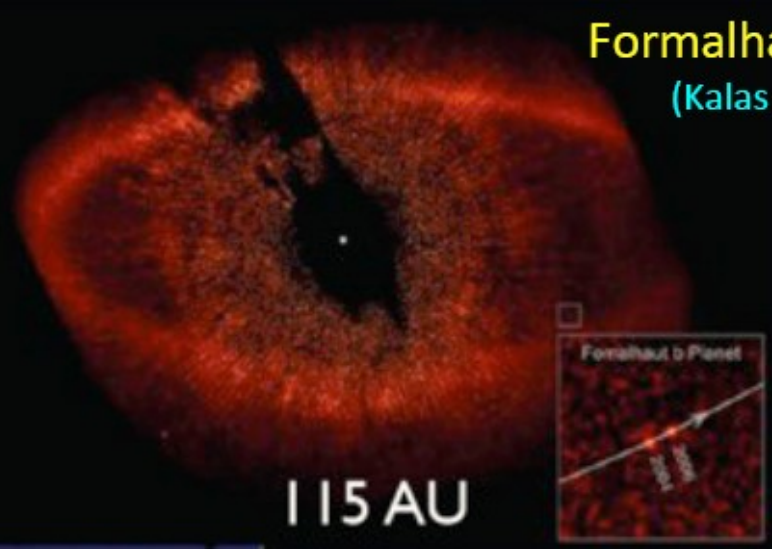
A5 V

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



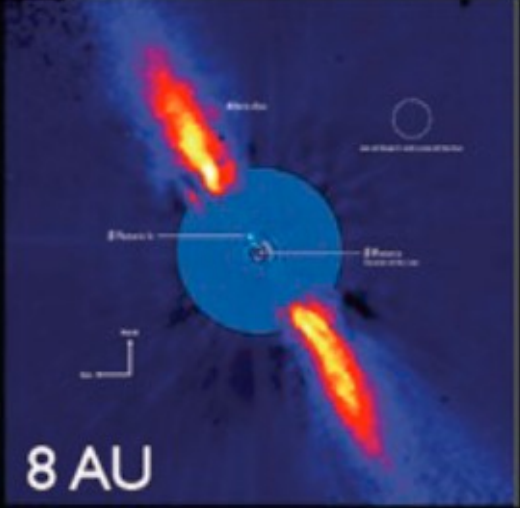
Formalhaut b : 3  $M_{Jup}$   
(Kalas et al. 2009)

A4 V



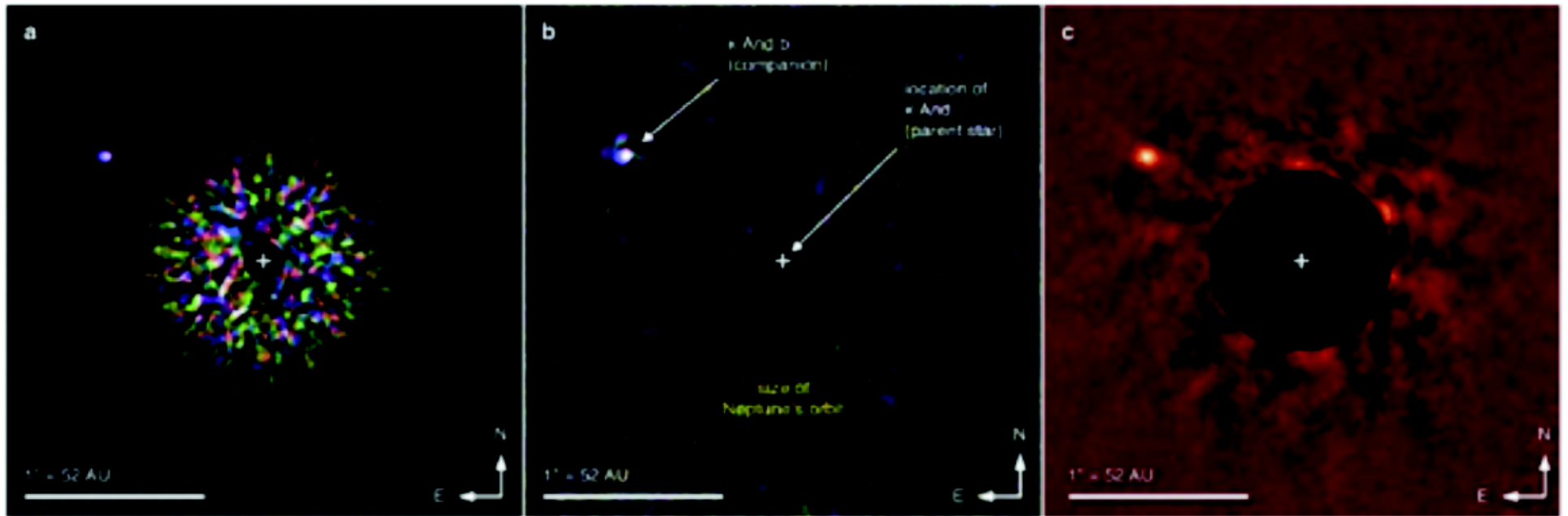
A6 V

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



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

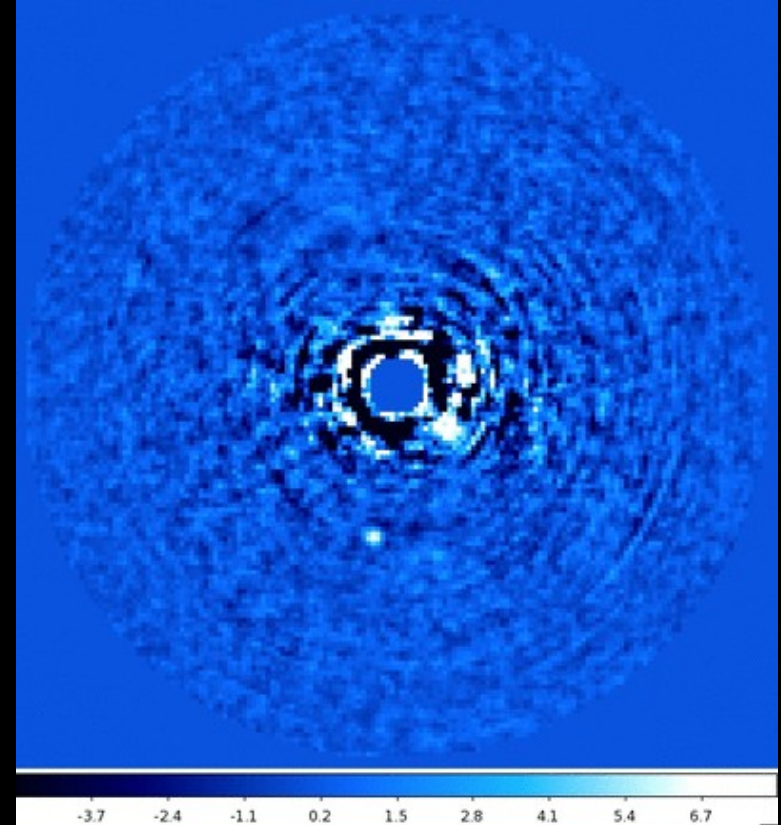
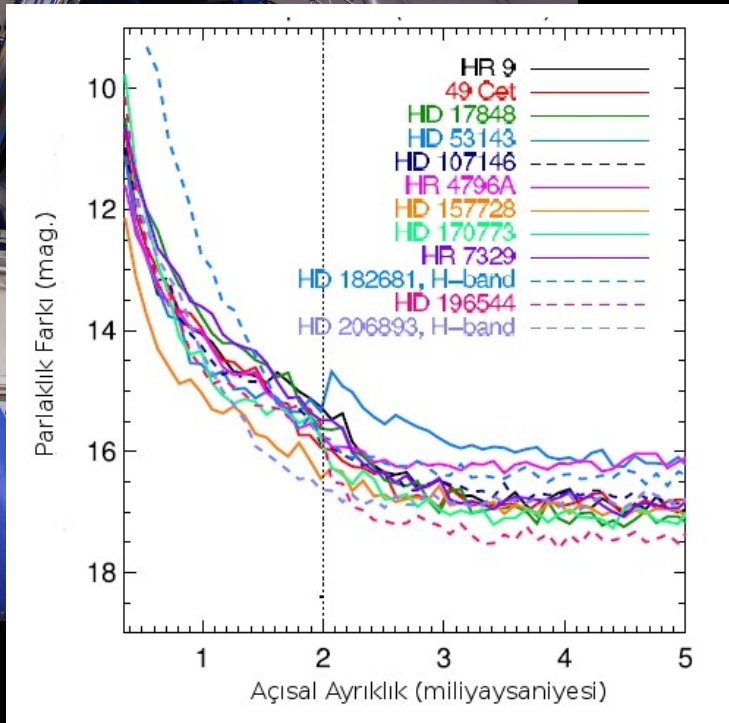
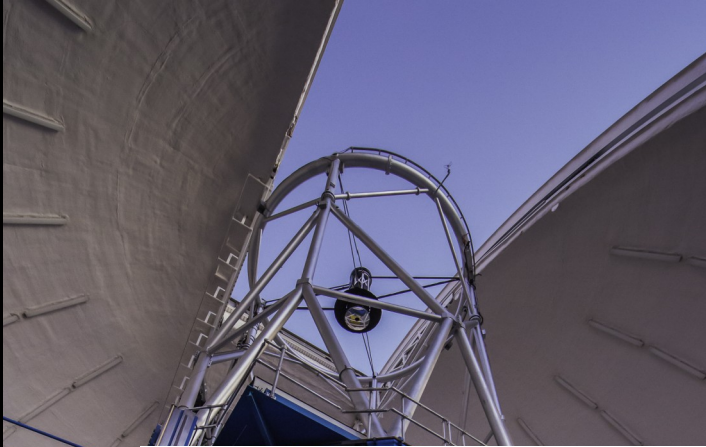
# B9 Tayf Türünden Bir Yıldız: $\kappa$ And + $12.9 M_{\text{jüpiter}}$ @55



Carson et al. 2013

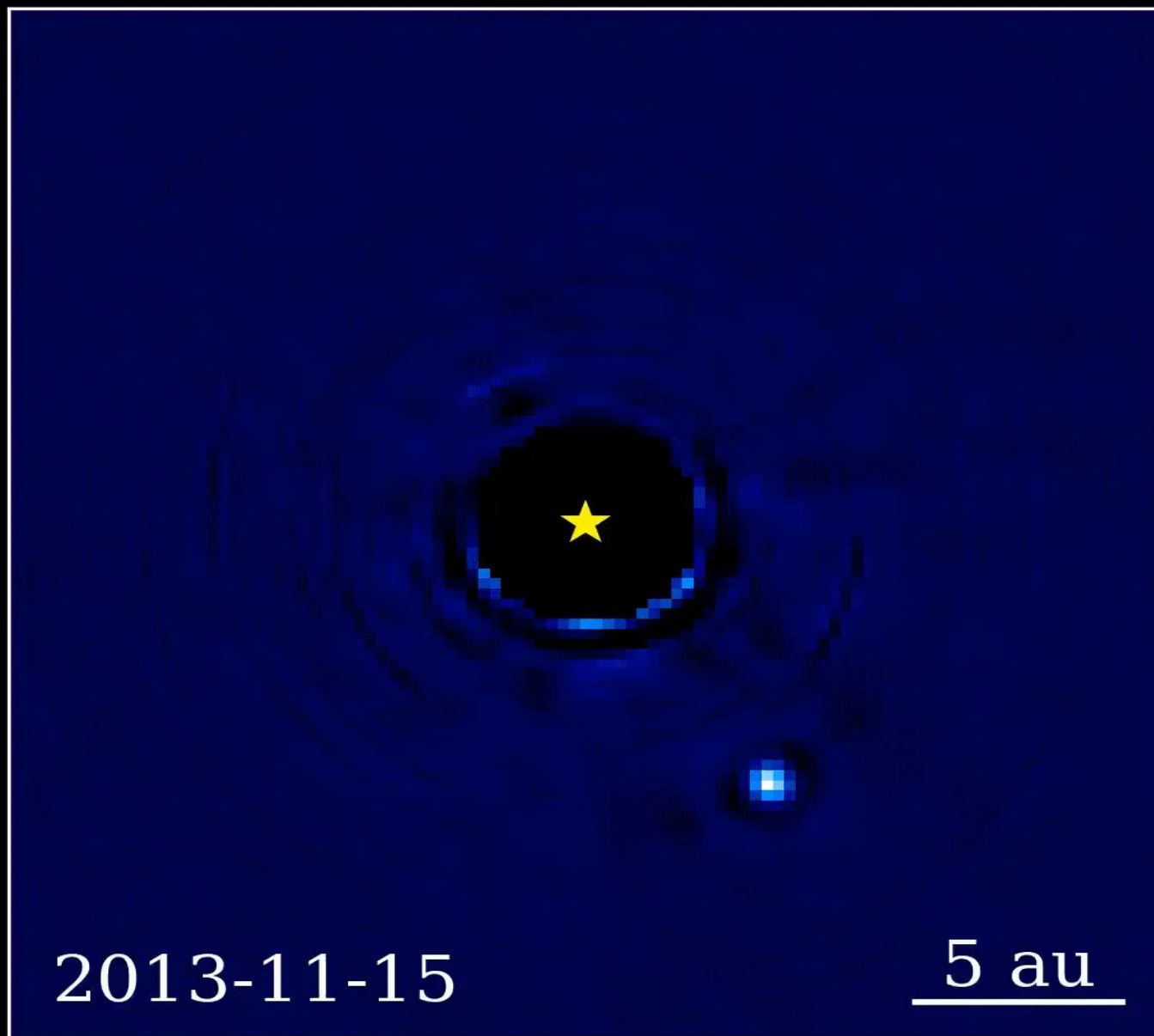


# GPI (Gemini Planet Imager)

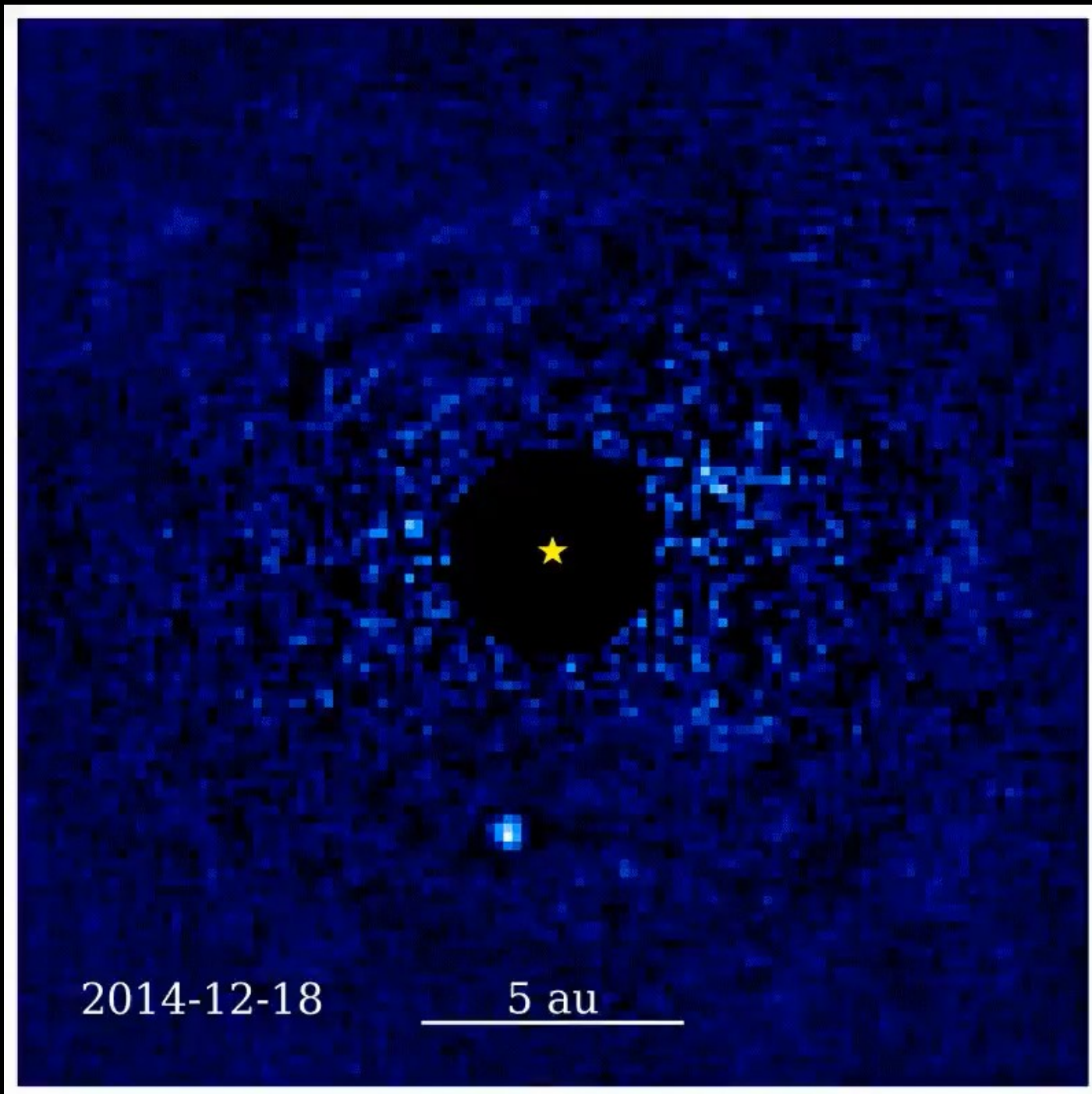


51 Eri b gezegenin yörünge hareketi

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

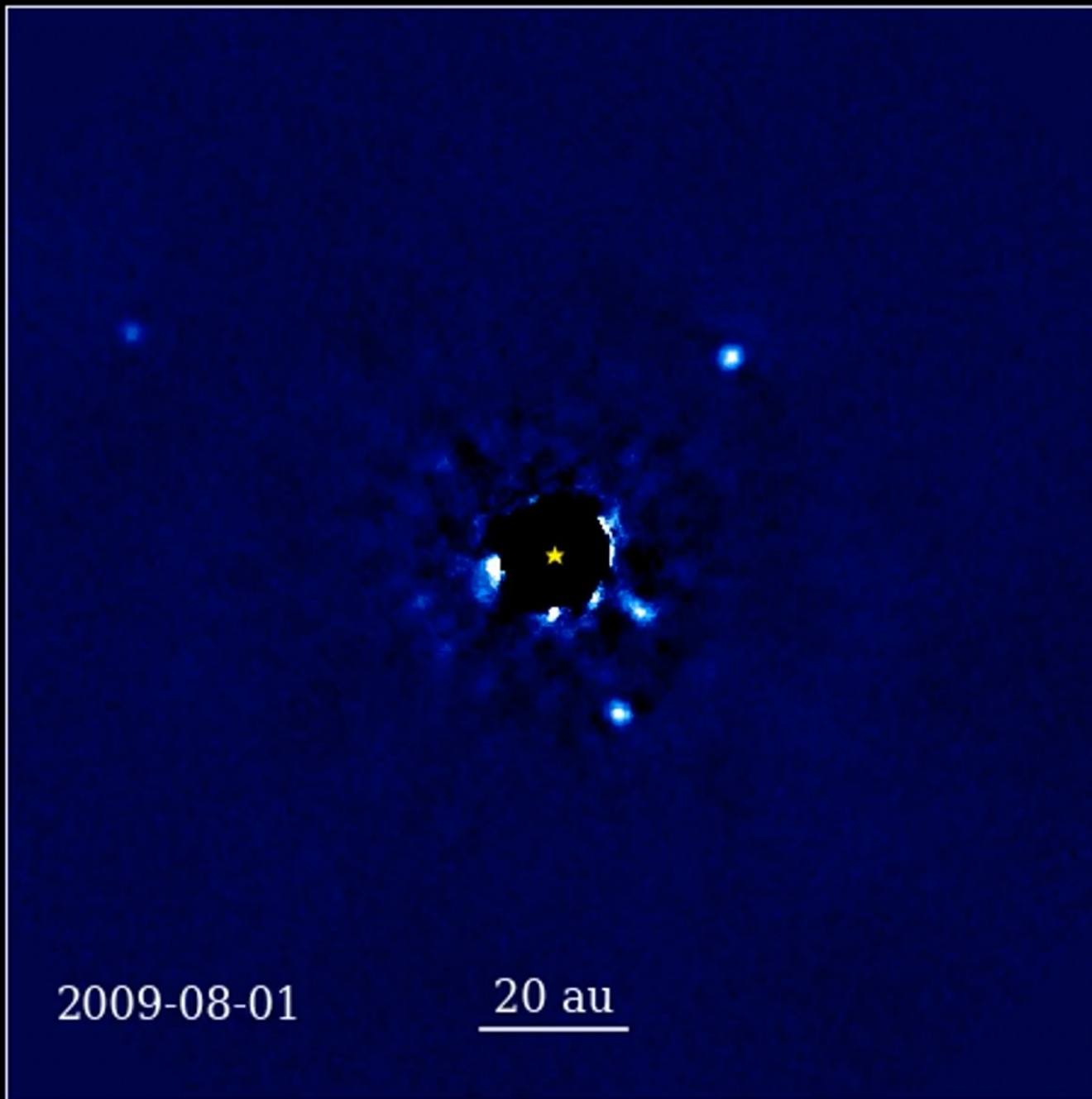


51 Eridani b



$\beta$  Pictoris b





HR 8799 b,c,d,e

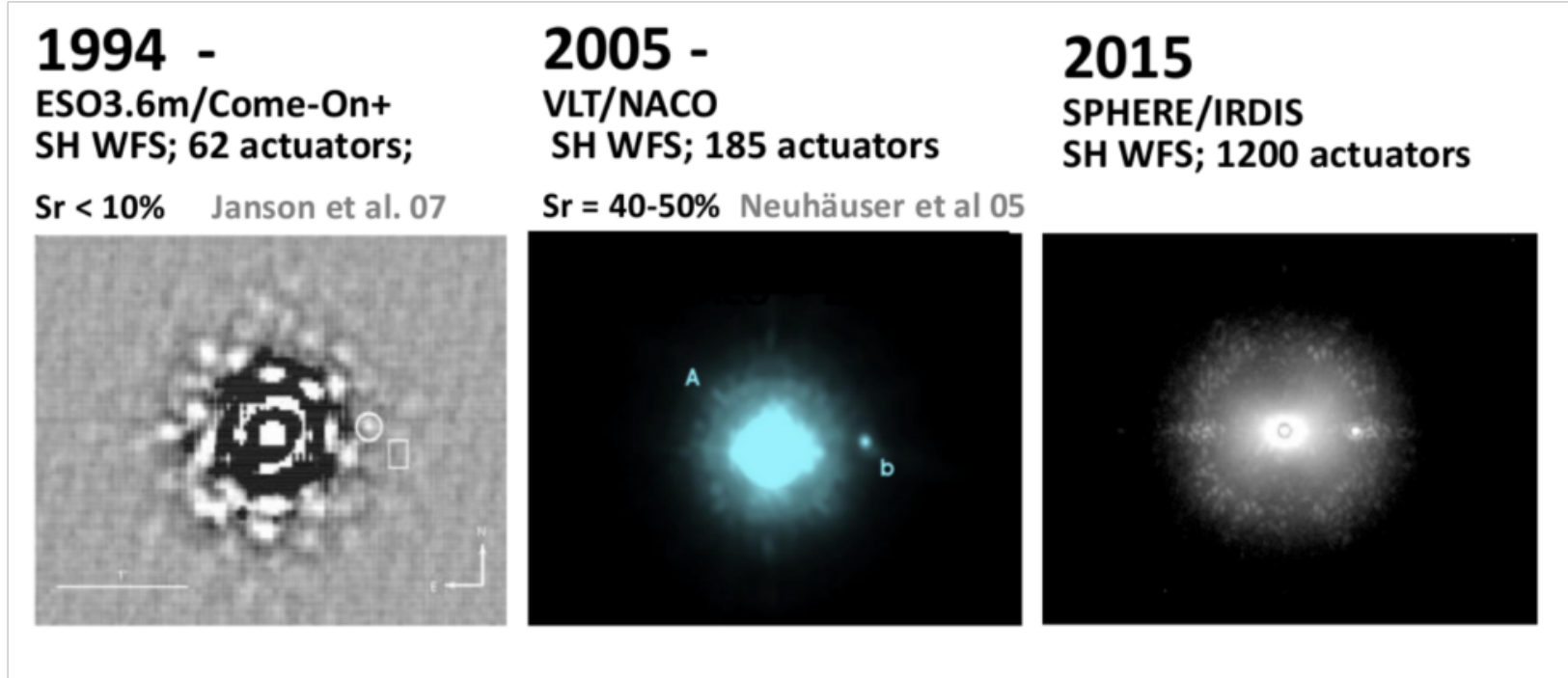


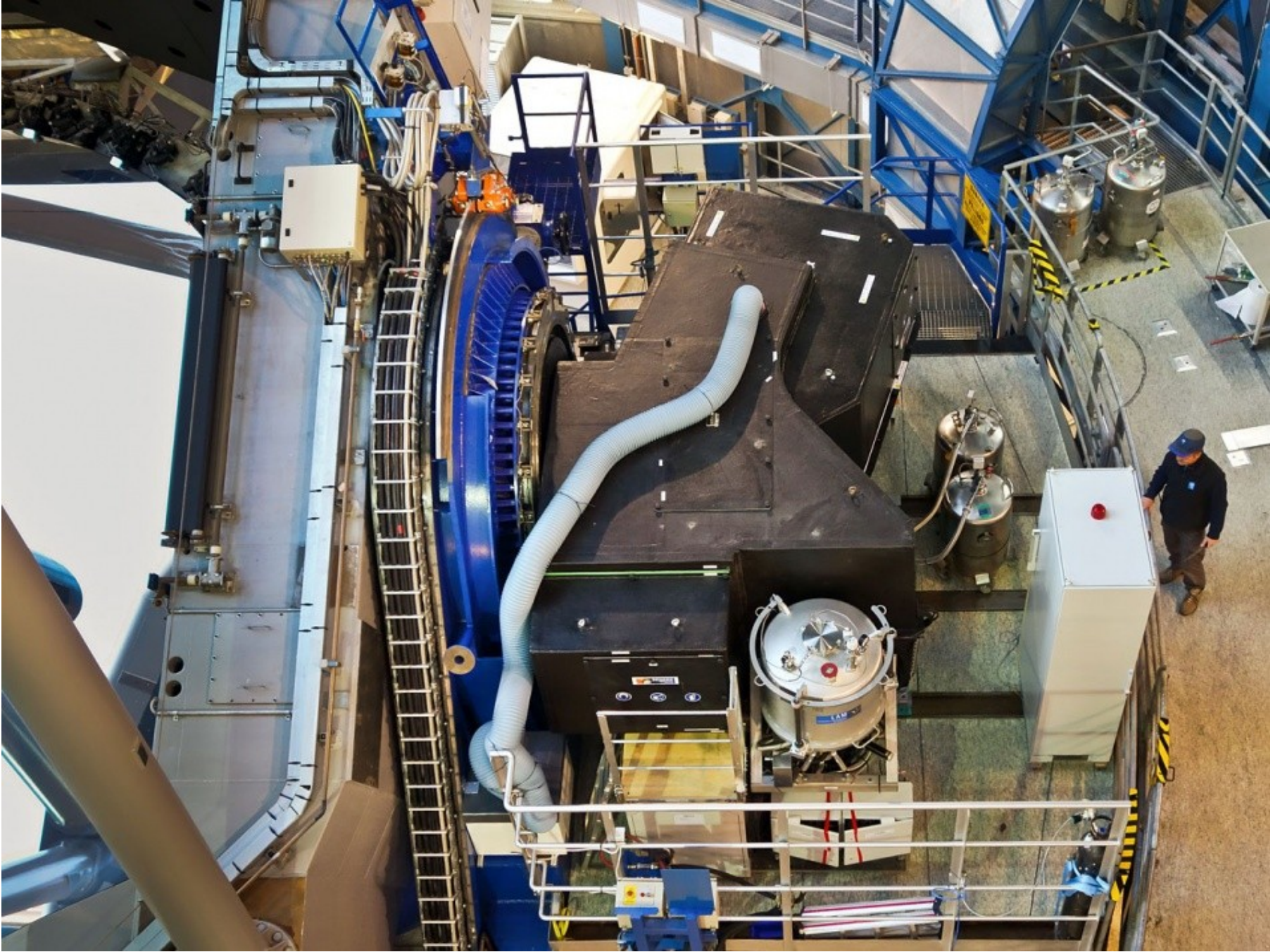
Figure 2. Observation fo the young GQ Lupi star (K7V;  $V = 11.4$ ;  $K = 7.1$ ) hosting a brown dwarf companion located at 730 mas with three generations of ESO AO instruments: ESO3.6m/Come-On+, NaCo and SPHERE at VLT.

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	SCEXAO/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). Çok yakında DAG 4 metre teleskobu ve PLACID koronografı da bu listeye eklenecektir.





VLT'de bağı doğrudan görüntülemenin yanı sıra polarimetri de yapabilen SPHERE cihazı.

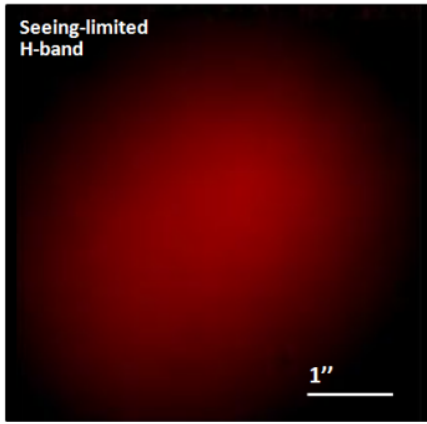
<https://www.unige.ch/sciences/astro/exoplanets/en/projects/sphere/>

# Doğrudan görüntüleme tekniği ile gezegen arayan projeler

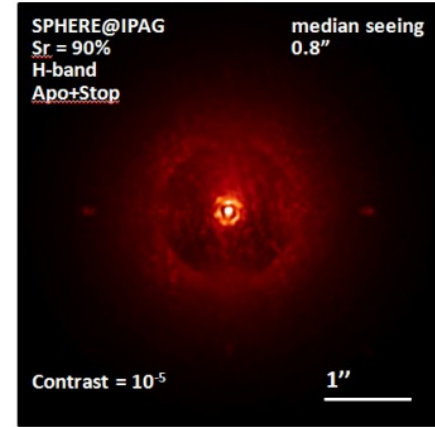
Table 3. Deep imaging surveys of young ( $< 100$  Myr) and intermediate-old to old ( $0.1 - 5$  Gyr), nearby ( $< 100$  pc) stars dedicated to the search for planetary mass companions. We have indicated the telescope and the instrument, the imaging mode (I: standard imaging; Sat-I: saturated imaging; 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	$\lesssim 200$

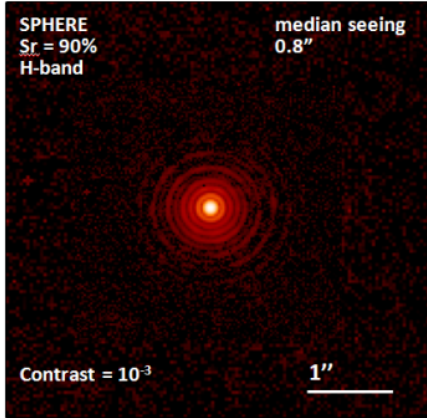




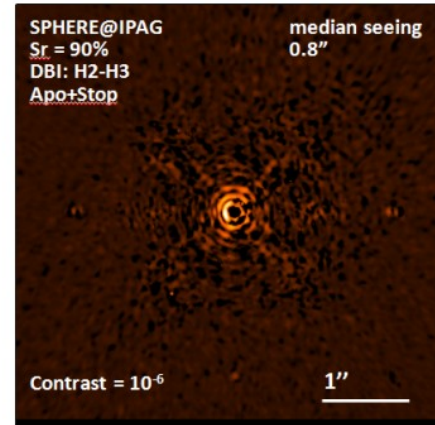
0- Uncorrected PSF



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 129 sistemde 219 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. Diskin yıldızdan uzaktaki bölümünün daha da çabuk dağılması beklendiği için bu gezegenlerin disk kararsızlığı senaryosu ile oluştuğu düşünülmektedir. Bu anlamda yöntem, örnek uzayımızda önemli bir parametre aralığını taramakta ve diğer yöntemlerden gelen yanlışlıkları da dengelemektedir.



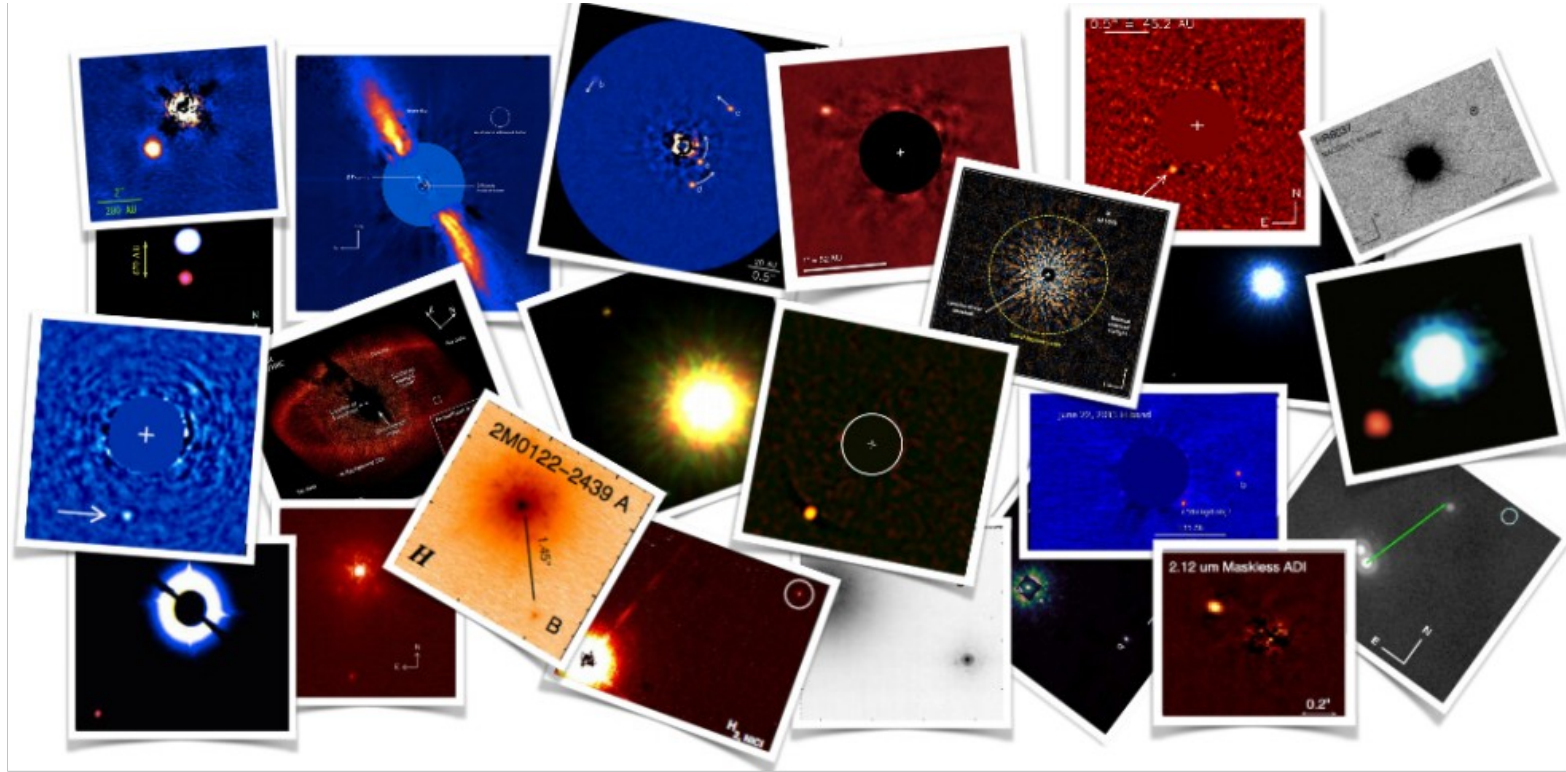


Figure 4. Non-exhaustive family portrait of exoplanets and/or planetary mass companions discovered in DI including the discoveries of (from right to left): DH Tau b, UScoCTIO 108 b, 51 Eri b, AB Pic b,  $\beta$  Pic b, Fomalhaut b, 2M0122-2439 b, HR 8799 bcde, RXJ1609 b, HD 106906 b,  $\kappa$  And b, 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..

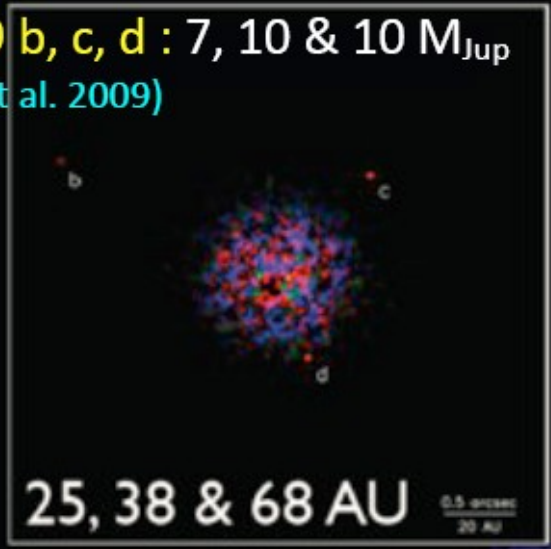
Table 2. Non-exhaustive, but illustrative list of substellar/planetary-mass companions and/or exoplanets discovered DI around young, nearby stars in the last two decades. Chauvin (2018)

Name	Primary			SpT	$\rho$ (as)	$\Delta$ (AU)	Companion			Date
	Asso.	Age (Myr)	d (pc)				$\Delta H$ (mag)	Mass <sup>a</sup> M <sub>Jup</sub>	SpT	
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.

A5 V

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



25, 38 & 68 AU



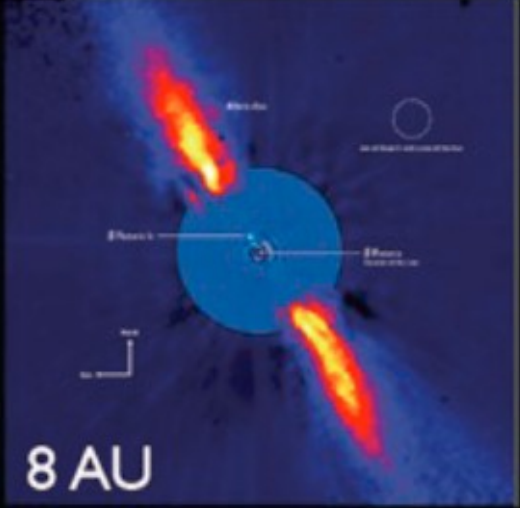
Formalhaut b : 3  $M_{Jup}$   
(Kafas et al. 2009)

A4 V

115 AU

A6 V

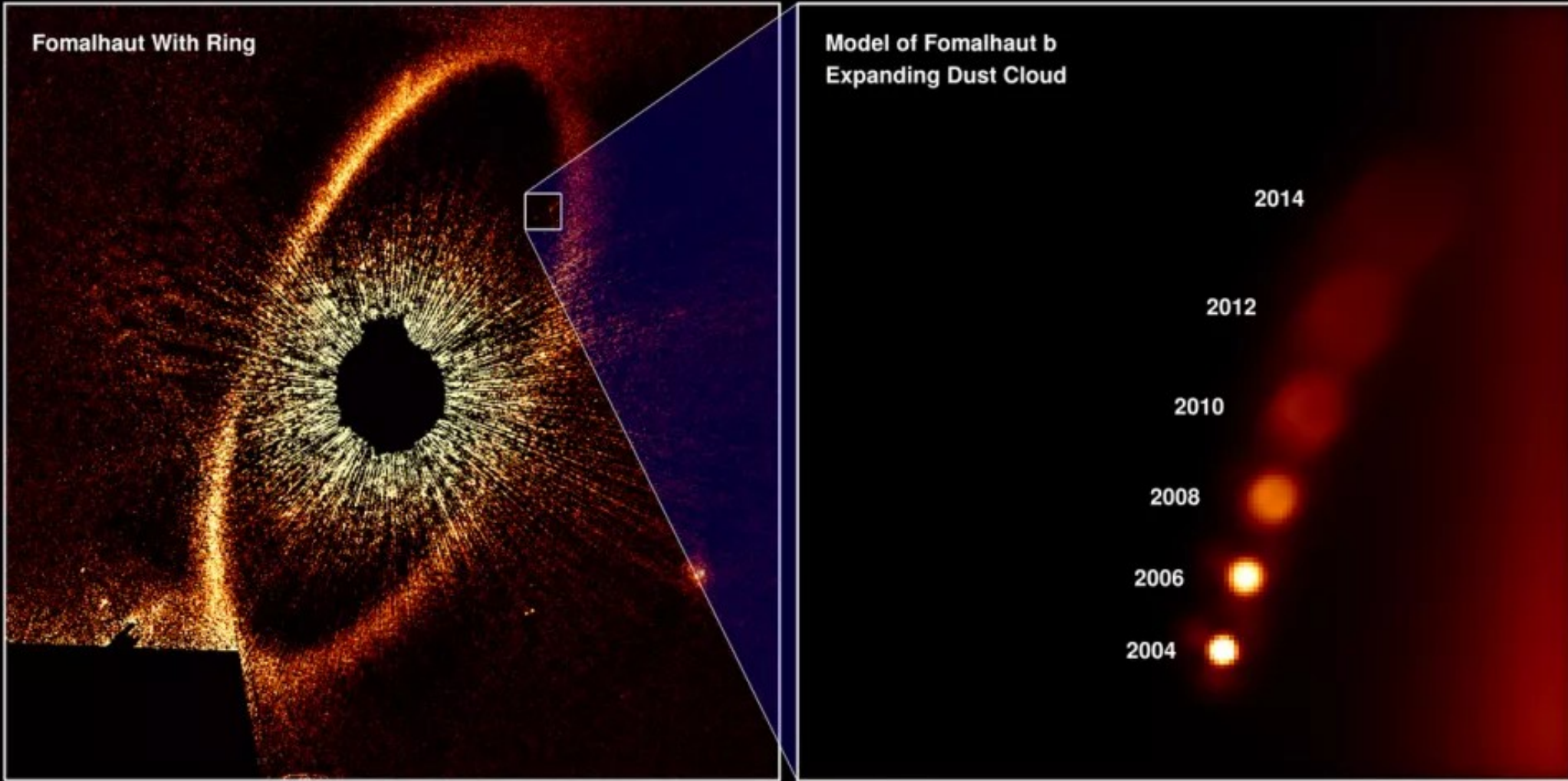
Beta Pic b : 8  $M_{Jup}$   
(Lagrange et al. 2009, 2010)



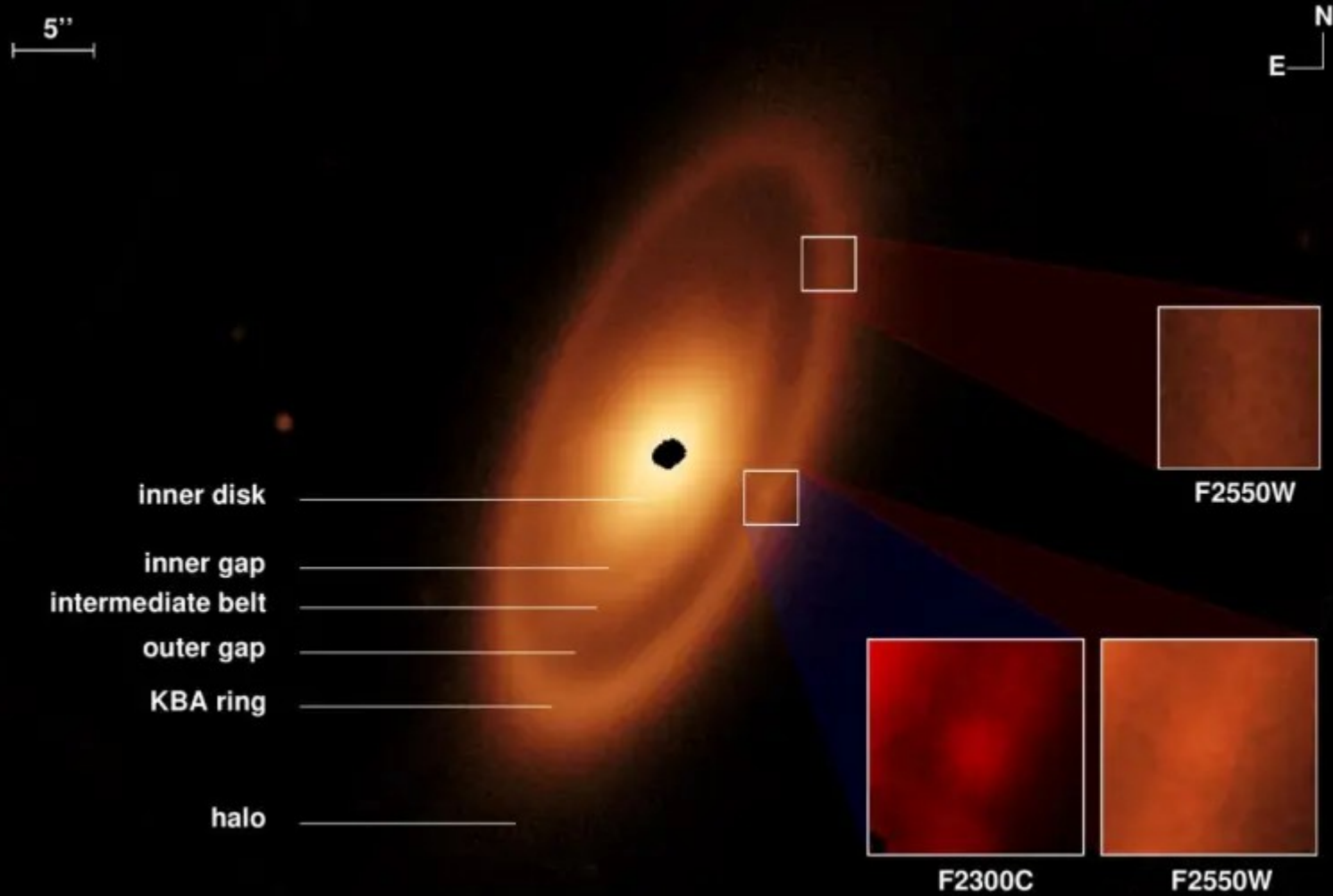
8 AU

Disk Karasızlığıyla Oluşmuş Olabilecek **Büyük Kütleli** ve **Yıldızından Uzak**  
(sıcaklığın düşük olduğu diskin dış bölgelerindeki) Gezegenlere Örnekler

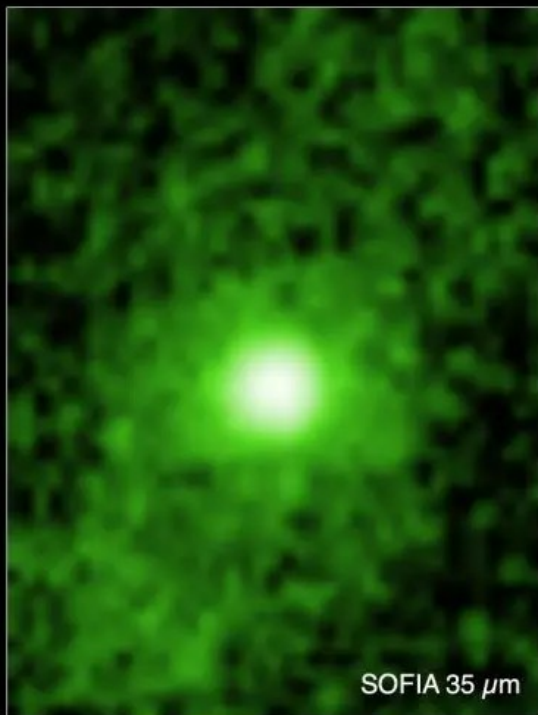
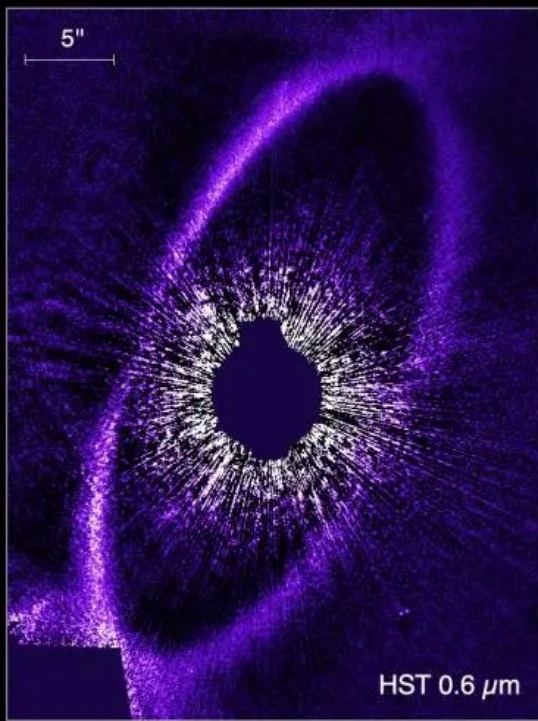




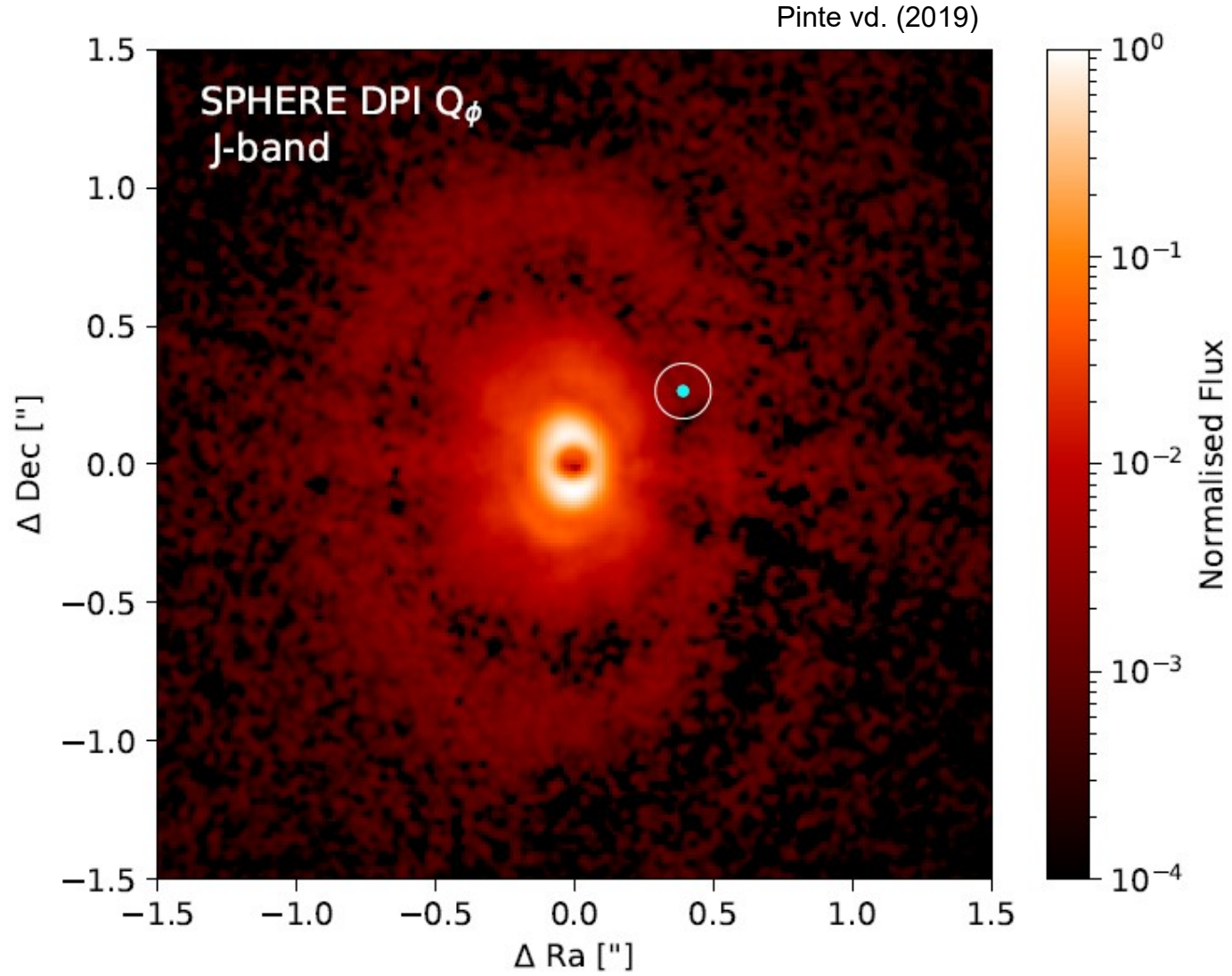
Fomalhaut diskinin içinde gözlenen yapının bir gezegen olmadığı birbirleriyle çarpışarak gerilerinde bir toz tabakası bırakan asteroidler olabileceği düşünülmekteydi (Gáspár & Rieke 2019). **Solda**, Fomalhaut çevresindeki diskin bir görüntüsü, **Sağda** bir zamanlar bir gezegen olduğuna inanılan, ancak şimdi bir asteroid çarpışmasının tozlu kalıntıları olduğu düşünülen bir nesnenin zaman içinde öngörülen değişimi verilmiştir (NASA, ESA, A. Gáspár ve G. Rieke (University of Arizona)).



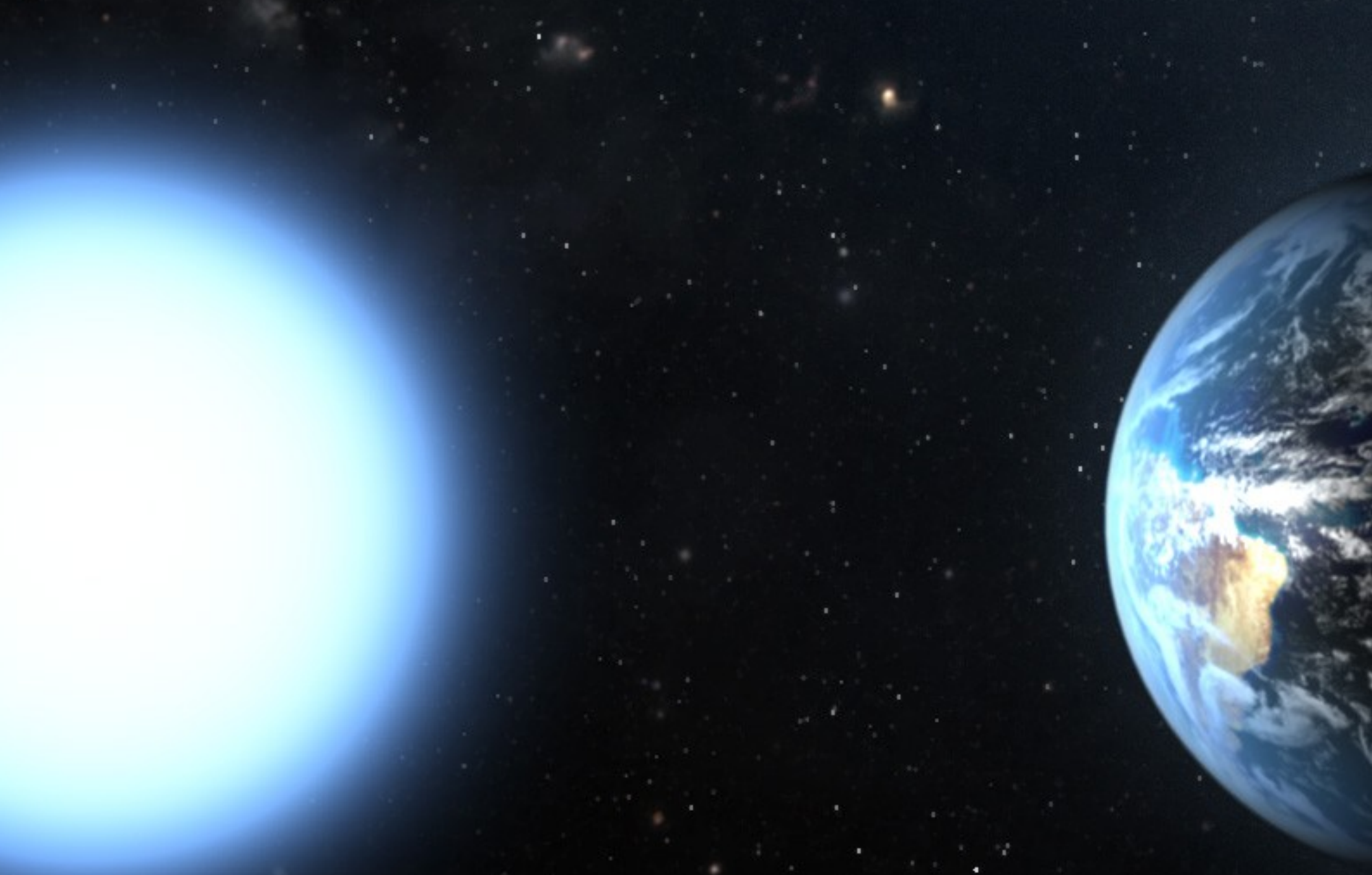
Ancak yakın zamanlı JWST gözlemleri (Gáspár vd. 2023) diğer dalgaboylarında alınan gözlemlerle birleştirilip, sistemin hassas astrometrik analizi yapılarak diskin hareketinin de çözülmesiyle bu yapının gerçekte bir arkaplan galaksisi olabileceği anlaşıldı.







Öngezegen disklerinin doğrudan görüntülenmesi ayrıca disk kinematiği yoluyla da ötegezegen keşfini sağlayabilir. Diskle etkileşim içinde Tip-II türü göç yapan gezegenlerin diskte açtıkları boşluklar (transition disks) takip edilip, boşluğun her iki tarafının kinematiğinin incelenmesiyle gezegen keşfi mümkün görülmektedir. Genel kabul görmemiş ve dikine hız onaylanmamış da olsa VLT / SPHERE gözlemlerinden HD 97048 genç yıldızının etrafında birkaç Jüpiter kütlesinde bir cismin olabileceği önerilmiştir (Pinte vd. 2019). Bu yöntem exoplanet.eu kataloğunda **disk kinematiği yöntemi** olarak tanınmakla birlikte henüz kesinleşmiş bir keşif bulunmamaktadır.

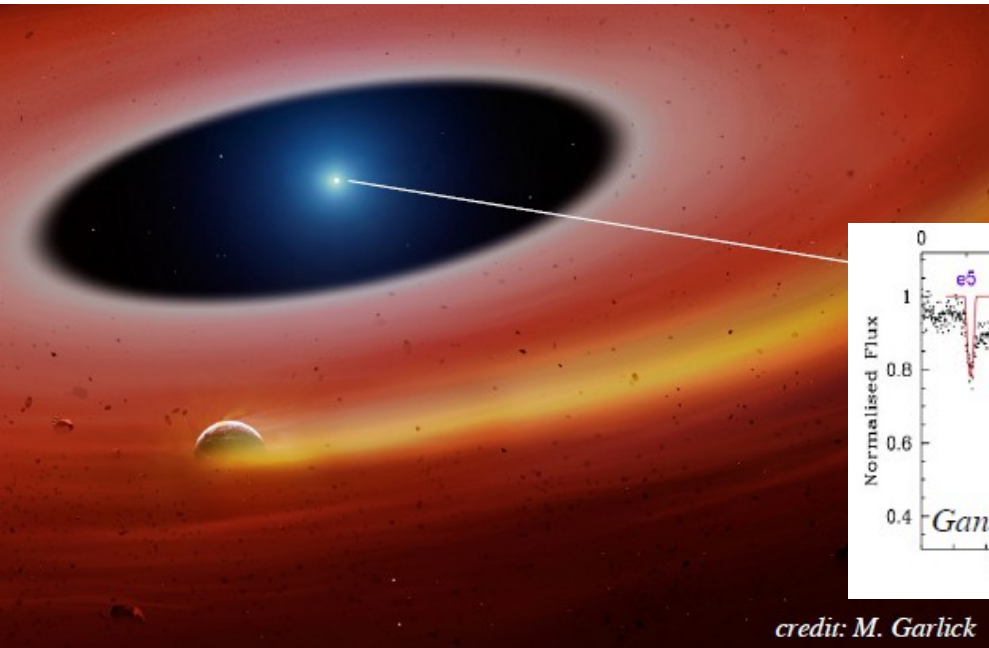


Ders-6d: İki Yeni Keşif Tekniği

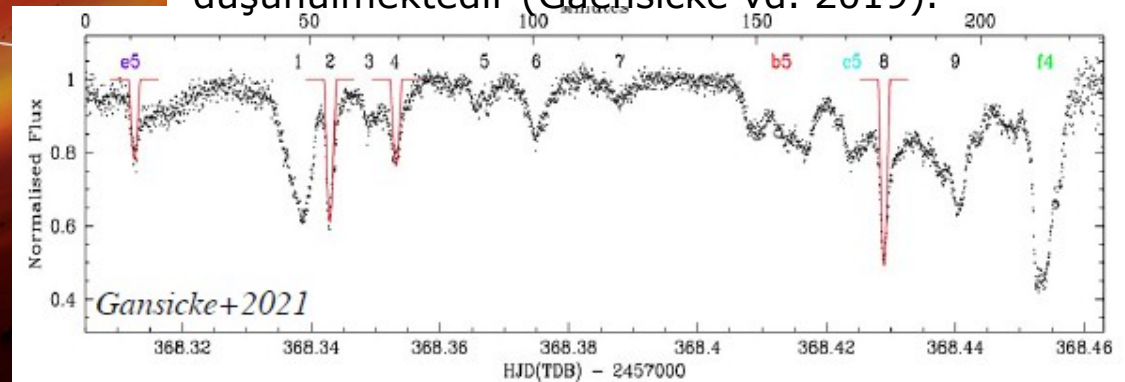
# Beyaz Cücelerin Üzerindeki Gezegen Kalıntıları

Beyaz cüceler  $8 M_{\text{güneş}}$ 'ten küçük yıldızların evrimlerinin sonunda dış katmanlarını gezegenimsi bulutsu olarak uzaya atması sonrasında geride bıraktıkları dejenere çekirdekleridir. Yüksek yüzey çekim ivmeleri nedeniyle ağır elementlerin hızla atmosferlerinin dibine çökmesi gerektiği öngörüldüğünden tayflarını hidrojen ve helyum gibi elementlerin oldukça genişlemiş ve güçlü çizgilerinin domine etmesi beklenir.

Yakın dönemli bazı tayfsal çalışmalarda bazı beyaz cücelerin atmosferlerinde beklenenin ötesinde metal bolluğuna rastlanmış bu durum; ya yıldızın attığı dış katmanlarındaki materyalden oluşmuş ikinci nesil ya da yıldızın son evrim aşamalarından kurtulmuş bir gezegenin beyaz cücenin üzerine düşmesine bağlanmıştır (Gaensicke vd. 2019). G29-38 (Zuckerman ve Becklin 1987) beyaz cücesinin etrafında gözlenen birikim diski ve geçiş yöntemiyle keşfedilen WD1145+017 b (Vanderburg vd. 2015) ötegezegeninin sistemde çevresel maddenin varlığına işaret eden geçiş profilleri, gezegenlerin beyaz cüceyle kuvvetli tedirginlik etkileşimleri sonucunda parçalanıp, üzerlerine düşmelerine kanıt teşkil etmektedir



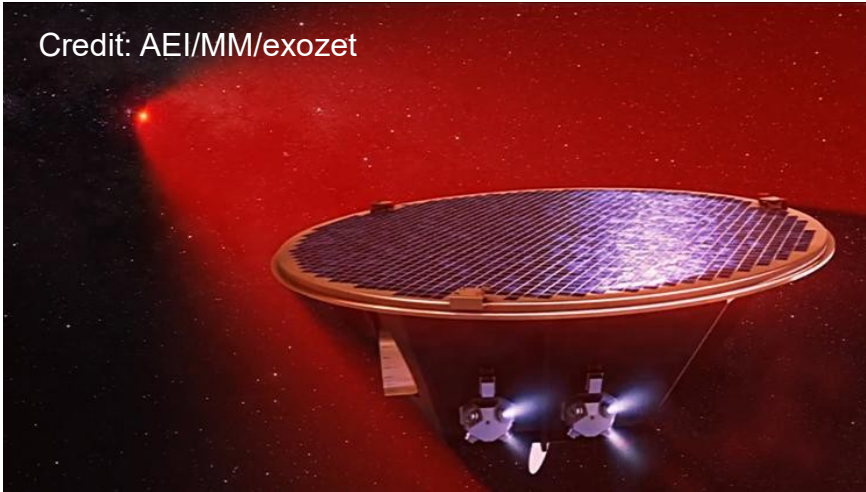
Oksijen, hidrojen ve sülfürce zengin bir diskten "beslenen" WD J091405.30+191412.25 beyaz cücesinin Neptün benzeri bir gezegene barınaklık yapmış bir atayıldızdan geriye kaldığı düşünülmektedir (Gaensicke vd. 2019).





# Kütleçekim Dalgalarıyla Gezegen Araştırmaları

Einstein'in Genel Görelilik Kuramı uyarınca kütleler etraflarındaki uzay-zamanın geometrisini değiştirdikleri ("büktükleri") gibi, ivmeli hareket ettiklerinde kütleçekim dalgalarına neden olurlar. Bu dalgalar içinde yayıldıkları uzay-zamanın geometrisini değiştirerek ilerler. Şu ana kadar "The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO)", Virgo gibi lazer inteferometreleri tarafından ancak güçlü sinyaller yakalanabildiği için karadelik ya da nötron yıldızı birleşmeleri (kilonovalar) gözlenebilmişken 2030'lu yıllarda uzaya gönderilmesi planlanan NASA ve ESA ortak projesi Laser Interferometer Space Antenna (LISA) 'nın (<https://lisa.nasa.gov/>) uzayda interferometri yapacak olması nedeniyle beyaz cüce çiftlerinin birleşmeleri ve etraflarındaki gezegenleri dahi tespit edebilecekleri düşünülmektedir. Elektromanyetik dalgaların ötesinde bir gözlem penceresi açan kütleçekim dalgalarıyla ötegezegen keşfi de çok uzak olmayan bir gelecekte mümkün olabilecektir.

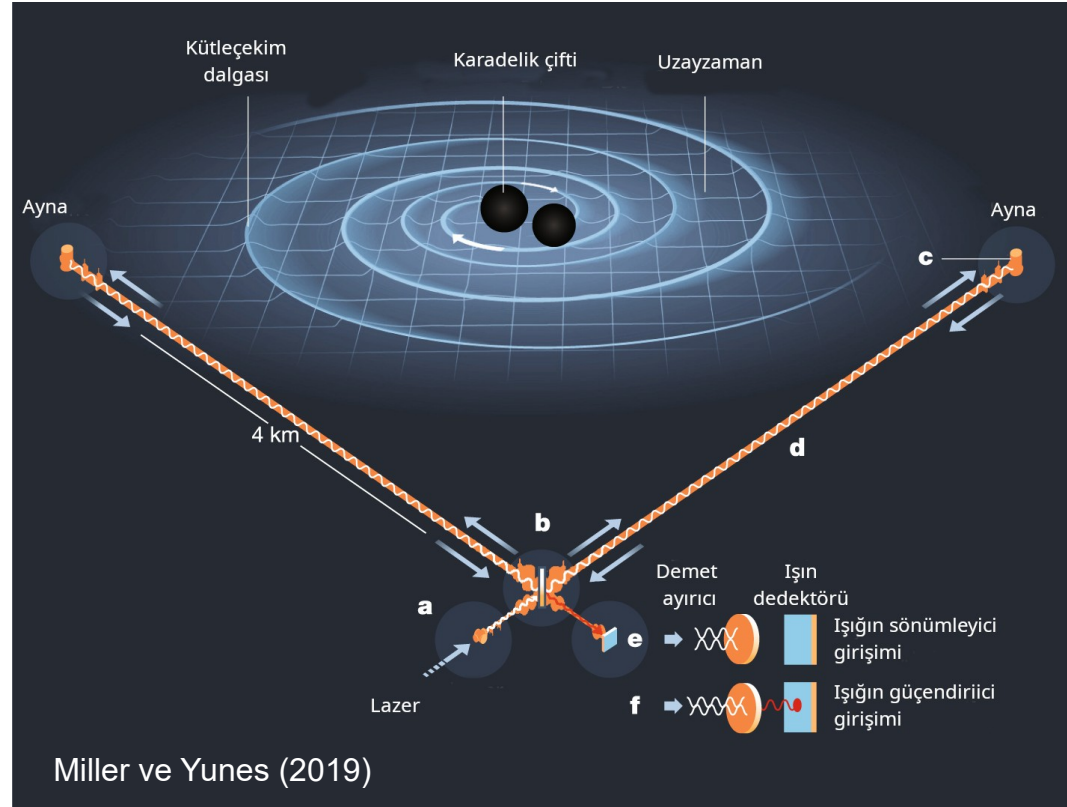


Credit: AEI/MM/exozet

## LISA

Beyaz cüce çiftlerinin ve onların etrafındaki gezegenlerin galaksimizdeki sayılarının milyarları bulacağı öngörülmektedir (Columa vd. 2023)

Tipik bir lazer interferometri



Miller ve Yunes (2019)

# 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  $\upsilon$  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