

سیارات فراخورشیدی: خواص و روش‌های آشکارسازی آنها

صدیقه سجادیان

شهریور ۱۴۰۲

سیاره یا ستاره

❖ جرم تعیین کننده حدود: اثر گرانشی، شروع فرایندهای هسته‌ای (سوختن هیدروژن)

$$M > 70M_J$$

❖ **ستاره:** آغاز واکنش سوختن هیدروژن

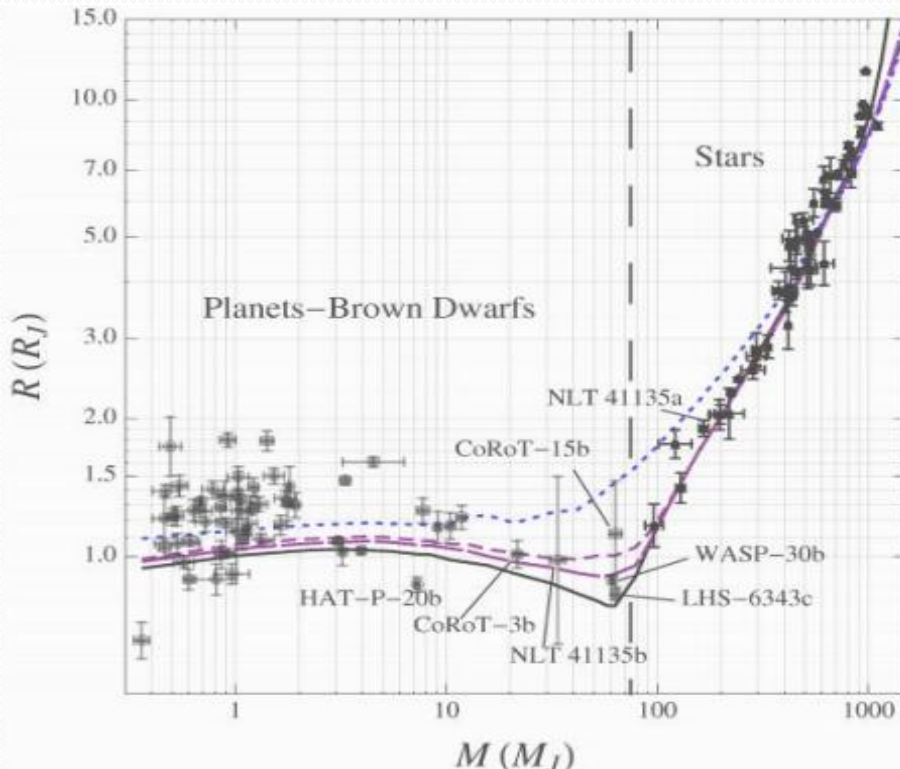
❖ **کوتوله قهوه‌ای:** در هسته فرایند سوختن دوتریم می‌تواند انجام شود. به هیچ جرم بزرگتری مقید نشده است.

$$13M_J < M < 70M_J$$

نشده است.

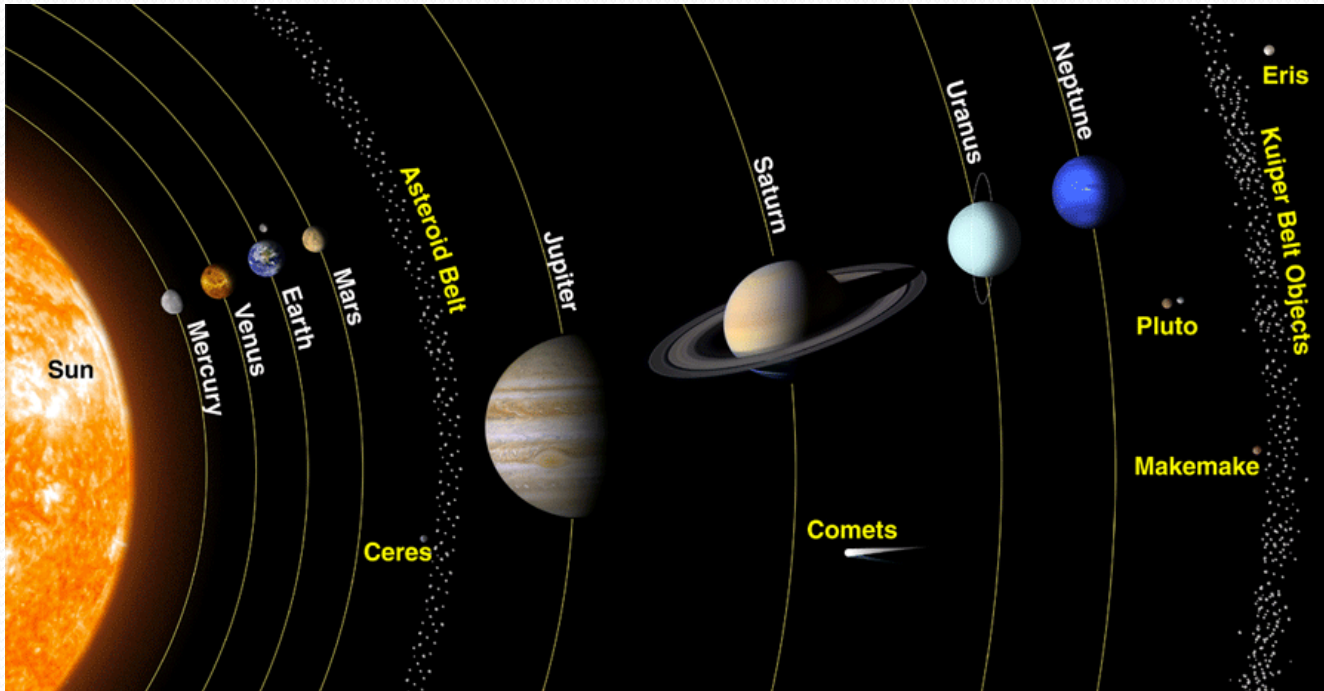
❖ **سیاره:** هیچگونه فرایند هسته‌ای نمی‌تواند رخ دهد. سیاره همچنین به یک ستاره وابسته است

$$M < 13M_J$$



سیارات منظومه شمسی

- سیارات خاکی (زمین، مریخ، زهره): سیارات سنگین و صخره ای، نزدیک به ستاره مادر
- سیارات غول گازی شکل (مشتری، زحل): پوشش گازی شکل، عناصر شیمیایی شبیه ستاره مادر (100~ جرم زمین)
- سیارات غول یخ زده: اورانوس، نپتون (حدود 10 جرم زمین)
- سیارات کوتوله: پلوتون، اغلب صخره ای



سیارات فراخورشیدی

❖ معمای فرمی (1950): تعداد ستاره‌های کهکشان راه شیری حدود صد میلیارد است. اگر هر ستاره به طور متوسط ده سیاره داشته باشد، با فرض اینکه زمین یک سیاره معمولی است و تنها بر روی درصدی کمی از آنها موجودات متمدن به وجود بیاید، باز هم تعداد بیشمار موجودات متمدن در کهکشان راه شیری خواهیم داشت، ولی چرا تا کنون آنها را مشاهده نکرده ایم؟



"There are countless suns and countless earths ..."

Giordano Bruno (b. 1584)

in De L'infinito Universo E Mondi
(burned at the stake in Campo dei
Fiore, Rome, 1600)



❖ یافتن یک نظریه‌ی سازگار برای نحوی شکل گیری سیارات،
لازمه‌ی آن کشف سیارات در فازهای مختلف تحولی

Search for extraterrestrial intelligence

- Arecibo observatory: radio telescope, Feloria, 1963-2008, 305m diameter,
 - *The first exoplanets rotating a pulsar,
 - * Following near asteroids to Earth
 - * The largest telescope before 2016.



"RED DWARF UV CETI"

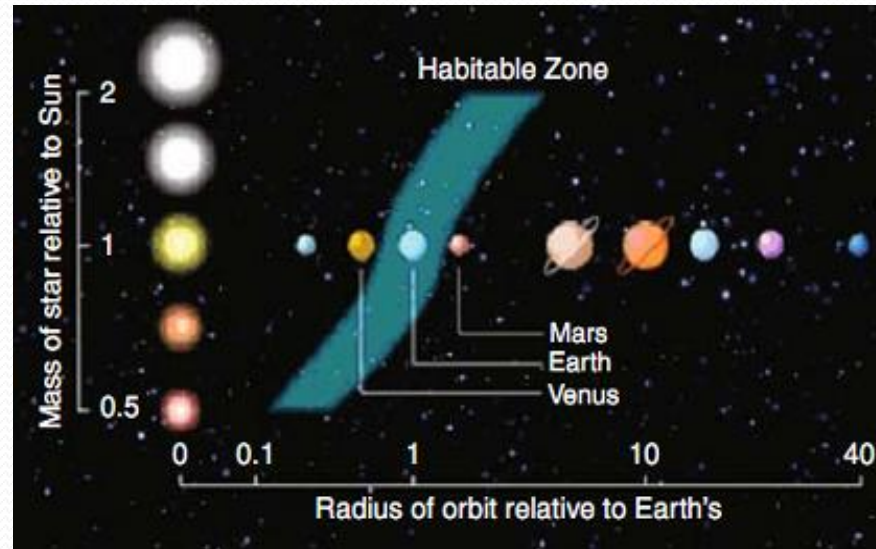
سیاره‌ی قابل زیست



منطقه زیست پذیر

- مهمترین عنصر در تشکیل حیات، آب مایع (273-373) است. ناحیه ای در اطراف هر ستاره که در آنجا آب به صورت مایع وجود داشته باشد، منطقه زیست پذیر می گویند.

$$E = \sigma T^4 4\pi R^2$$



- عوامل موثر دیگر: درجه حرارت و فشار سطح سیاره، جرم سیاره، درخشندگی ستاره ای مادر، نوع عناصر درون اتمسفر سیاره، توان بازتاب، وجود ابر درون اتمسفر سیاره، بادهای خورشیدی، خواص مغناطیسی ستاره مادر.....
- خواص اتمسفری سیاره (طیف سنجی)، تغییرات درخشندگی ستاره مادر، خروج از مرکز مدار سیاره،
- اثرات گلخانه ای: به عناصر درون جو بستگی دارد، آب، دی اکسید کربن، متان..... این اثر باعث تبخیر اقیانوس ها می شود ...

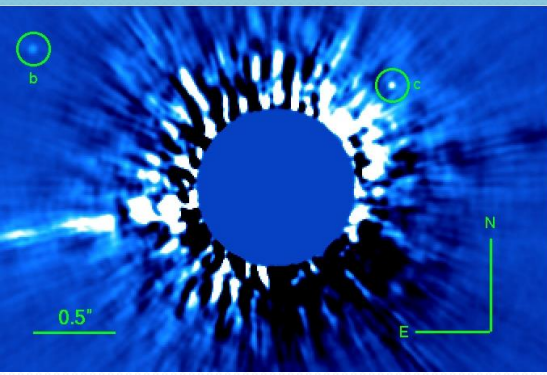
روش‌های آشکارسازی سیارات فراخورشیدی

➤ مستقیم: تشخیص فوتون‌های ستاره‌ی چشمه از فوتون‌های تابش شده از سطح سیاره

- ❖ تداخل سنجی در ناحیه‌ی مادون قرمز
- ❖ عکس برداری

➤ غیرمستقیم: آشکارسازی سیارات از طریق اثراتی که بر روی حرکت و یا درخشندگی ستاره‌ی مادر

- ❖ اخترسنجی
- ❖ زمان سنجی تپ‌اخترها
- ❖ سرعت سنجی شعاعی
- ❖ گرفت
- ❖ ریزهمگرایی گرانشی



روش مستقیم آشکارسازی سیارات فراخورشیدی

انتخاب بهترین طول موج برای رصد که به شار سیاره بستگی دارد:

❖ شار منعکس شده: بیشینه در ناحیه اپتیکی (400-700 نانو متر)

توان بازتاب هندسی

$$F_p^{(ref)} = F_* A_g \left(\frac{R_p}{a}\right)^2 g(\Phi) \longrightarrow \text{تابع فاز}$$

❖ شار حرارتی سیاره (قانون پلانک): بیشینه در ناحیه نزدیک و وسط مادون قرمز (700 تا 5600 نانومتر)

$$I(\vartheta, T_p) = \frac{2 h \vartheta^3}{c^2} \left(e^{\frac{h\vartheta}{kT_p}} - 1 \right)^{-1}$$

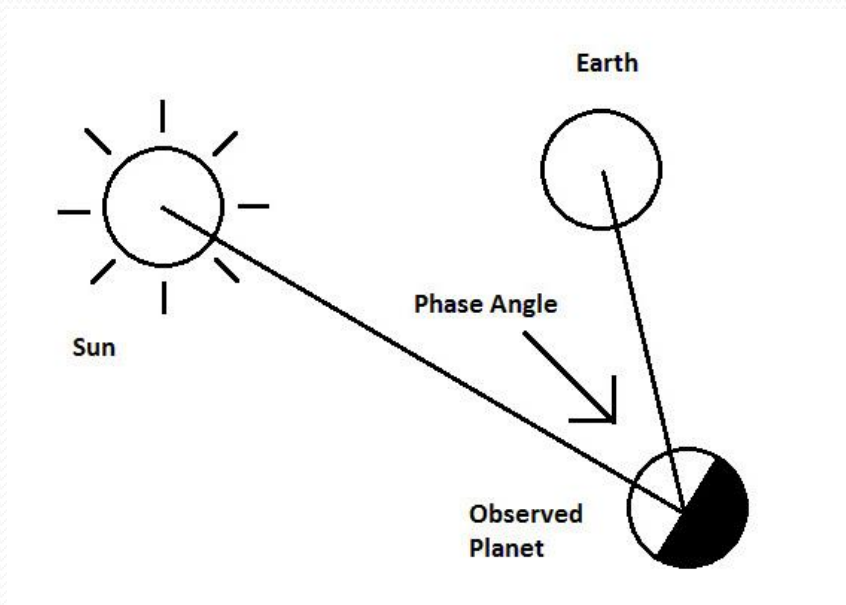
فاکتور بازتابش

$$T_p = T_* \left(\frac{R_*}{a}\right)^{1/2} [f(1 - A_B)]^{1/4}$$

توان بازتاب مقید

❖ **توان بازتاب هندسی:** کسر تابش منعکس شده از سطح سیاره در زاویه فاز صفر نسبت به تابش منعکس شده از سطح یک صفحه در همان جهت و با شعاع مساوی با کره

❖ **توان بازتاب مقید:** کل توان منعکس شده از سطح سیاره به کل تابش دریافت شده توسط سطح سیاره



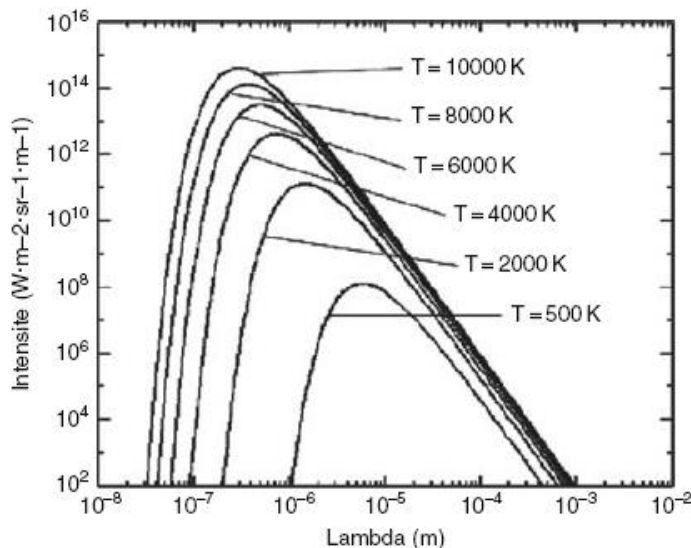
تابش پلانک:

- جسم سیاه: یک جسم فیزیکی ایده ال، ایزوله و در حالت تعادل ترمودینامیکی که یک درجه حرارت تعادلی دارد. این جسم تابش همسانگرد دارد که تنها براساس درجه حرارت تعیین می شود. توزیع تابش این جسم از تابع پلانک بدست می آید:

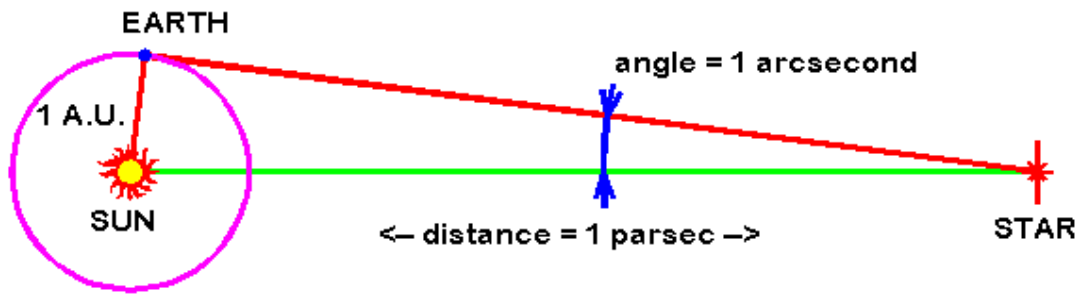
$$B_{\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2 e^{\left(\frac{h\nu}{kT} - 1\right)}} \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$$

- با انتگرال گرفتن بر روی همه جهتها و همه فرکانسها (قانون استفان):

$$F = \sigma T^4 \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$



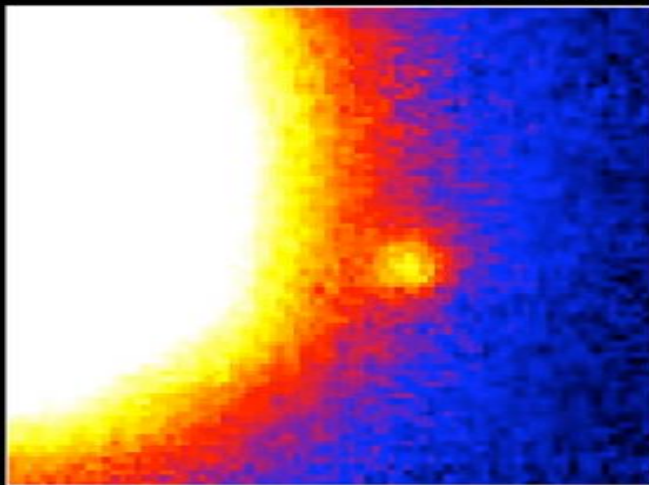
$$\sigma = \text{Stefan's constant} = 5.66956 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$



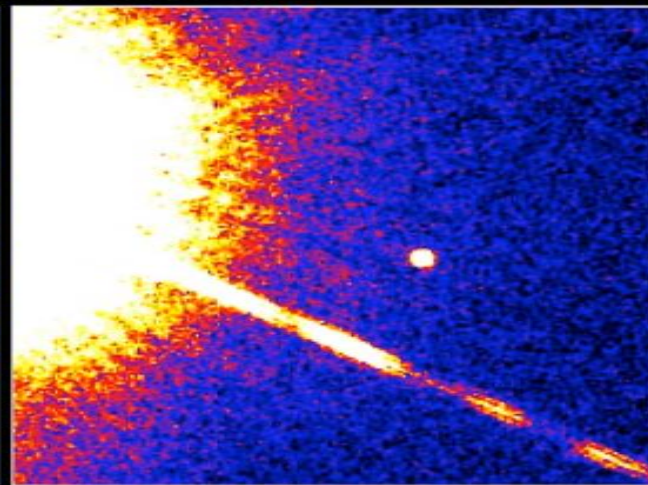
موانع برای رصد مستقیم سیارات:

- ❖ فاصله خورشید تا نزدیکترین ستاره حدود چند پارسک، کوچکی زاویه فضایی اجرام (در فاصله 10 پارسکی زاویه جدایی زمین نسبت به خورشید 0.1 ثانیه قوسی است)
- ❖ وجود دیسک متشکل از غبار و یا دیسک باقیمانده حول اکثر ستاره ها (تابش ناشی از دیسک غبار حول خورشید حدود 300 برابر تابش ناشی از زمین است.)

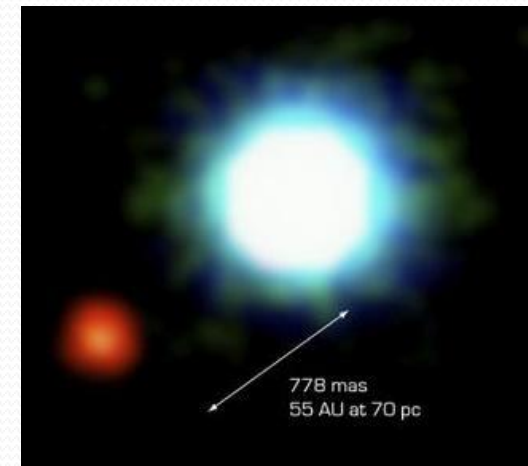
Brown Dwarf Gliese 229B



Palomar Observatory
Discovery Image
October 27, 1994



Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2
November 17, 1995



روش اختر سنجی

❖ یک سیاره و ستاره هر دو حول مرکز جرم مشترکشان می چرخند:

$$m_* a_* = m_p a_p$$

❖ هر دو آنها سرعت مداری و دوره تناوب یکسان دارند.

❖ بیشینه‌ی جابجایی ستاره‌ی مادر در صفحه‌ی آسمان

$$\delta\theta_{max} = \frac{a_*}{D} = \frac{m_p}{m_*} \frac{a_p}{D}$$

❖ سیارات پر جرم‌تر در مدارهای بزرگ‌تر

❖ انتخاب یک دستگاه مختصات ثابت در آسمان (اخترش‌ها)

❖ اثر جو زمین

➤ تلسکوپ فضایی: ماهواره هیپارکوس دقت میلی ثانیه قوسی

➤ تلسکوپ گایا: دقت در حد چند

ده میکرو ثانیه قوسی

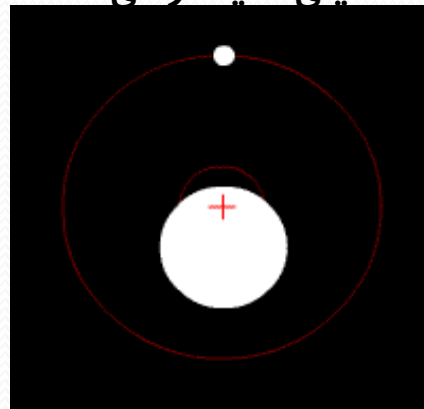
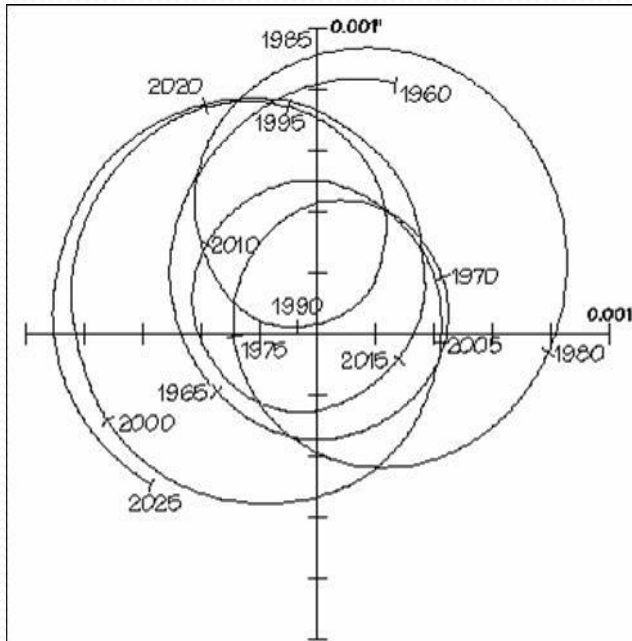
Planet (unseen)

Angular diameter of star's "wobble"

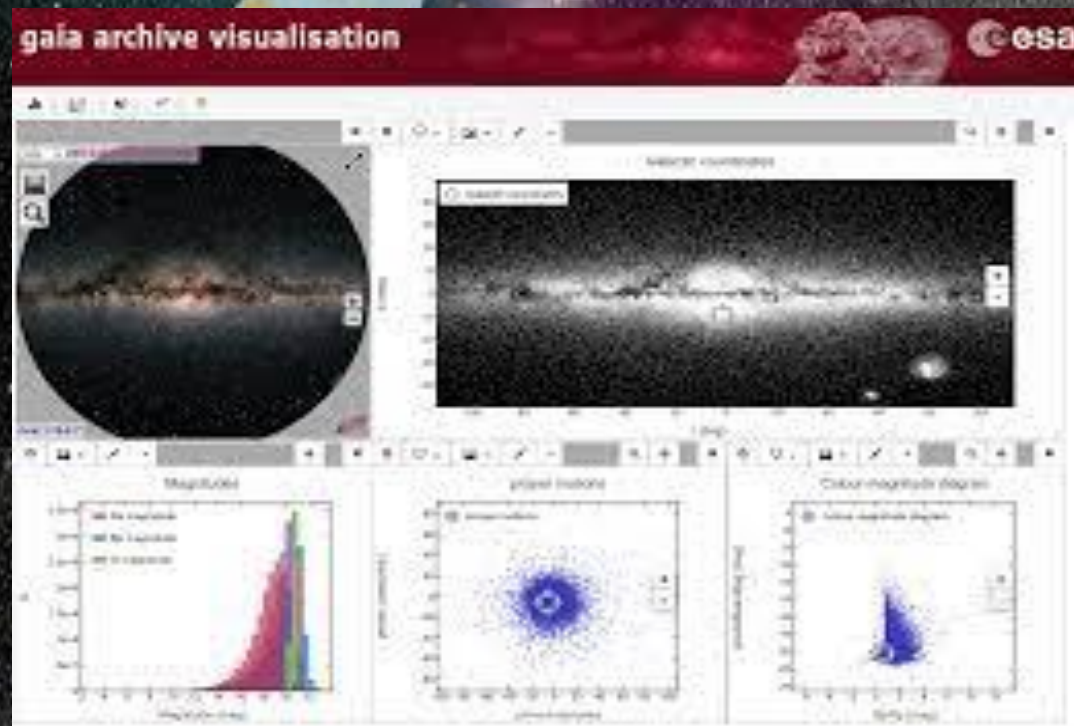
Star



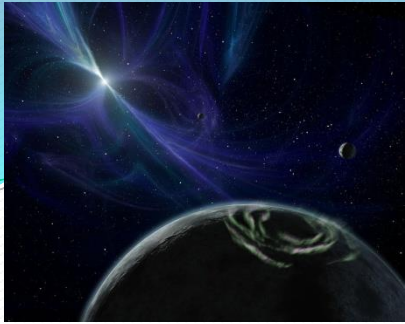
b



- Space observatory, Mission duration: 10 years
- L2-lagrangian point.
- Will observe about 2 billion objects, brighter than 21 G-magnitude.
- doing **high-precision astrometry**, photometry and spectroscopy (16 μg)
- Gaia determines the position, distance and annual proper motion of stars.
- <https://gea.esac.esa.int/archive/>



object	a^* (r_{\odot})	$\delta\theta$ at 5 pc (mas)
Jupiter	1.07	1.00
Saturn	0.59	0.55
Uranus	0.18	0.17
Earth	$6.5 \cdot 10^{-4}$	$6.0 \cdot 10^{-4}$

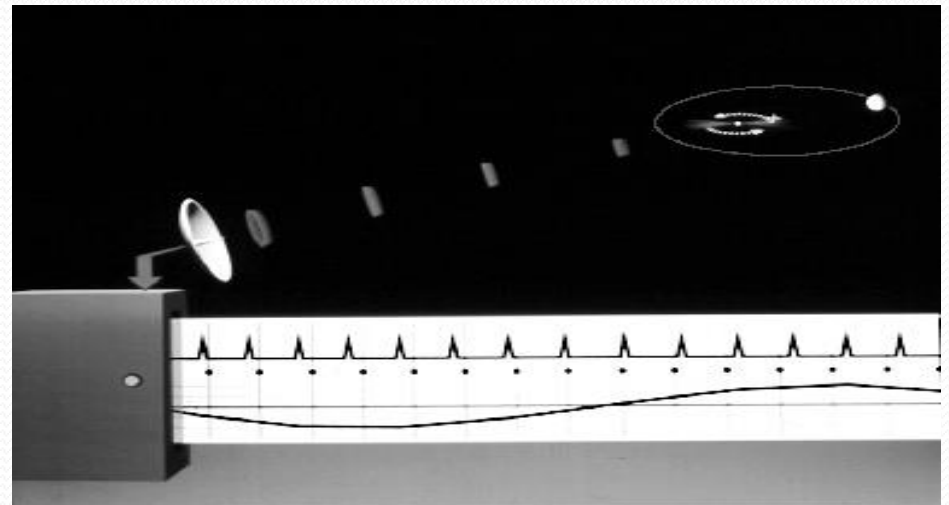
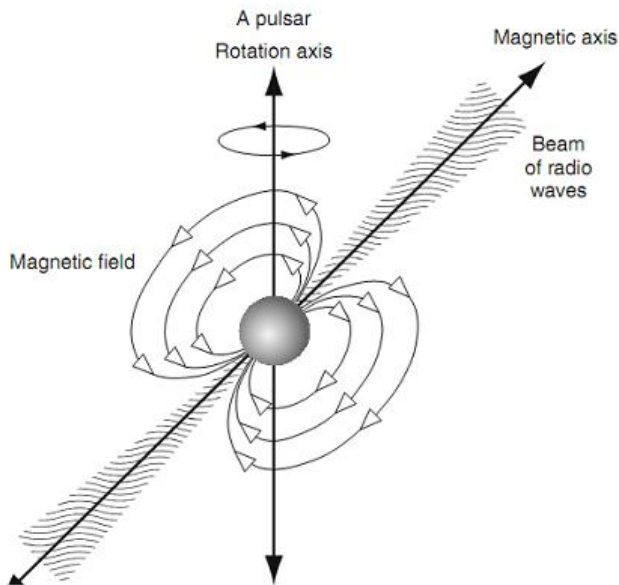


آشکارسازی سیارات حول پالسرها

- ❖ تپ اختر (پالسار): ستاره‌های نوترونی که دارای میدان مغناطیسی شدیدی هستند و با سرعت بسیار زیاد حول خودشان می‌چرخند:
- ❖ حرکت اخترسنجی تپ اختر باعث تغییر تناوبی دوره تناوب آن می‌شود:

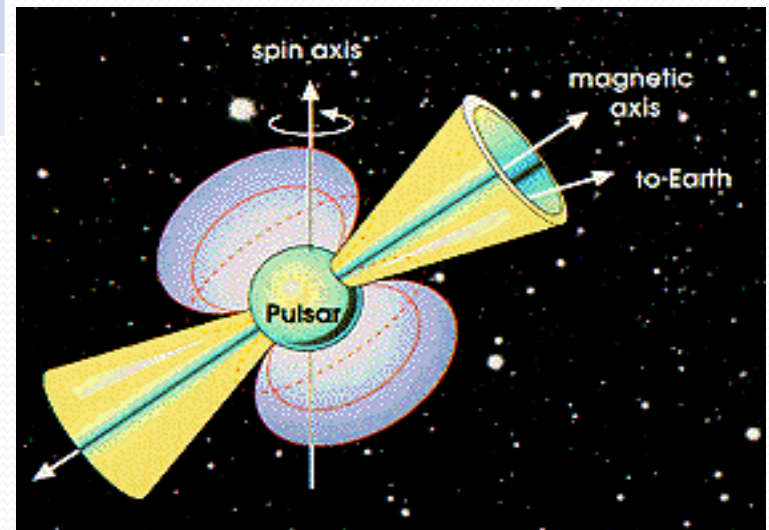
$$\delta T_{\star} = \frac{a_{\star} \sin(i)}{c}$$

- ❖ اولین سیاره فراخورشیدی حول یک تپ اختر



✓ The timing of pulsars

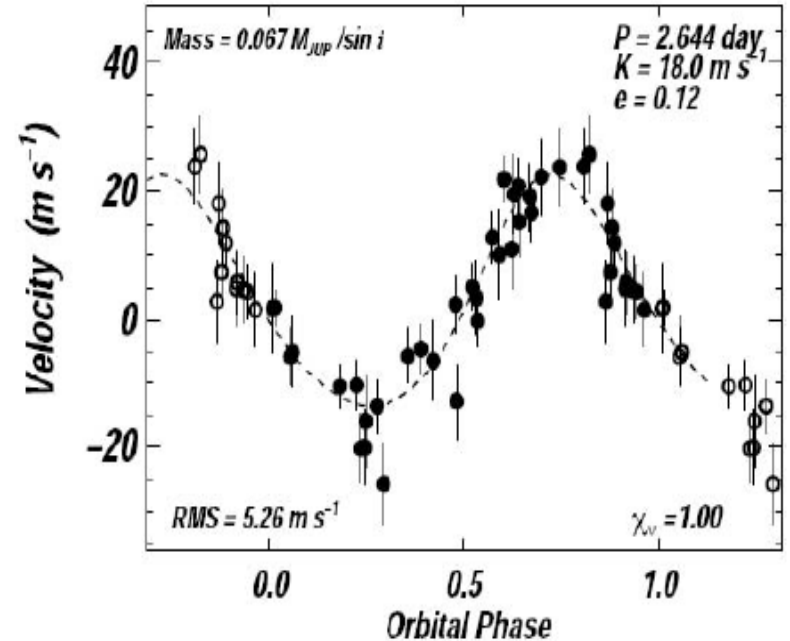
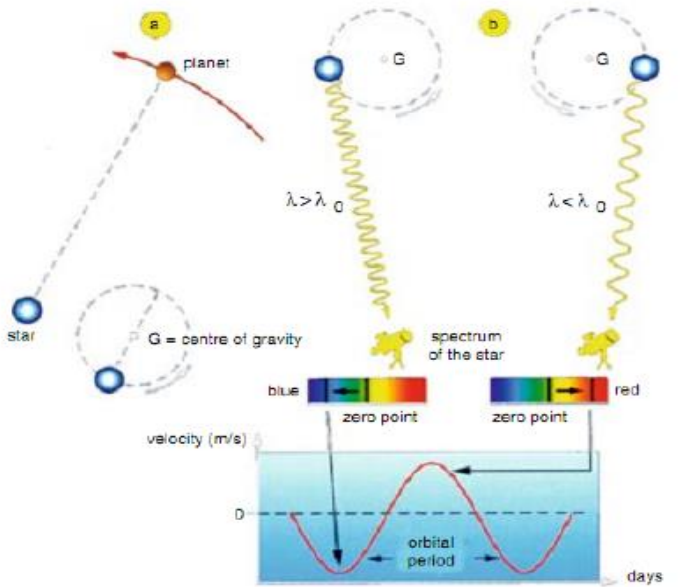
Object	a^* (r_{\odot})	δT^* (ms)
Jupiter	1.07	250
Saturn	0.59	137
Uranus	0.18	42
Earth	$6.5^* 10^{-4}$	0.15



- Currently, the lowest-mass companions that are detectable are found in this system.
- The first exoplanets detected, in 1992, were those around PRS1257+12.(Wolszczan and Frail,1992)

روش سرعت‌سنجی شعاعی

❖ تعیین سرعت شعاعی ستاره‌ی مادر به روش طیف‌سنجی



❖ مدار سیاره باید از لبه دیده شود

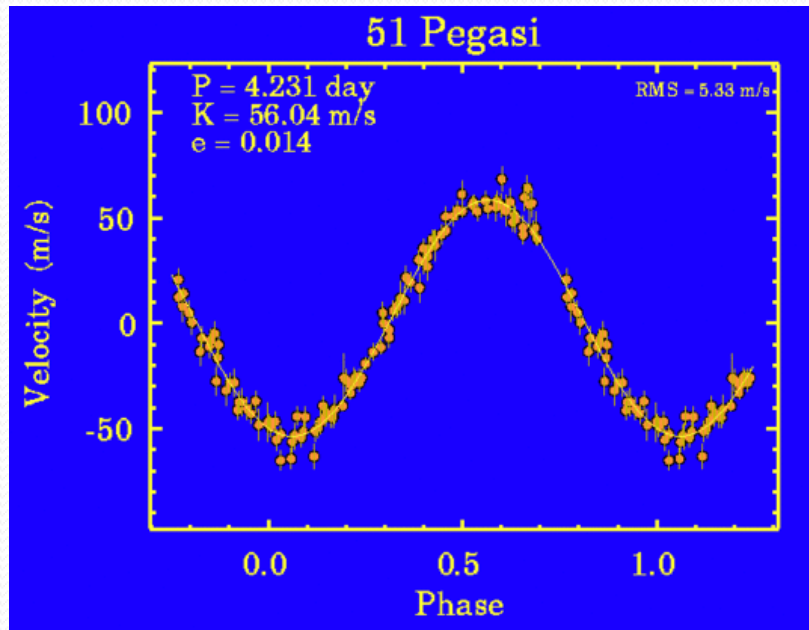
❖ سیارات سنگین‌تر در مدارهای بزرگ‌تری.

❖ تعیین جابجایی در طول موج عناصر سنگین

❖ اثر دوپلر

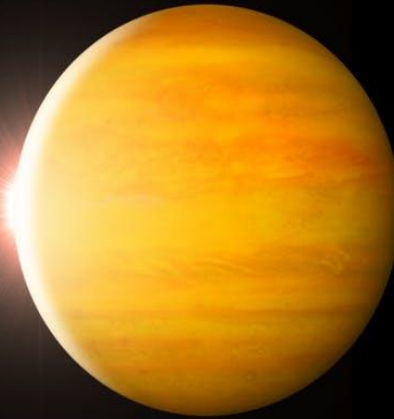
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c} = \frac{\Delta\nu}{\nu}$$

Michel Mayor and Didier Queloz discovered the first hot Jupiter around a sun-like star (51 Pegasi in 50 Lyr)



CELEBRATING 20 YEARS OF EXOPLANET DISCOVERIES

THE FIRST PLANET DISCOVERED AROUND A **SUN-LIKE** STAR



51 Pegasi b

Discovered October 6, 1995



This year we celebrate the discovery of 51 Pegasi b in October, 1995. This giant planet is about half the size of Jupiter and orbits its star in about 4 days. '51 Peg' helped launch a whole new field of exploration.

TEMPERATURE
51 Pegasi b has a temperature of 1000C°/1800F°.



ORBITAL PERIOD
51 Pegasi b orbits its host star every 4 days.

DISTANCE FROM EARTH
51 Pegasi b is 50 light-years from Earth.

PLANET COMPARISON

51 Pegasi b	Jupiter
	
51 Pegasi b is 47% less massive, but 50% larger than Jupiter.	

STAR COMPARISON

51 Pegasi	Our sun
	
51 Pegasi is 11% more massive and 23% larger than our sun.	



James Peebles
Theoretical cosmology



Didier Queloz
exo-planet

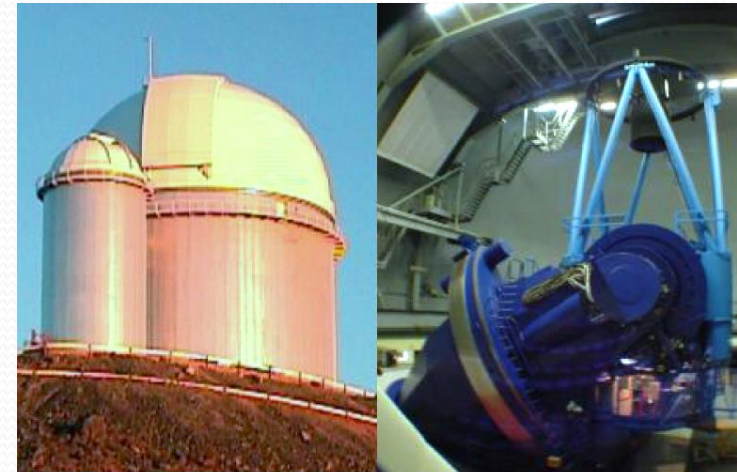
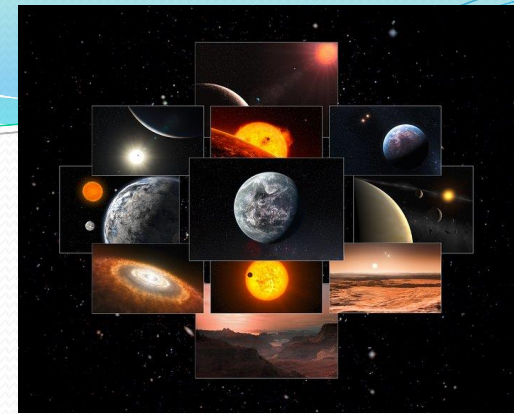


Michel Mayor
exo-planet

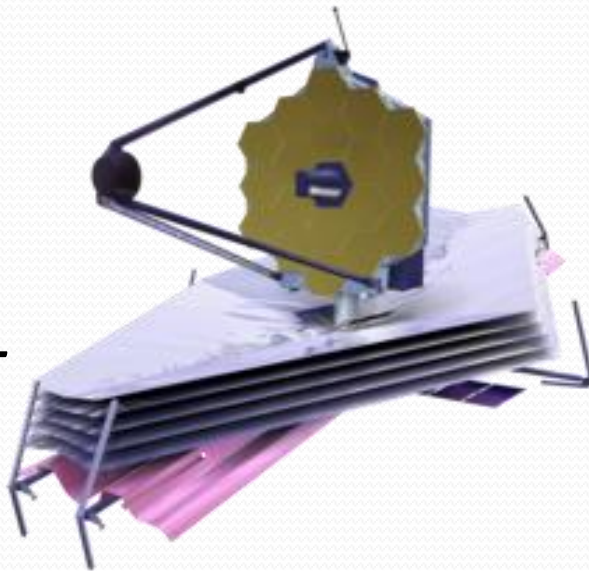
2019 Nobel prize in physics: cosmology and exoplanets

- **High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher (HARPS)**

- 3.6 m telescope, La Silla Chile, ESO, started in 2002
- No. exo-planets by radial velocity: 456
- Accuracy 1 m/s
- Detecting super-Earth in HZ, planet around twin stars, lightest exoplanet, Earth-like planet in HZ, planetary system



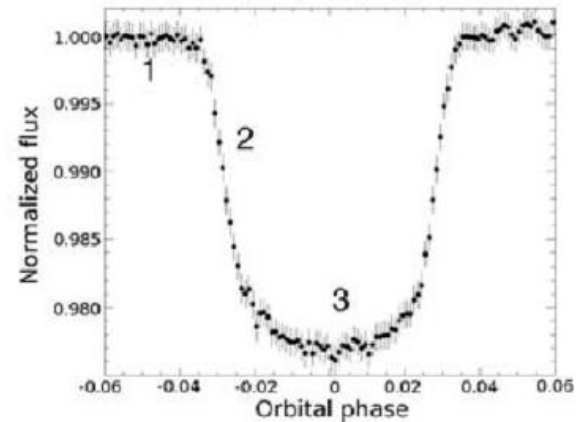
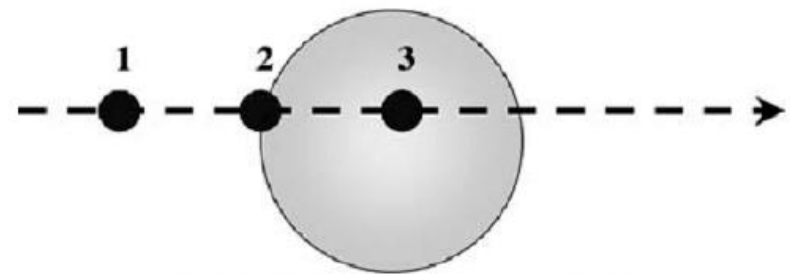
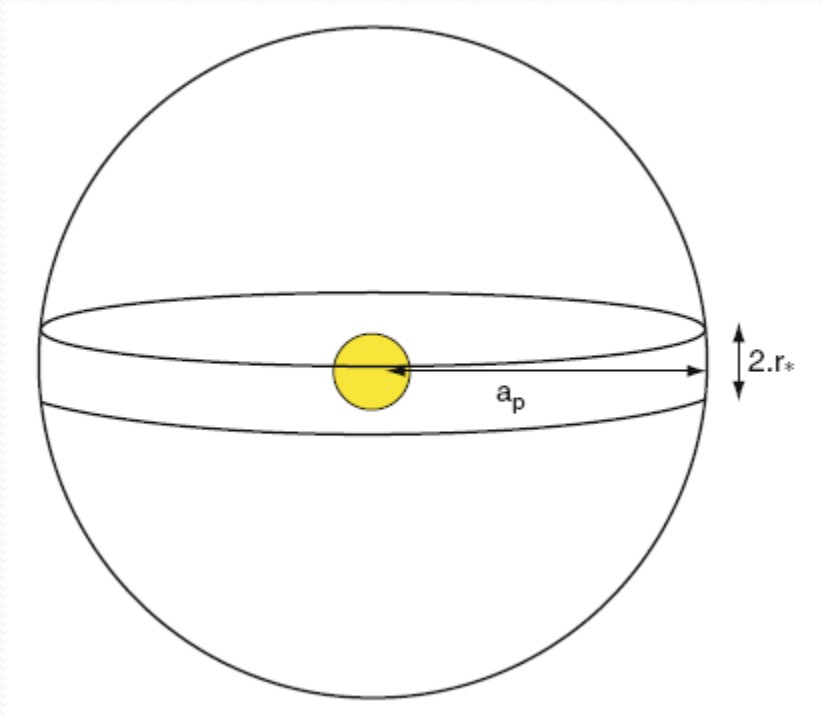
- **JWST**



روش گرفت

- اختلال در نور ستاره‌ی مادر در اثر عبور سیاره از جلوی آن
- احتمال رخ دادن
- سیاراتی با دوره تناوب کوچکتر

$$P_t = \frac{\Upsilon \pi a_p \Upsilon r_\star}{\Upsilon \pi a_p \Upsilon} = \frac{r_\star}{a_p}$$

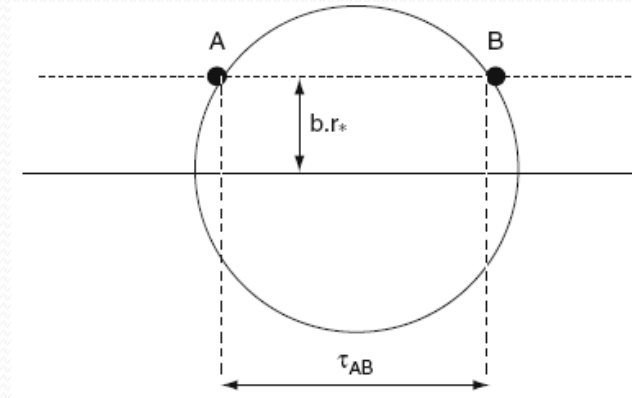


$$l = \gamma r_* \sqrt{1 - b^2}$$

(1) مدت زمان گرفت

$$v = \frac{\gamma \pi a_p}{P}$$

$$\tau = \frac{(\gamma \pi)^{2/3} \gamma r_* \sqrt{1 - b^2}}{(GM_*)^{1/3}} P^{1/3}$$



$$\frac{\Delta F}{F} \propto \frac{r_p^\gamma}{r_*^\gamma}$$

(2) میزان افت در درخشندگی

❖ تبهگنی در تعیین پارامترها

❖ ترکیب این روش با روش سرعت سنجی شعاعی چگالی سیاره را تعیین

❖ تشخیص عناصر درون اتمسفر سیاره



مشتری داغ



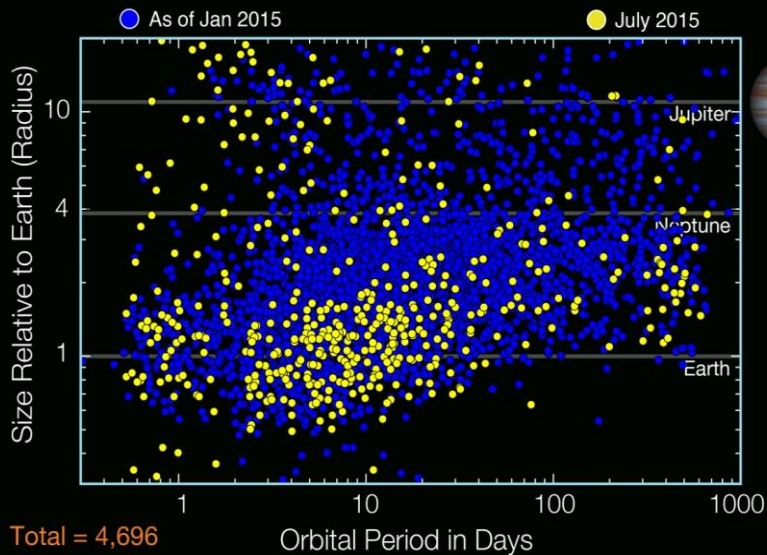
- ❖ فاصله کمتر از 0.1 واحد نجومی تا ستاره مادر
- ❖ درجه حرارت سطحی حدود 1000-2000 کلوین
- ❖ برهمکنش جذرومدی شدیدی با ستاره‌ی میزبان
- ❖ وجود فلزات قلیایی درون اتمسفرشان مانند سدیم و پتاسیم

- From 2009-2018, detecting 2662 exo-planets from observing 530506 main sequence stars

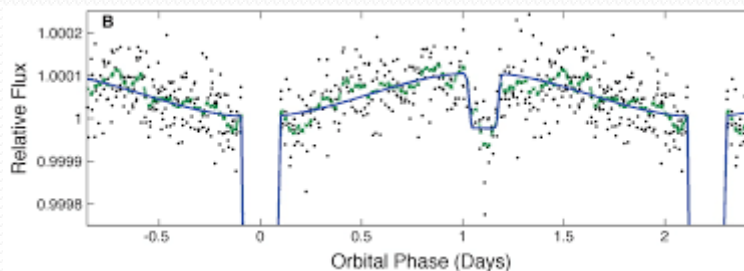
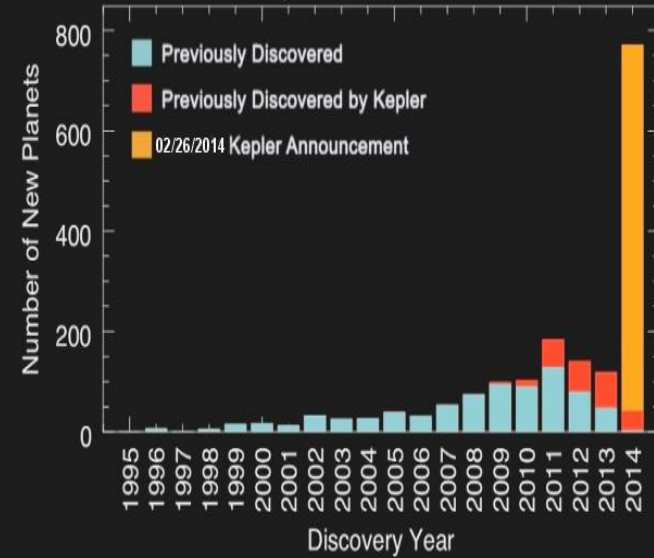
Kepler space Telescope

New Kepler Planet Candidates

As of July 23, 2015



Exoplanet Discoveries



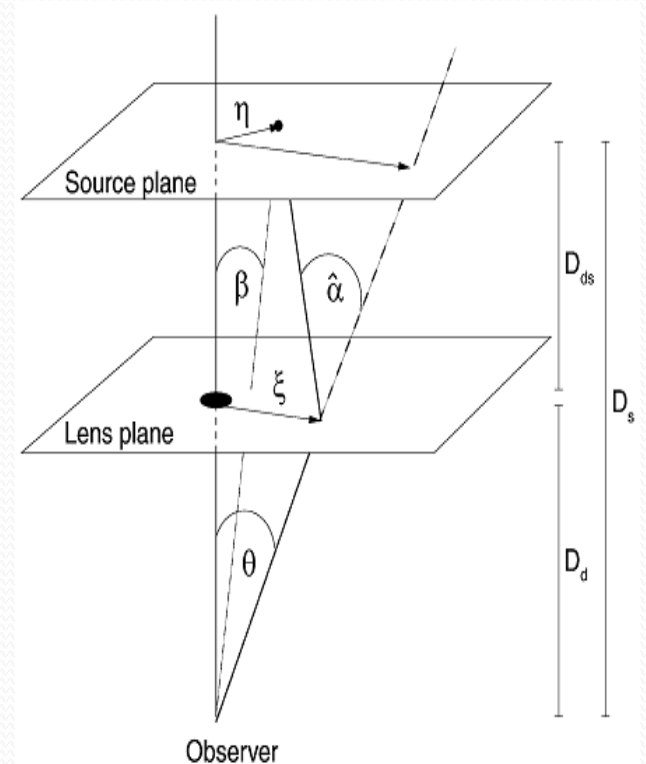
ریزه‌مگرایی گرانشی:

- ❖ همگرایی گرانشی: یکی از نتایج نسبیت عام انیشتین خم شدن نور در اثر عبور از میدان گرانشی یک جسم
- ❖ ریزه‌مگرایی گرانشی: در ابعاد کهکشانی مسیر نور یک ستاره پس‌زمینه می‌تواند به وسیله یک ستاره‌ی زمینه خم شود.

$$\hat{\theta} D_s = \hat{\beta} D_s + \hat{\alpha} D_{ds}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{4GM}{C^2 b}$$

$$\theta = \frac{\beta \pm \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2}}{2}$$



تقریب‌های بکاررفته

❖ تقریب میدان ضعیف $R_{sch} \ll \xi$

❖ ستاره چشمه، عدسی و ناظر همه تقریباً در یک راستا هستند

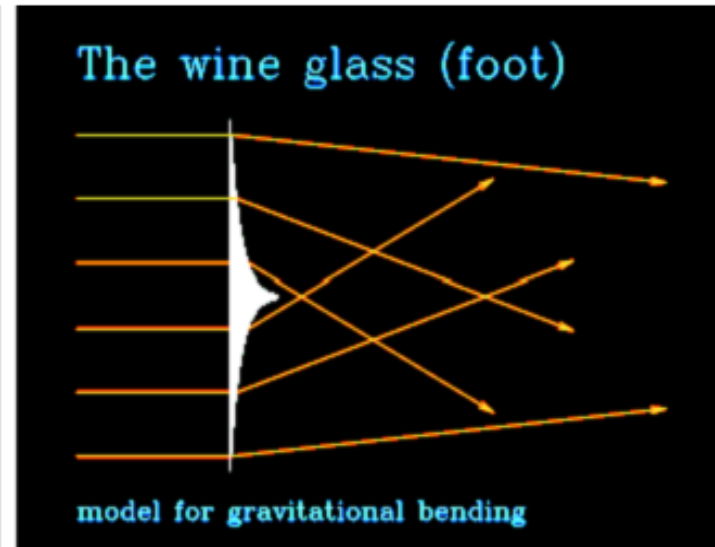
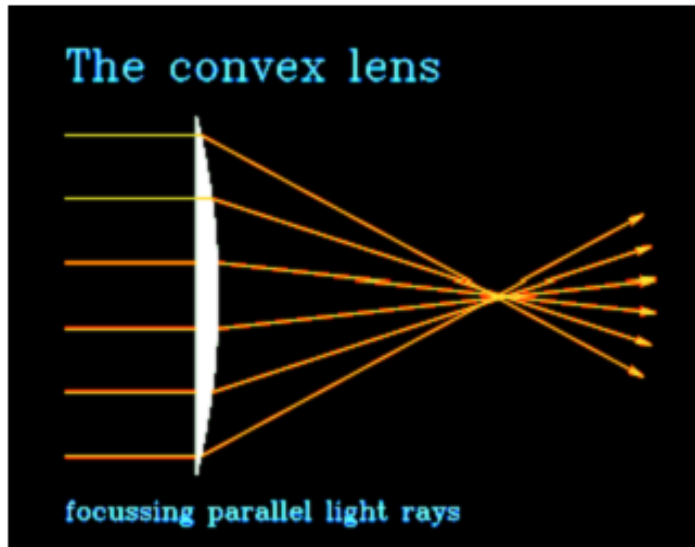
❖ چشم پوشی کردن از اثرات اپتیک موجی

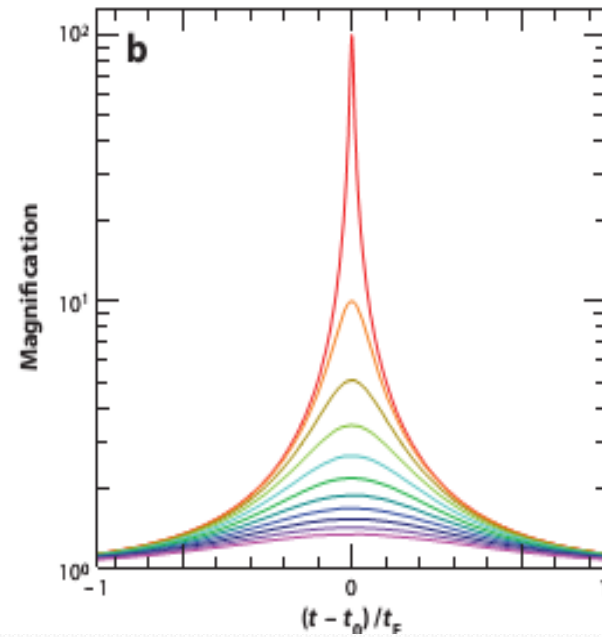
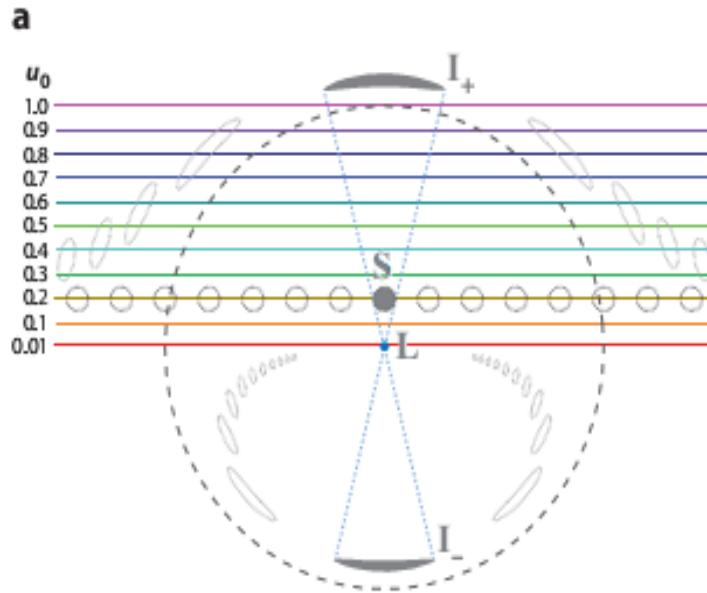
❖ غیر نسبیتی بودن سرعت‌ها

❖ نازک بودن عدسی به نسبت فاصله تا ستاره‌ی چشمه و ناظر $\Delta r \ll D_d, D_s$

❖ نقطه‌ای بودن عدسی، تنها برای ریزهمگرایی گرانشی

❖ عدسی‌های گرانشی تک‌رنگ اند و نور را در یک نقطه همگرا نمی‌کنند.





$$\theta_E = \frac{R_E}{D_d} \approx 0.55 \text{ mas} \sqrt{\frac{1 - D_d/D_s}{D_d/D_s} \left(\frac{D_s}{8 \text{ Kpc}}\right)^{-1/2} \left(\frac{M}{0.3 M_\odot}\right)^{1/2}}$$

همگرایی گرانشی روشنایی سطحی را تغییر نمی‌دهد

- ❖ مطابق با قضیه لیویل هر گاه تمام نیروها پایستار و مشتق‌پذیر باشند، در این صورت انرژی کل ذرات تغییر نمی‌کند و چگالی ذرات در فضای فاز نسبت به زمان ثابت باقی می‌ماند.
- ❖ توان در واحد سطح در واحد زاویه‌ی فضایی در واحد فرکانس با چگالی ذرات در فضای فاز متناسب و برابر است با:

$$I_{\vartheta}(Wm^{-2}Hz^{-1}Sr^{-1}) = \frac{h^4 \vartheta^3}{c^2} f$$

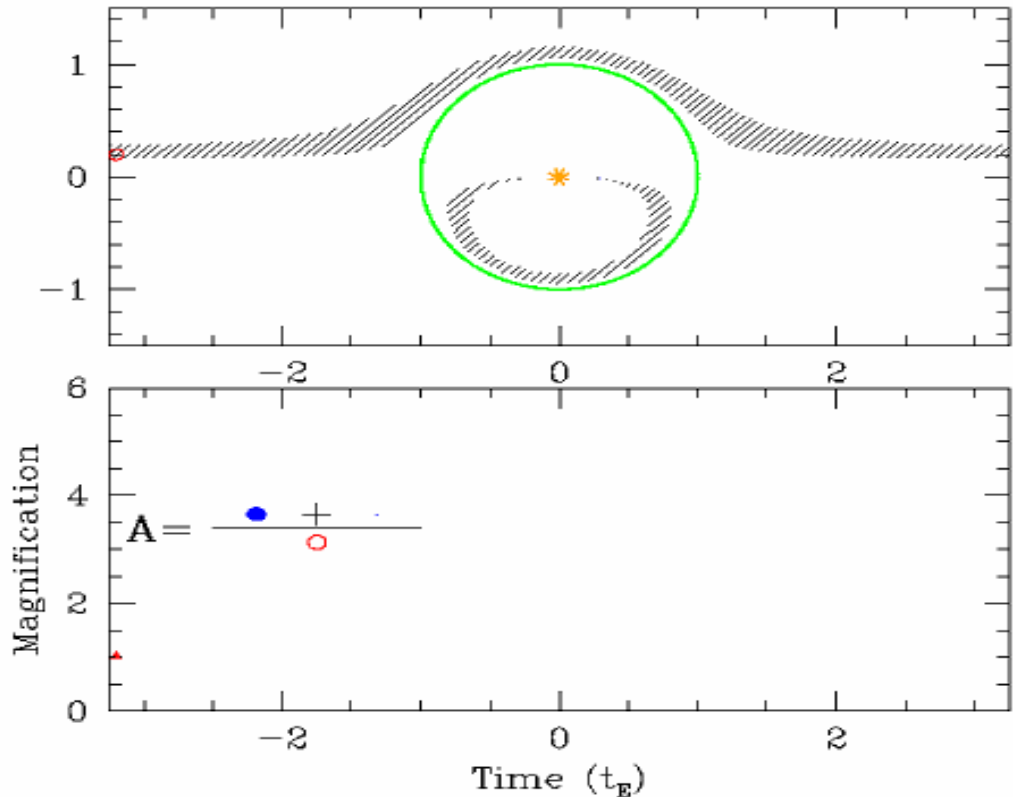
- ❖ از آنجایی که نیروی گرانشی یک نیروی پایستار است، پس انتظار داریم چگالی ذرات در فضای فاز و به تبع آن درخشندگی سطحی نیز پایسته بماند. درخشندگی سطحی همان انتگرال کمیت بالا بر روی همه فرکانس‌ها می‌باشد.

❖ ضریب تقویت نور: نسبت مساحت تصاویر به مساحت ستاره چشمه

$$A = \left| \frac{\theta d\theta}{\beta d\beta} \right|, \quad A = \frac{\beta^2 + 2\theta_E^2}{\beta \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2}}$$

❖ این کمیت همان عکس دترمینان ماتریس ژاکوبی تصویر از صفحه‌ی عدسی به صفحه‌ی چشمه

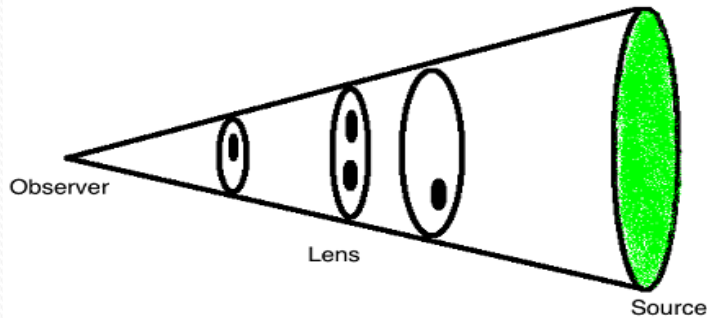
$$A_j = \frac{1}{\det J} \Big|_{\theta=\theta_j}, \quad \det J \equiv \left| \frac{\partial(\beta_1, \beta_2)}{\partial(\theta_1, \theta_2)} \right|$$



احتمال رخ دادن یک رویداد ریزهمگرایی گرانشی:

❖ احتمال اینکه یک ستاره چشمه نوعی درون حلقه‌ی انیشتین یک جسم زمینه قرار بگیرد:

$$\tau = \frac{1}{\Omega} \int_0^{D_s} n(D_l) \Omega D_l^2 \pi \theta_E^2 dD_l \quad \tau \simeq 2.7 \times 10^{-7}$$

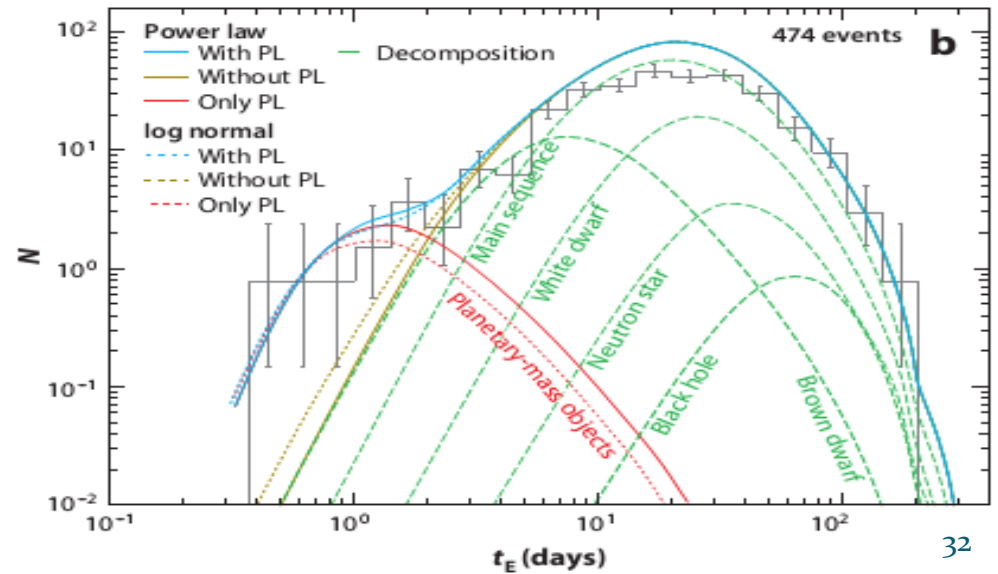
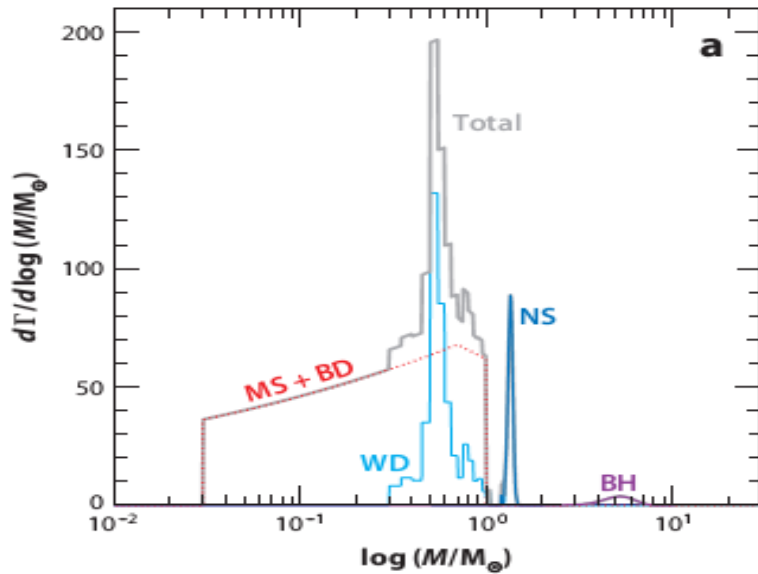
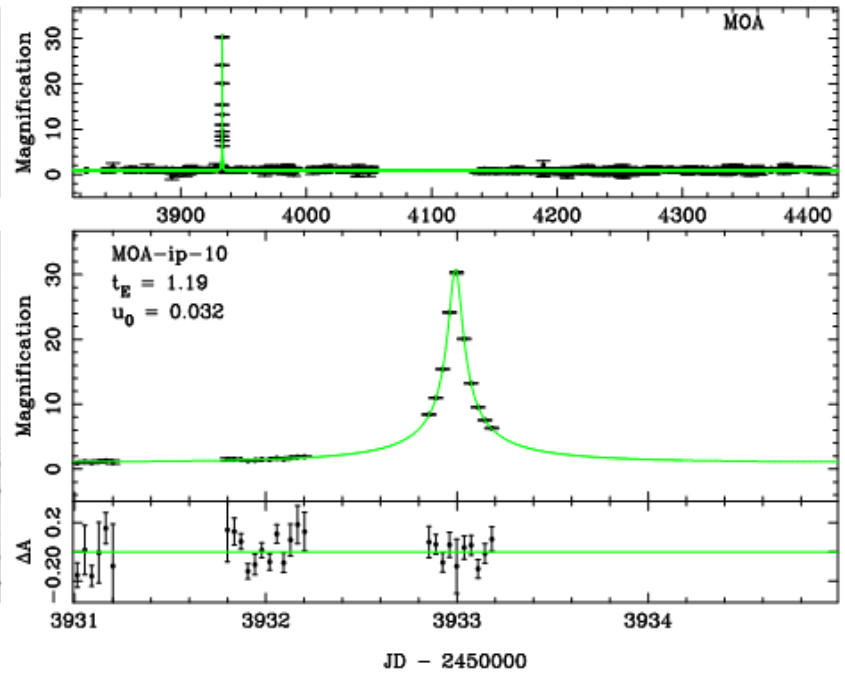
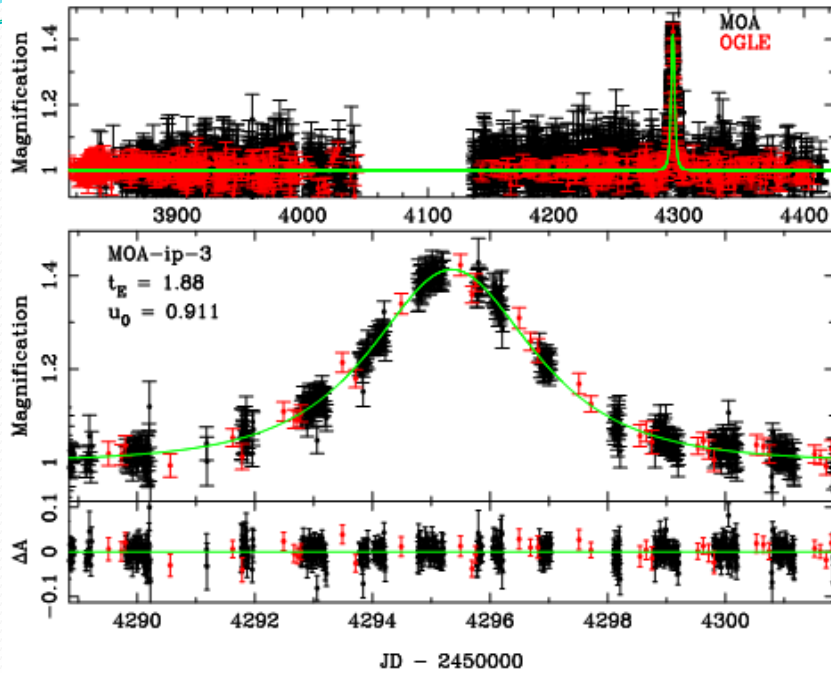


❖ آهنگ رخ دادن رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی:

$$\Gamma dt = \frac{1}{\Omega} \int_0^{D_s} n(D_l) \mu_{\text{rel}} dt \Omega D_l^2 2\theta_E dD_l$$

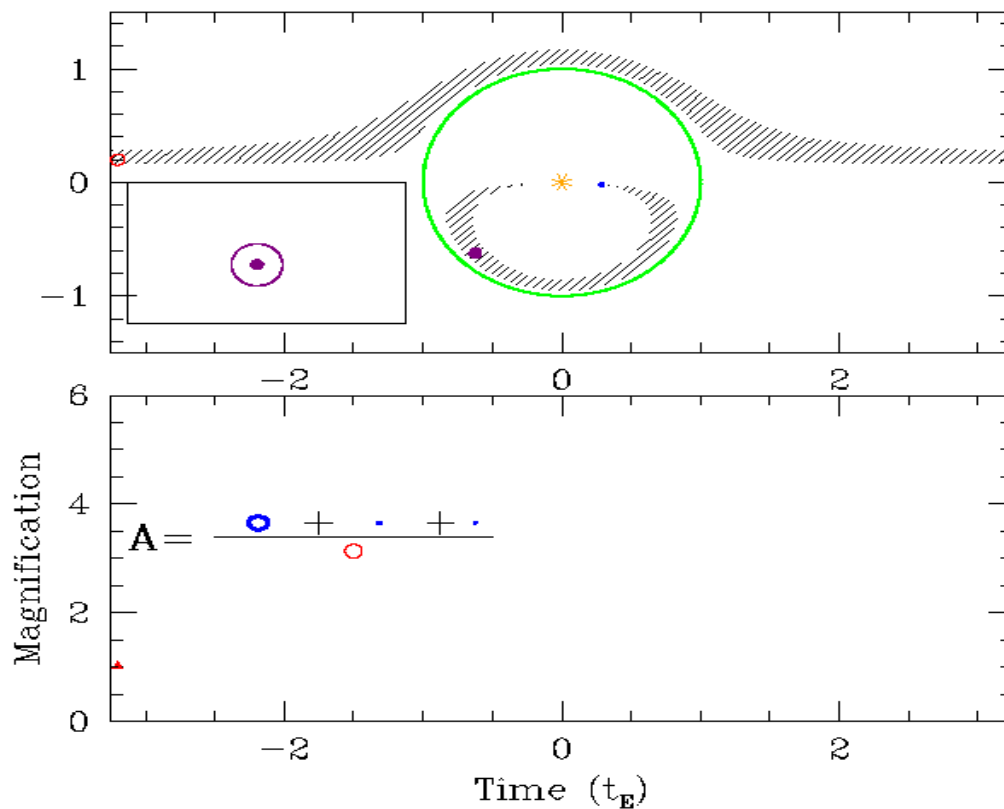
$$\Gamma \approx \frac{2N_*}{\pi} \frac{\tau}{t_E} = 1200 \text{ yr}^{-1} \frac{N_*}{10^8} \frac{\tau}{10^{-6}} \left(\frac{t_E}{19 \text{ day}} \right)^{-1}$$

Free-floating exo-planets: Almost twice as many as main-sequence stars



آشکارسازی سیارات فراخورشیدی به کمک ریزهمگرایی گرانشی:

❖ سیستم سیاره ای به عنوان عدسی: اگر فاصله سیاره تا ستاره ی مادر از مرتبه شعاع انیشتین باشد، در اثر گرانش سیاره بر روی تصاویر سیگنال سیاره ای رخ می دهد

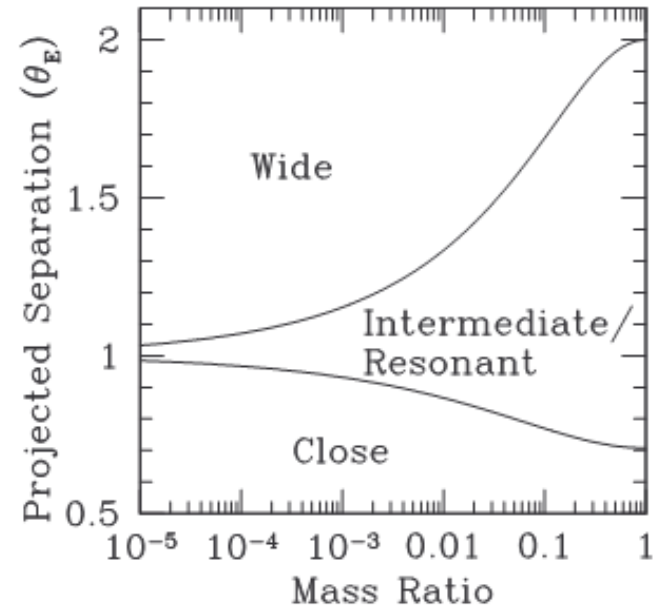
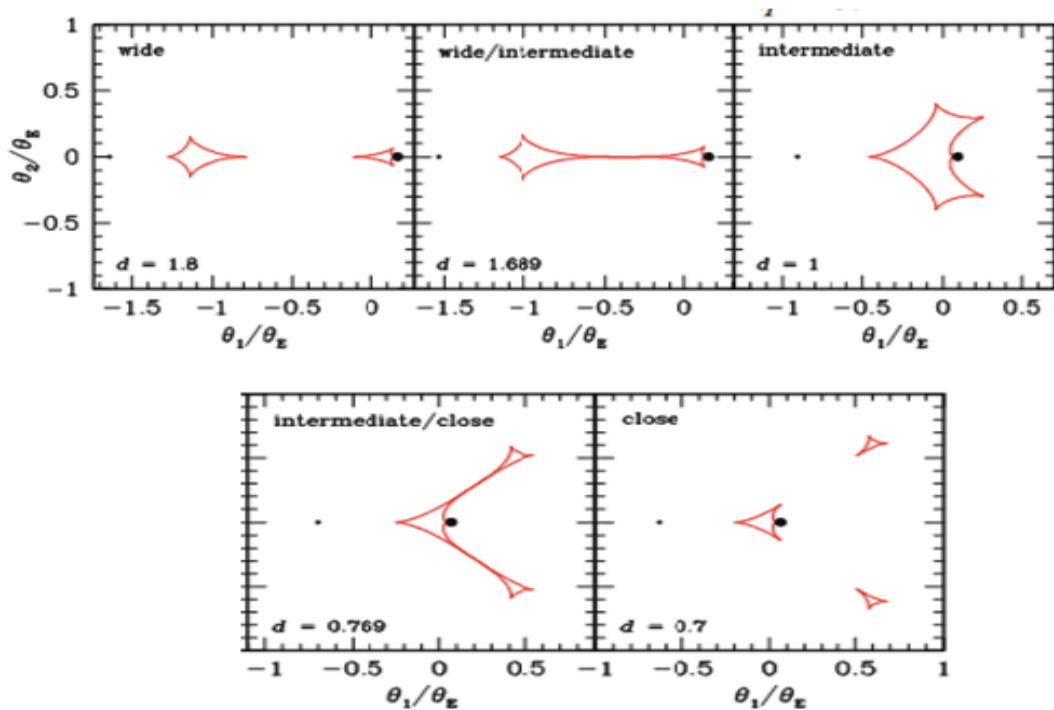


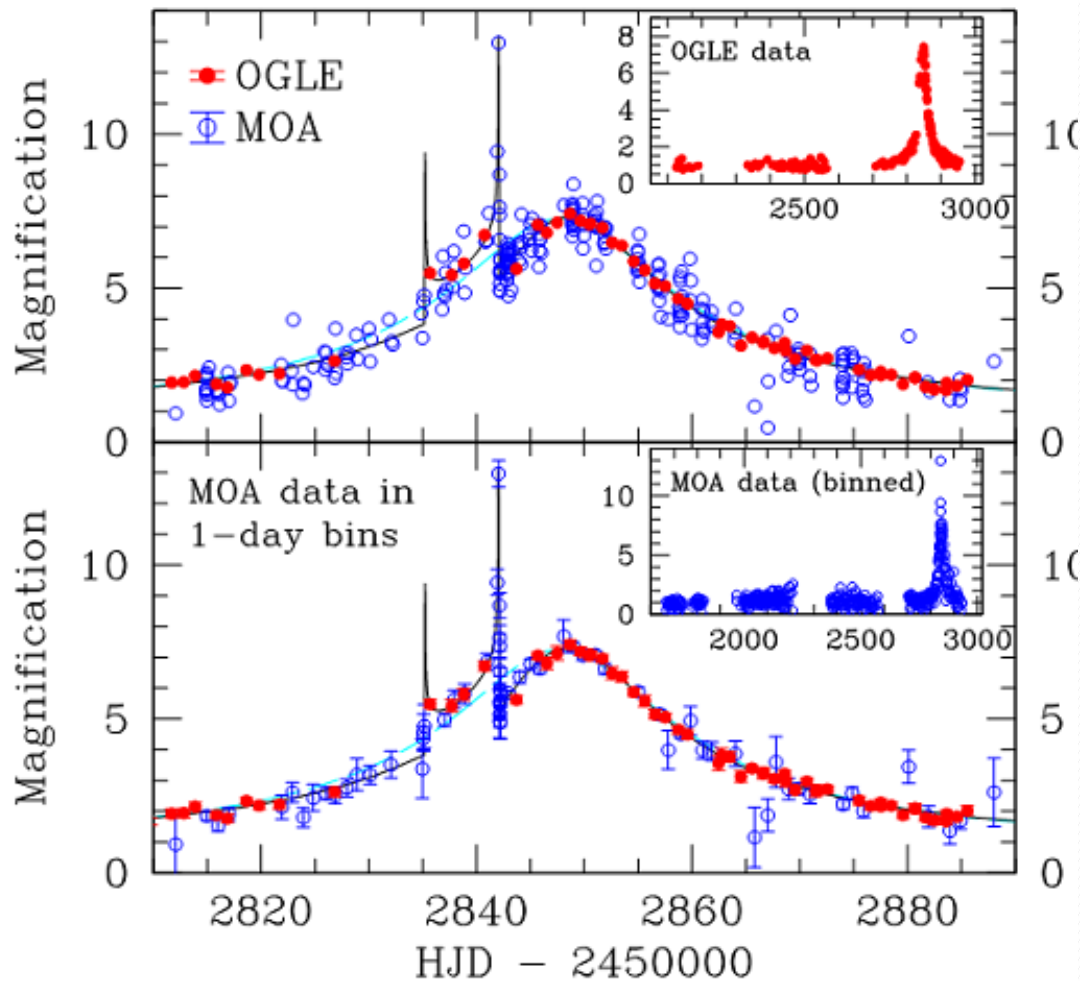
$$\vec{\eta} = \vec{\xi}_1 \frac{D_s}{D_1} - \vec{\alpha}_1(\vec{\xi}_1) D_{1s} - \vec{\alpha}_2(\vec{\xi}_2) D_{2s}$$

❖ عدسی یک ستاره دوتایی و یا یک سیستم سیاره ای:

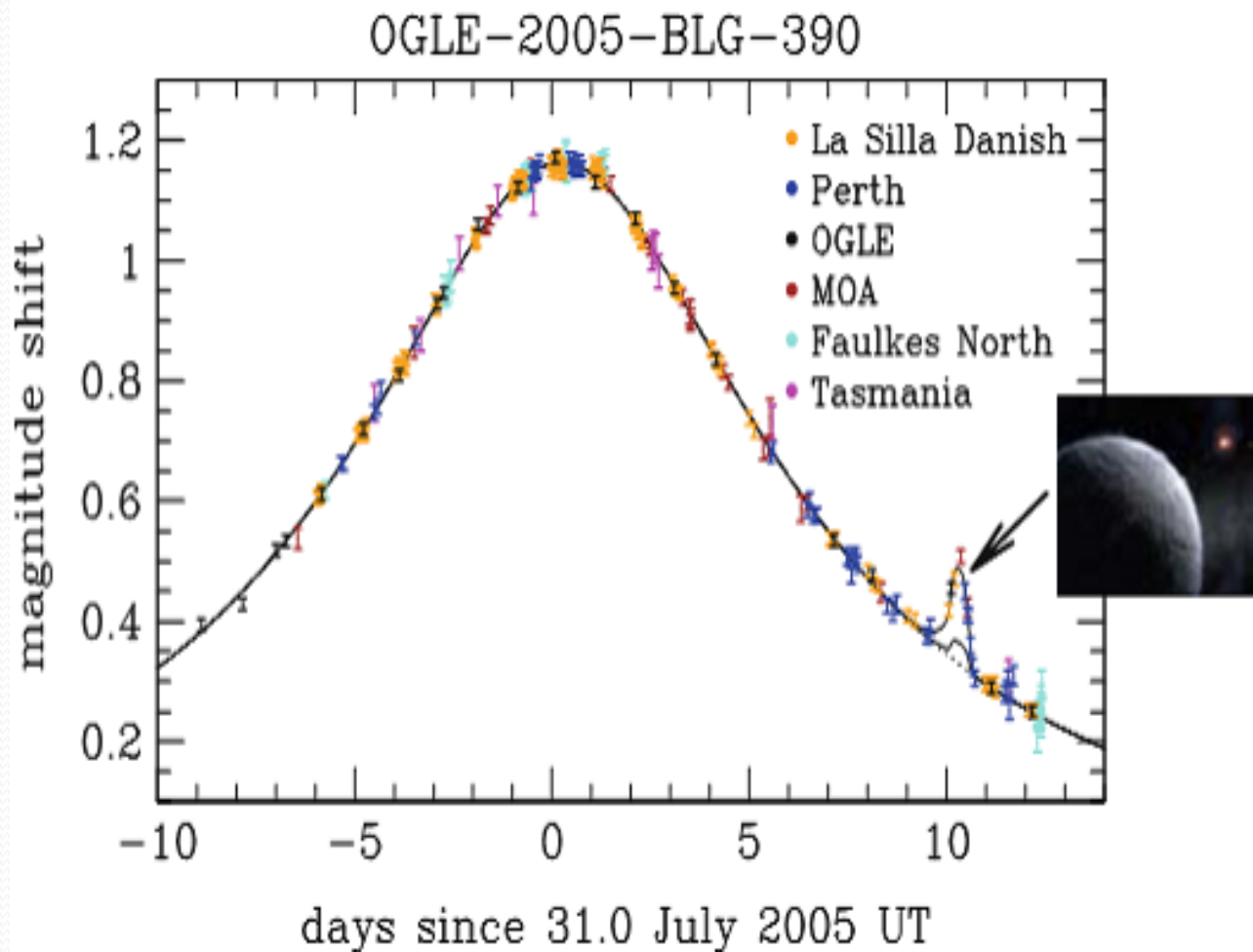
$$\vec{y} = \frac{D_d}{D_s R_E} \vec{\eta}, \quad \vec{x} = \frac{\vec{\xi}}{R_E} \quad \longrightarrow \quad A_{ij} = \frac{\partial y_i}{\partial x_j}$$

- ❖ میزان تقویت نور: معکوس دترمینان ماتریس ژاکوبی تصویر از مکان تصاویر به مکان چشمه
- ❖ مکان هندسی نقاطی از صفحه عدسی که اگر ستاره چشمه در آنجا قرار بگیرد، تقویت نور شدید خواهد داشت، منحنی سوختیک می نامیم.
- ❖ مکان تصاویر مربوط به ستاره‌ی چشمه بر روی منحنی سوختیک، در صفحه‌ی چشمه را منحنی بحرانی می گویند

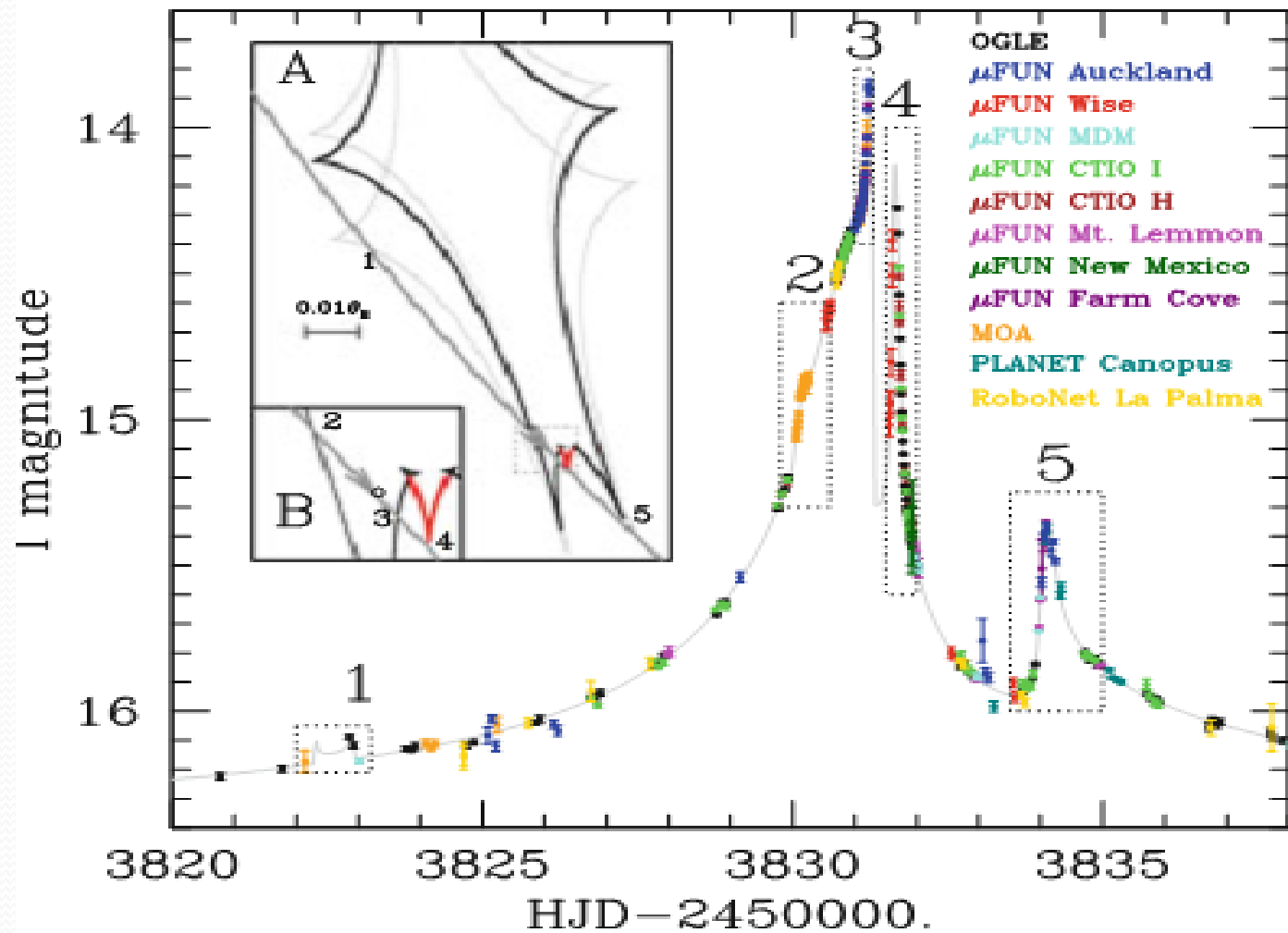




اولین سیاره فراخوشیدی کشف شده به کمک ریزهمگرایی گرانشی در سال 2003



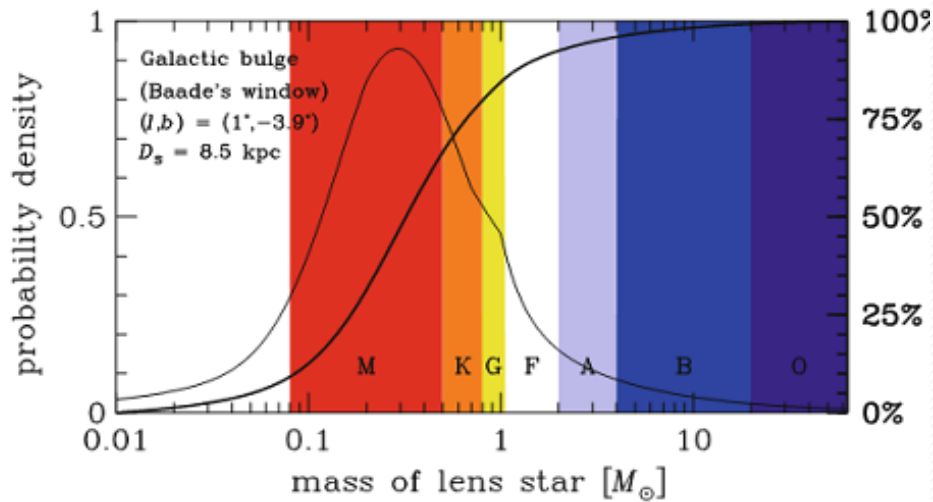
کم جرم ترین سیاره فراخورشیدی کشف شده به کمک ریزهمگرایی گرانشی در سال 2005



رویداد ریزهمگرایی گرانشی مربوط به کشف یک سیستم سیاره ای

❖ چگالی احتمال ریزهمگرایی گرانشی بر حسب جرم عدسی:

❖ بیشترین احتمال رصد برای سیاراتی است که در فاصله یک شعاع انیشتین از ستاره مادر قرار دارند



$$R_E = 2Au \left(\frac{M}{0.3M_\odot} \right)^{1/2}$$

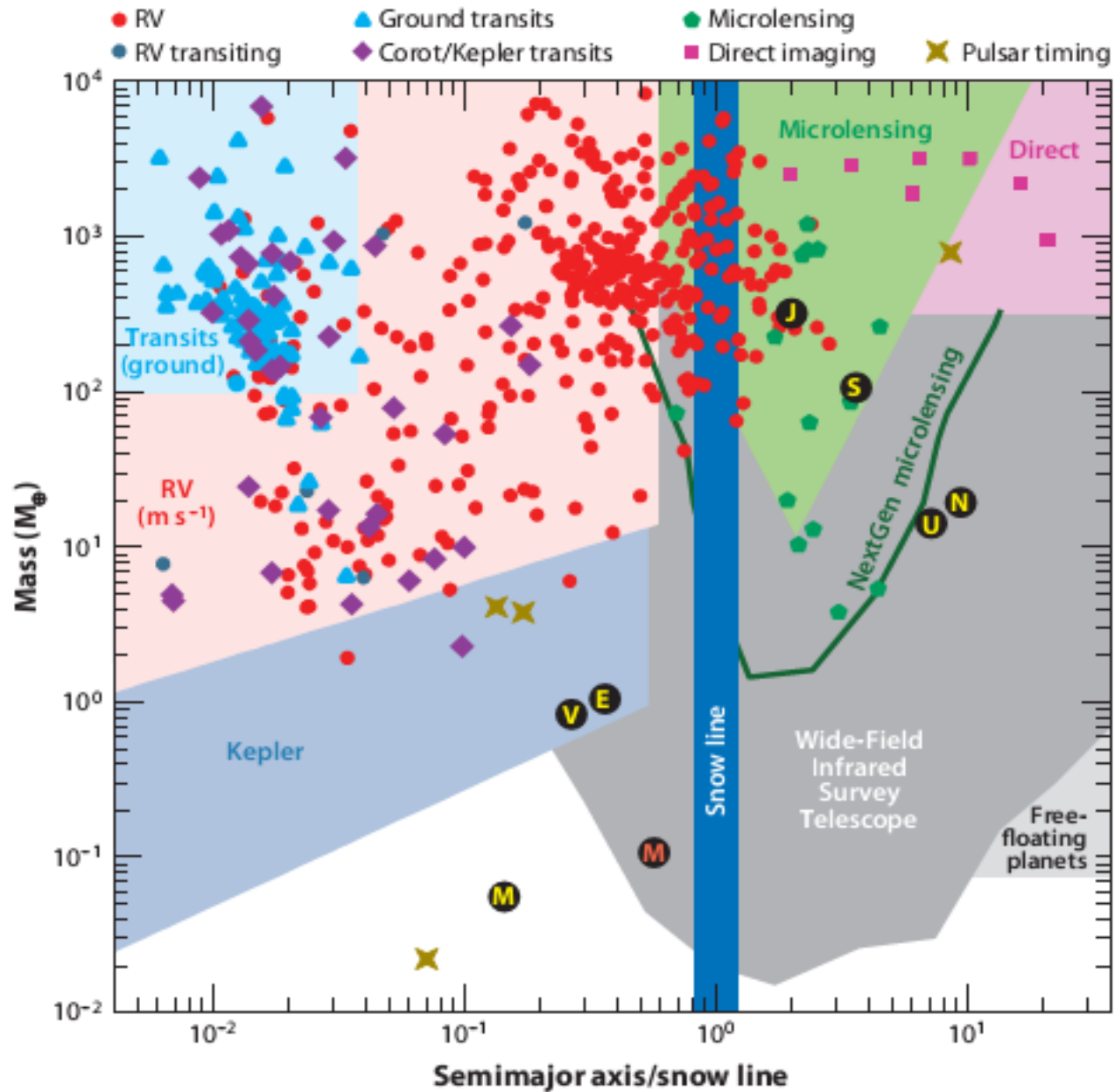
❖ سیارات غول با احتمال بیشتری در این فاصله شکل میگیرند.

$$T_{eq} = 278K \left(\frac{L}{L_\odot} \right)^{1/4} \left(\frac{R_E}{Au} \right)^{-1/2} \sim 117K \frac{M}{0.3M_\odot}$$

❖ فاصله ناحیه زیست پذیر تا ستاره مادر:

$$d_{hz} \simeq 0.25 \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^2$$

❖ بیشینه حساسیت برای سیاراتی که خارج از منطقه زیست پذیر قرار دارند است.



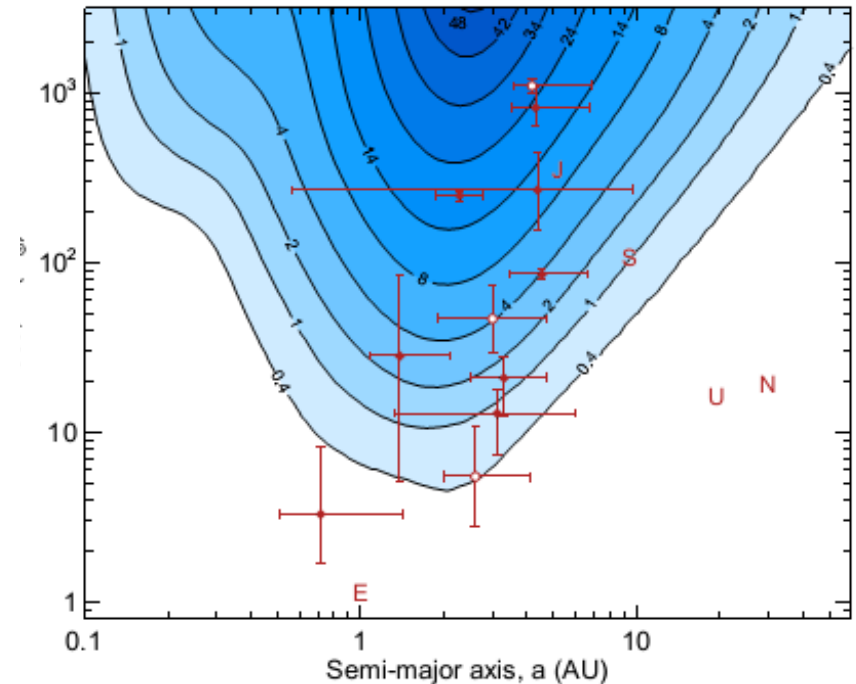
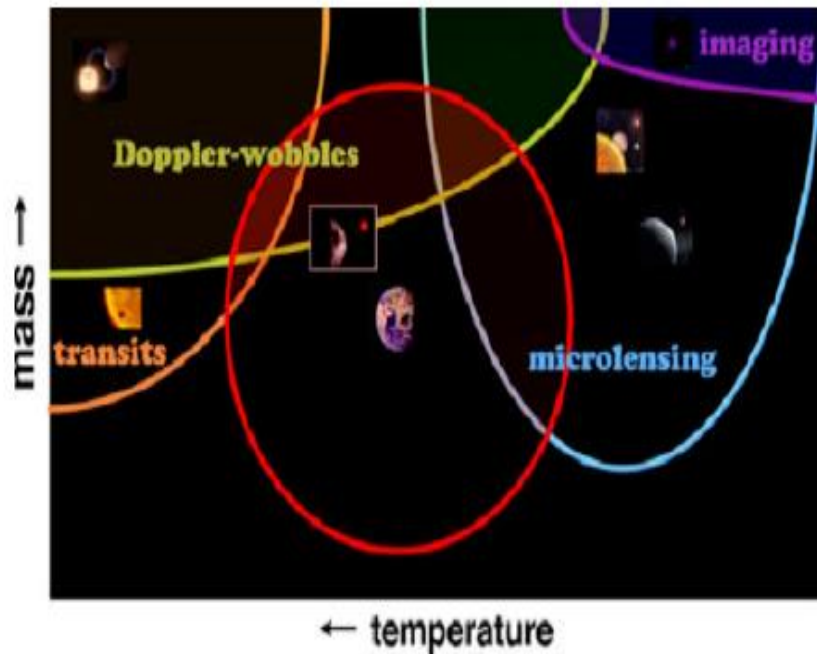
مزایا:

- ❖ آشکارسازی سیارات غیر قابل مشاهده حول ستاره‌هایی که آنها هم دیده نمی‌شوند.
- ❖ فاصله سیاره تا ناظر هیچ محدودیتی ایجاد نمی‌کند.
- ❖ آنچه در آشکارسازی سیارات به این روش مهم است، نسبت جرمها و فاصله بهنجارشده بین آنها
- ❖ سیارات با دوره تناوب بسیار طولانی و یا آنهایی که به ستاره مادر مقید نیستند بلکه تنها مکان تصویر شده آنها درون صفحه عدسی به فاصله یک شعاع انیشتین از عدسی قرار دارد.
- ❖ سیارات کم جرم که حول ستاره‌های کم جرم قرار دارند.

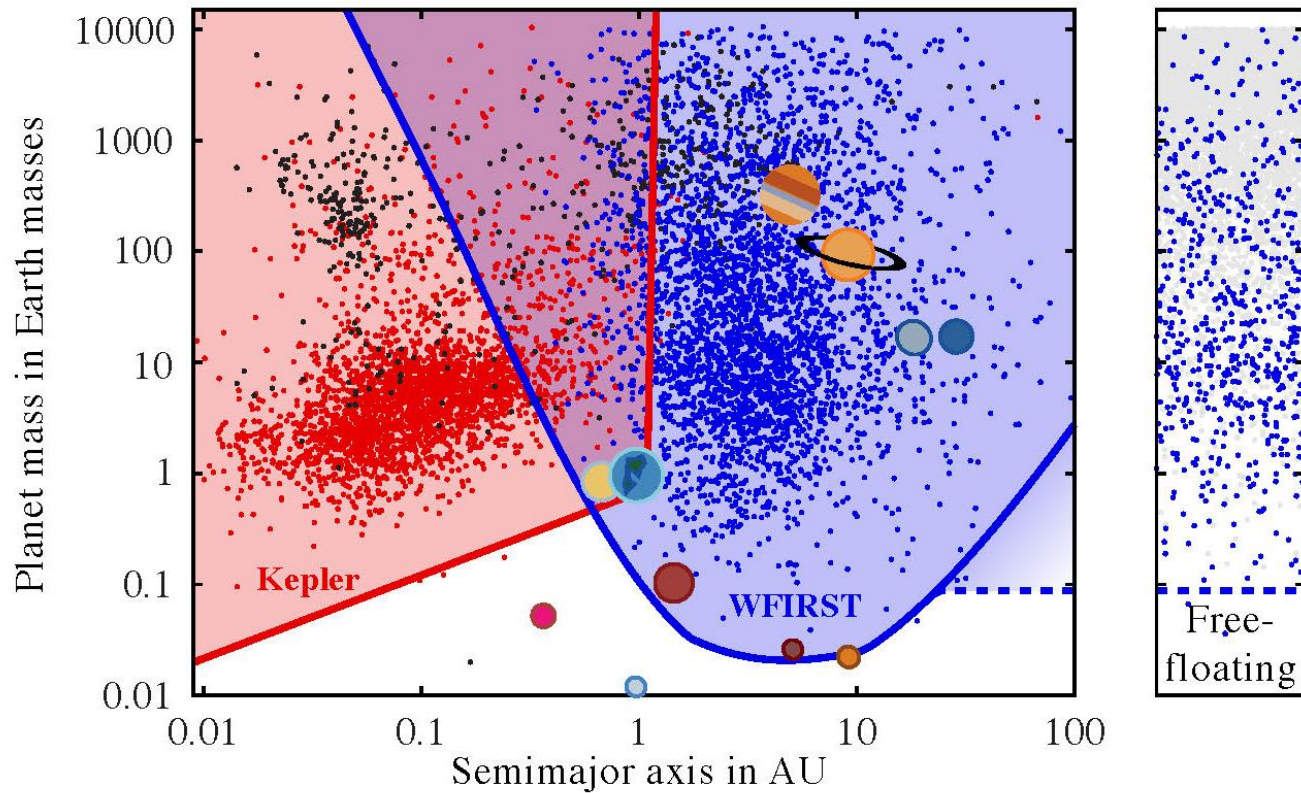
معایب:

- ❖ تکرار ناپذیر
- ❖ تبهگنی بین پارامترها

- ❑ **Survey teams (OGLE, MOA, KMTNet):** monitoring large FoV with long cadences
- ❑ **Follow-up teams (PLANET, RoboNet, MindSteps, μ FUN) :** short-cadence monitoring of ongoing planetary microlensing events
- ❖ Discovering unbound or very far from their host stars
- ❖ 17%, 52% and 62% of stars host Jupiter-mass, cool Neptune and super-Earth planets respectively.



- **Complete the statistical census of exo-planets**
- WFIRST (Wide-Field Infrared Survey Telescope): Lunch 2020, $[0.7:2]\mu\text{m}$, cadence=15 min, 62 days monitoring,
- Low extinction, high photometric precision, flux of the lens



Gaudi, et la. In prep.

با سپاس از توجه شما