

Экзопланеты: Двойные системы и эволюция после ГП

СЕРГЕЙ ПОПОВ

Каталог планет в двойных

CATALOGUE OF EXOPLANETS IN BINARY STAR SYSTEMS

Exoplanets in binary star systems

Number of planets: 122

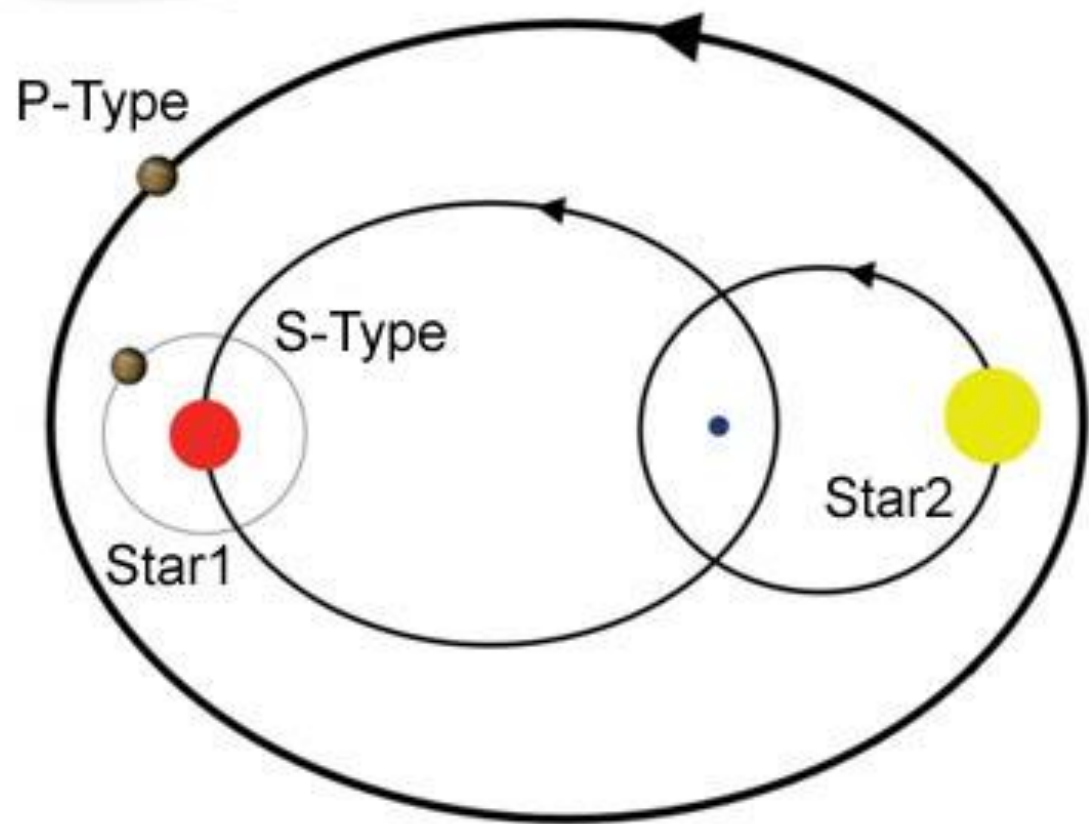
Number of systems: 87

Exoplanets in multiple star systems

Number of planets: 34

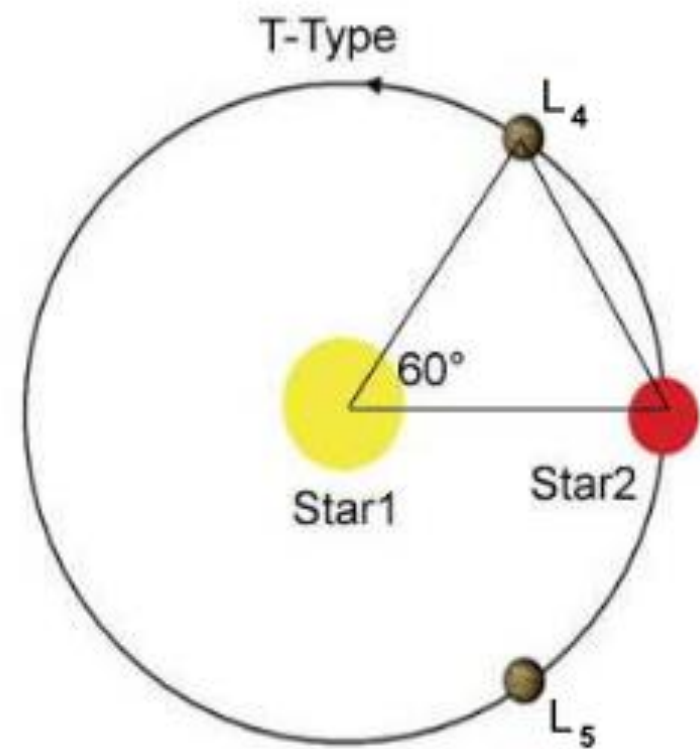
Number of systems: 24

S-тип и P-тип. А еще T-тип!



Звезды существенно возмущают орбиты, поэтому в S-типе устойчива область $\sim 1/5$ от орбиты двойной, а в P-типа – область вне $\sim (2-5)$ орбиты.

В дополнение к S- и P-типам выделяют еще T-тип планет, орбиты которых подобны орбитам троянцев.



Устойчивость орбиты

$$R_p = \left(0.464 - 0.38 \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) a_*$$

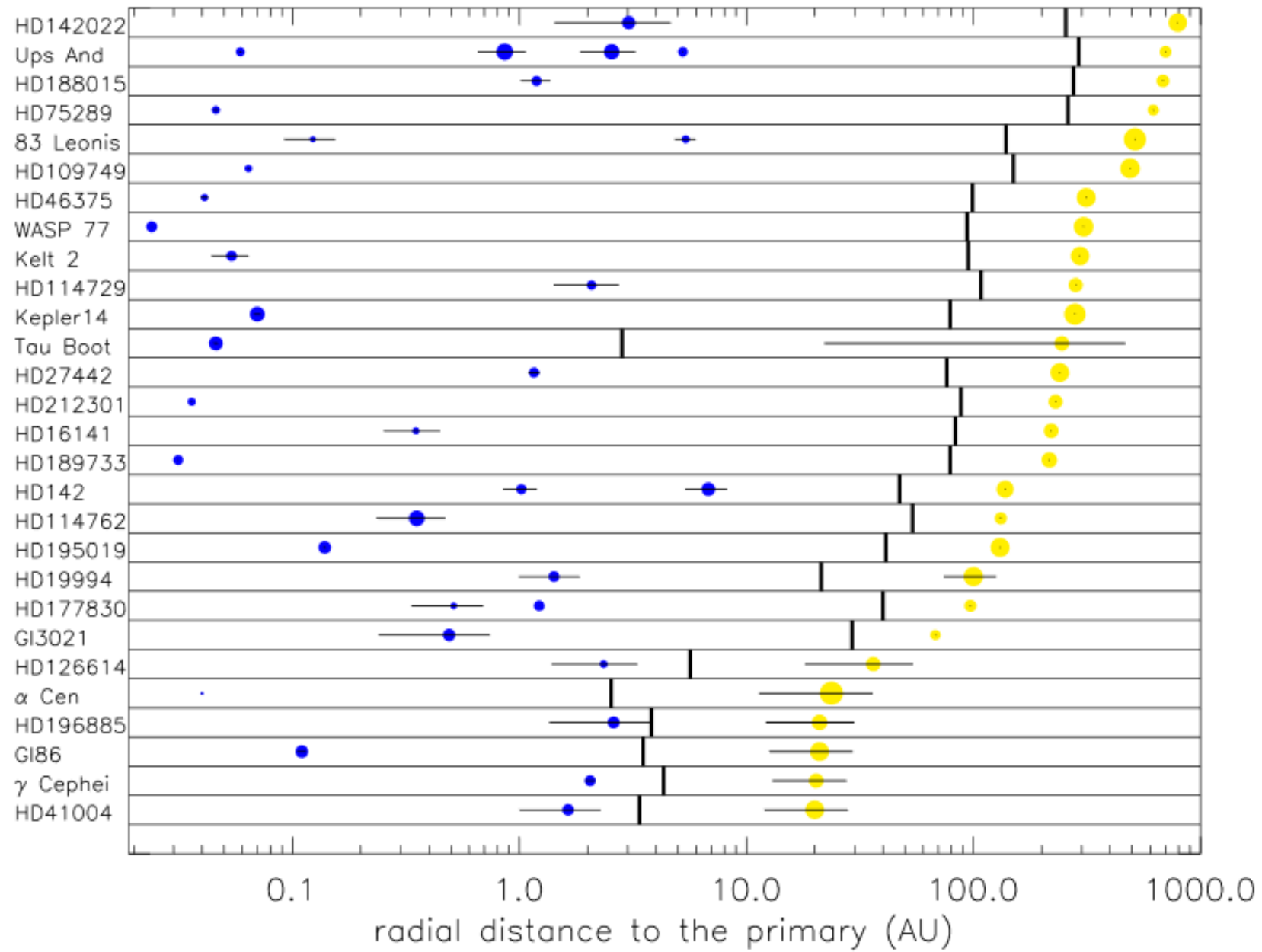
S-type

$$a_c = (1.60 + 4.12\mu - 5.09\mu^2) a_b$$

P-type

$$\mu = m_2 / (m_1 + m_2)$$

Оба выражение приведены для $e=0$.

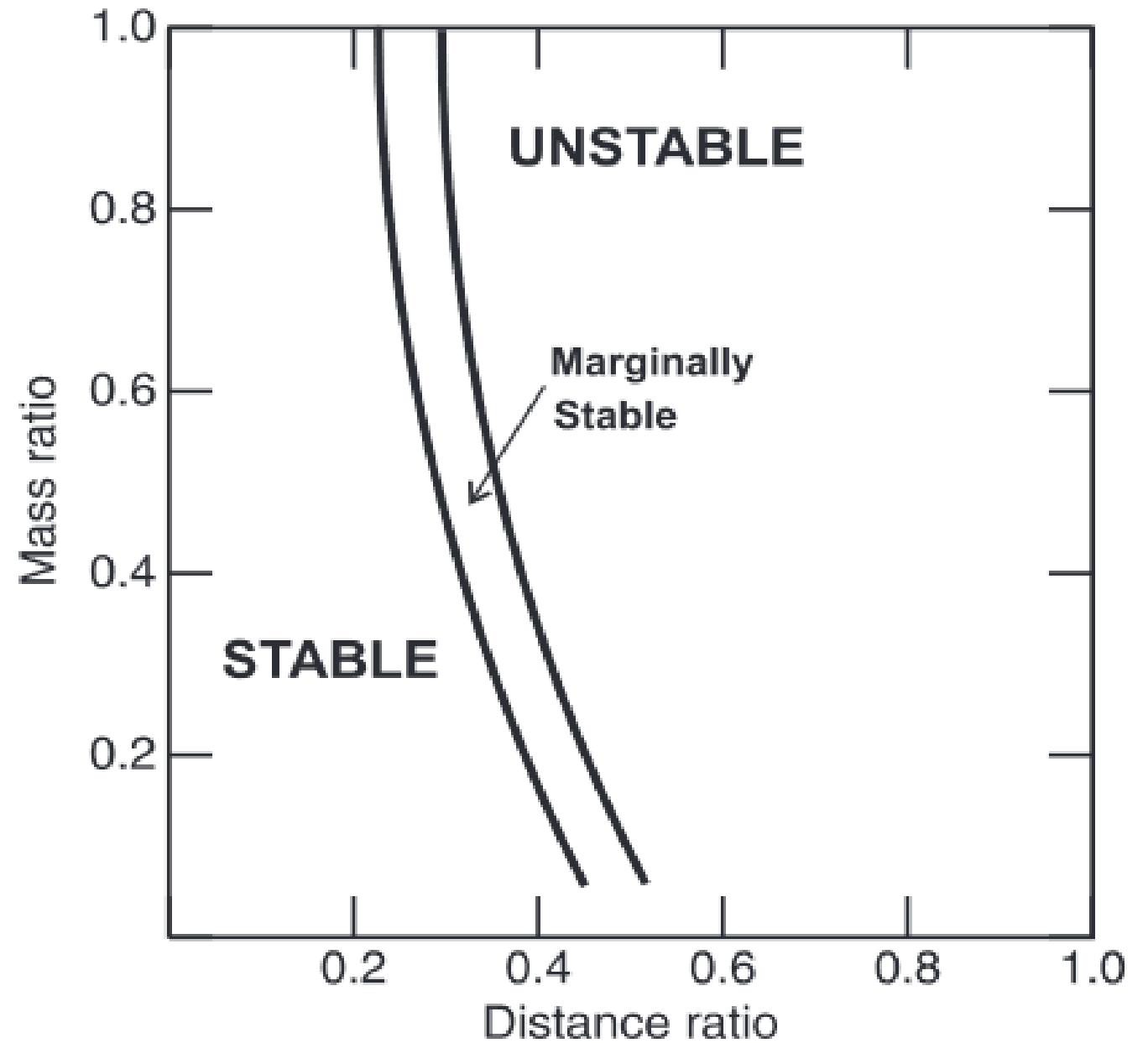


$$R_p = \left(0.464 - 0.38 \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) a_*$$

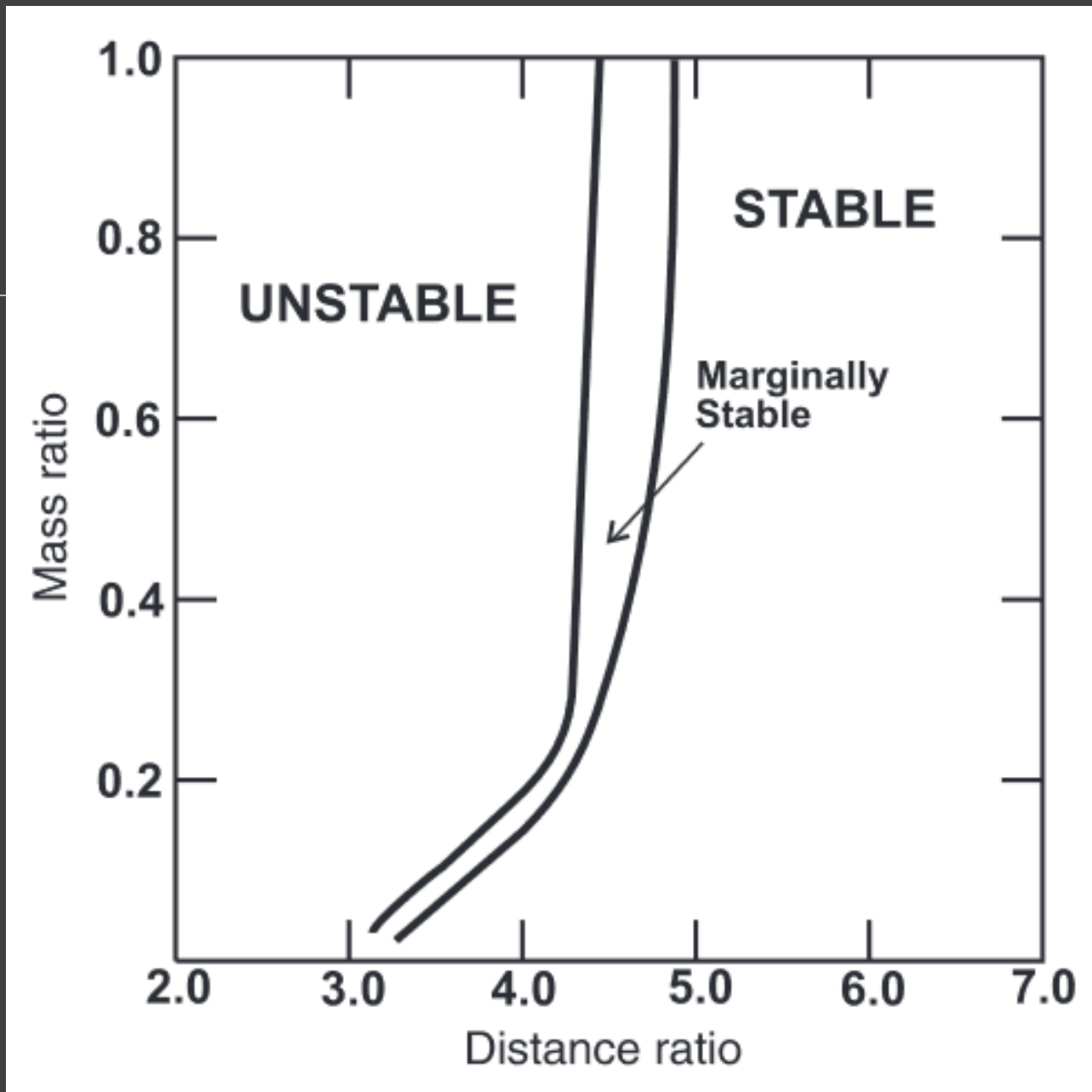
S-type

Distance ratio: $R_{\text{planet-A}}/R_{\text{AB}}$

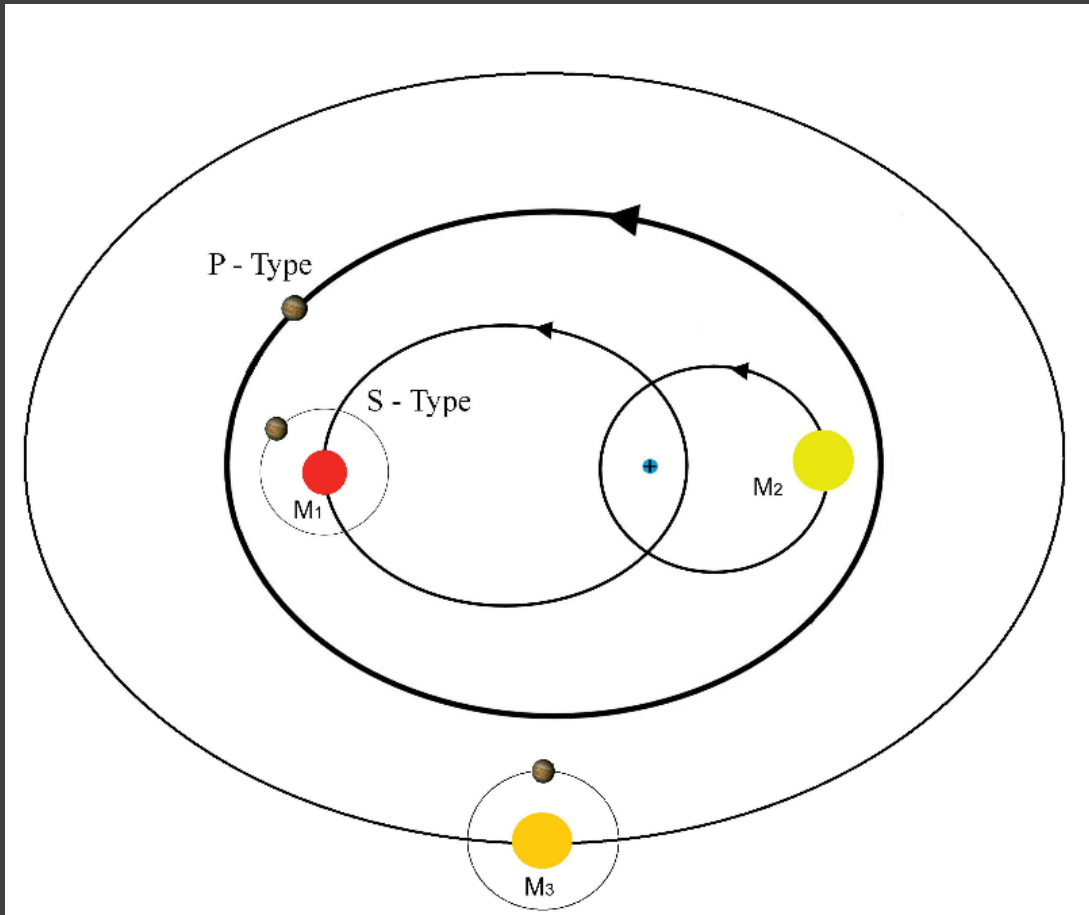
Mass ratio: $M_{\text{B}}/M_{\text{A}}$



P-type

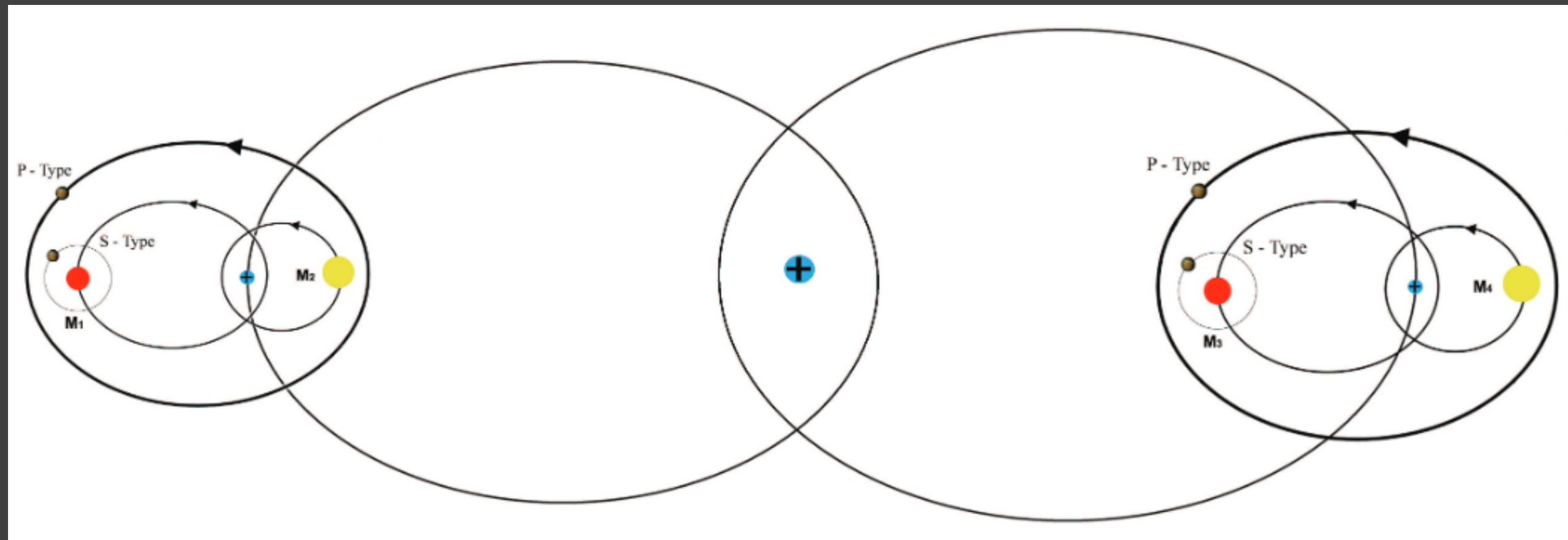


Планеты в тройных системах

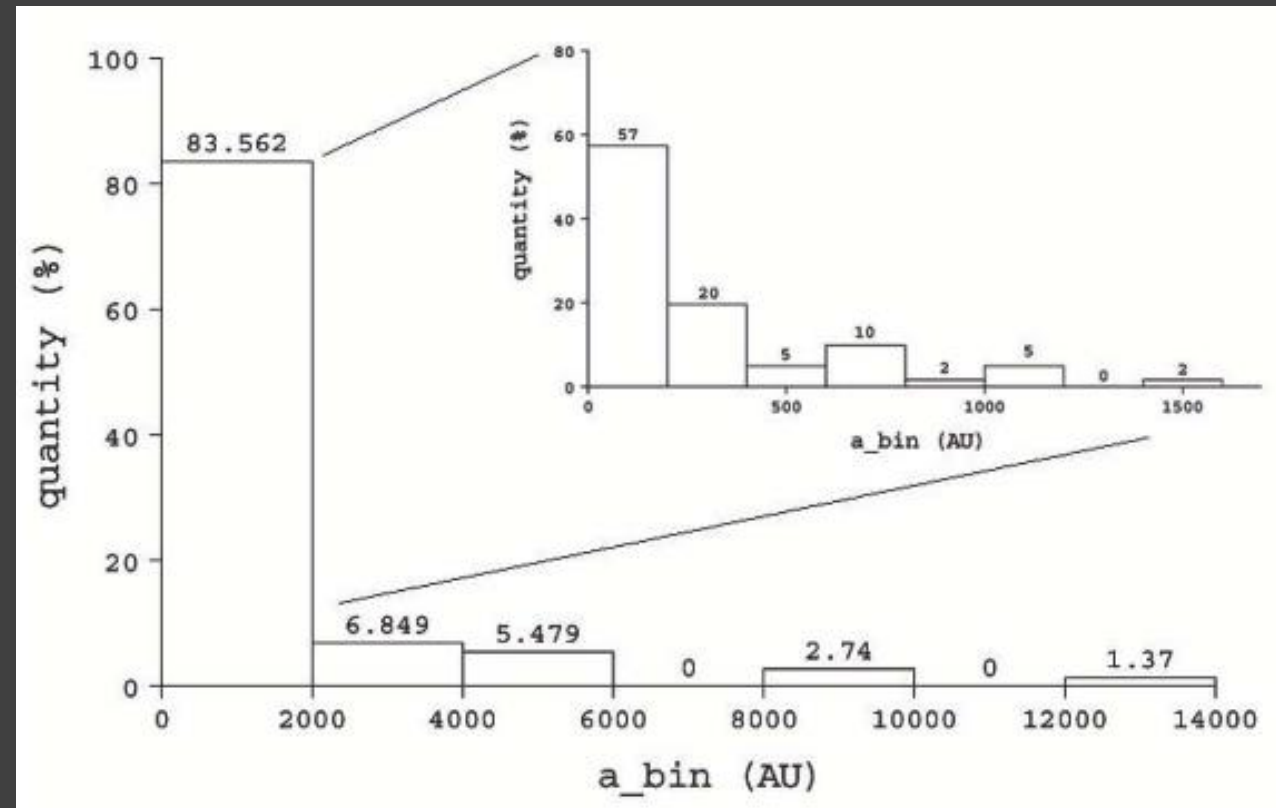
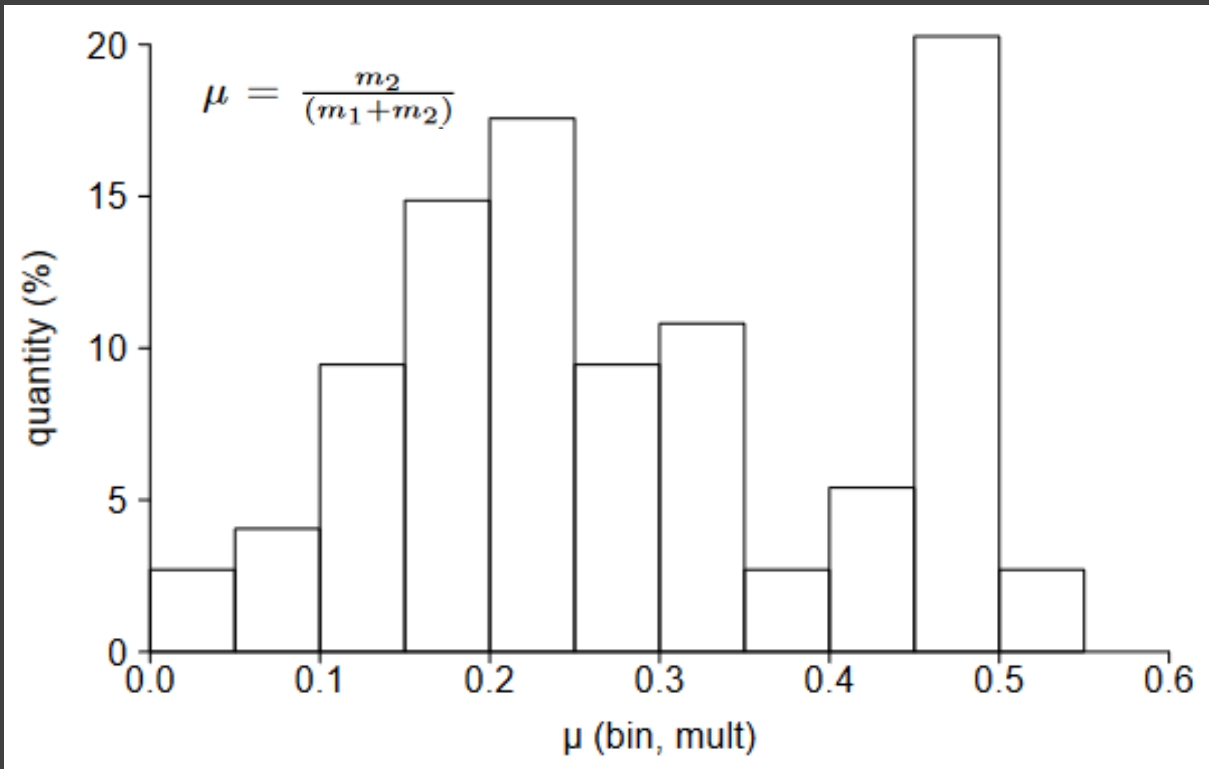


Устойчивые орбиты для планет типов S, P и T возможны в звездных системах разной кратности.

И в системах большей кратности



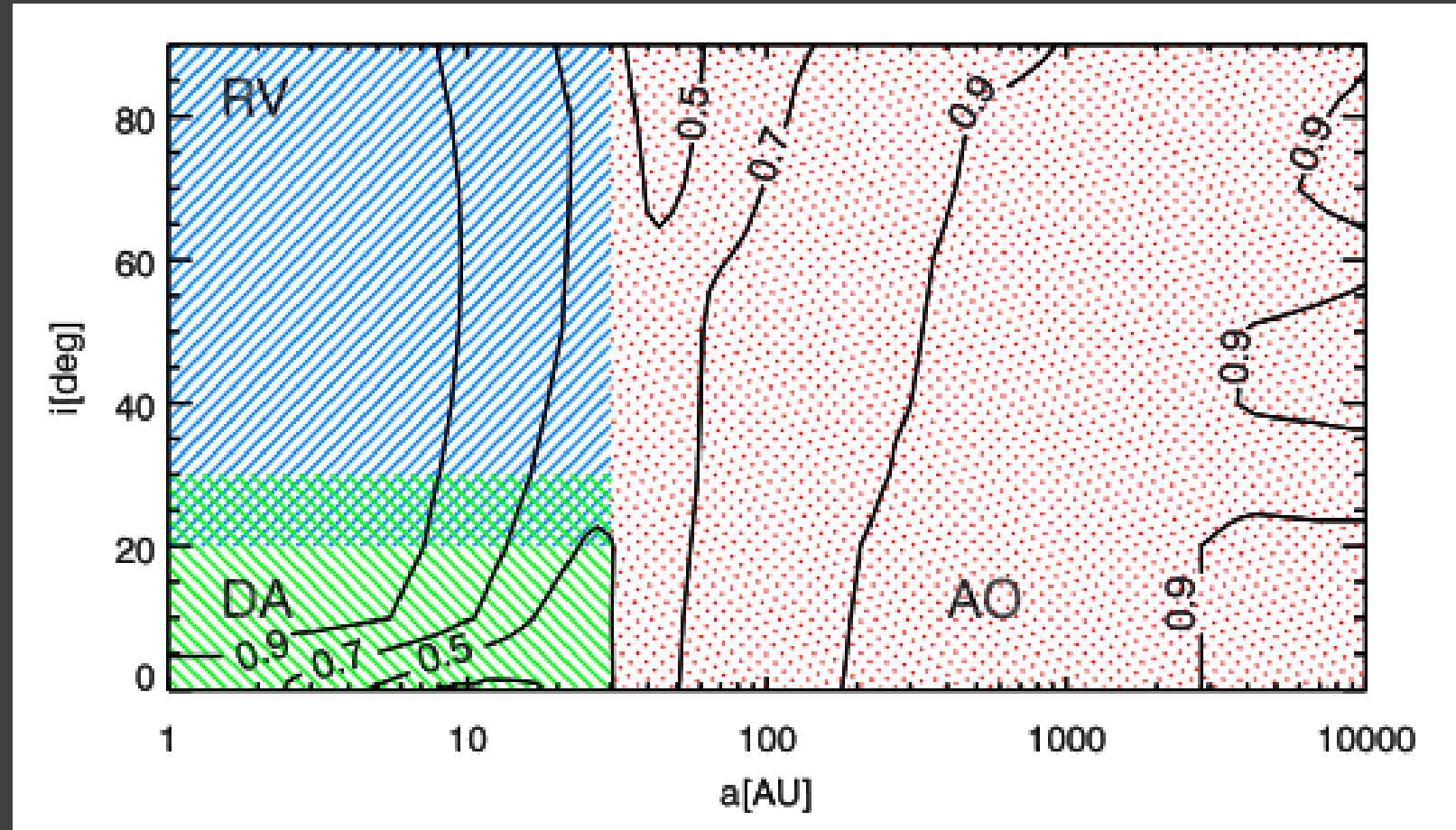
Статистика



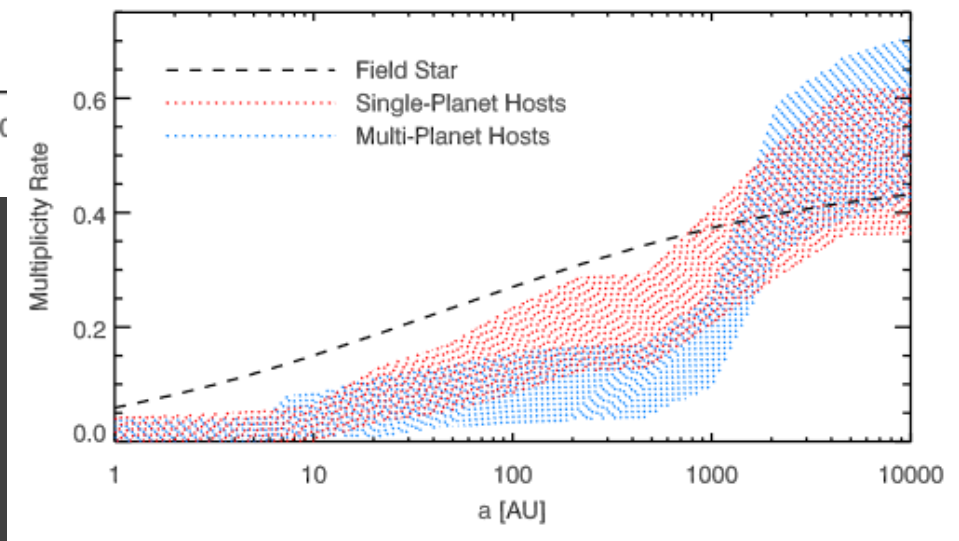
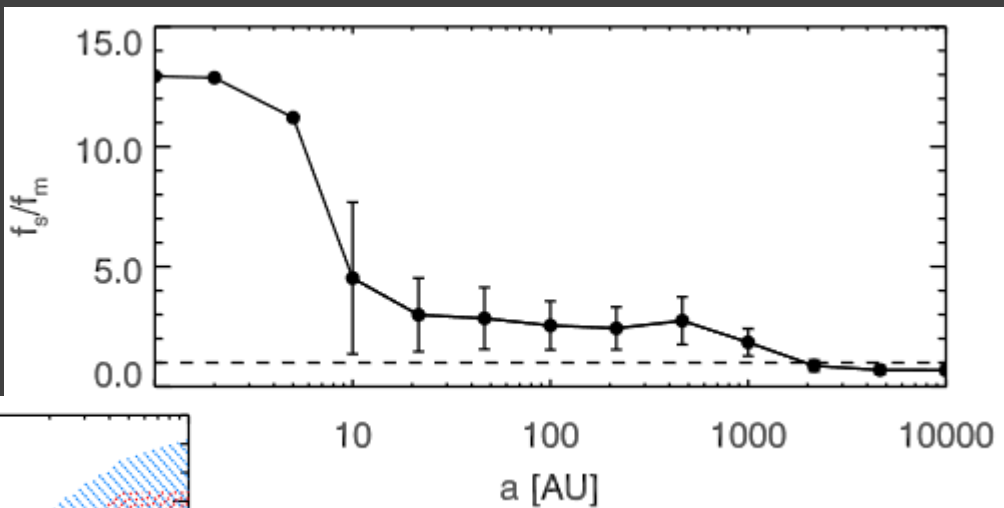
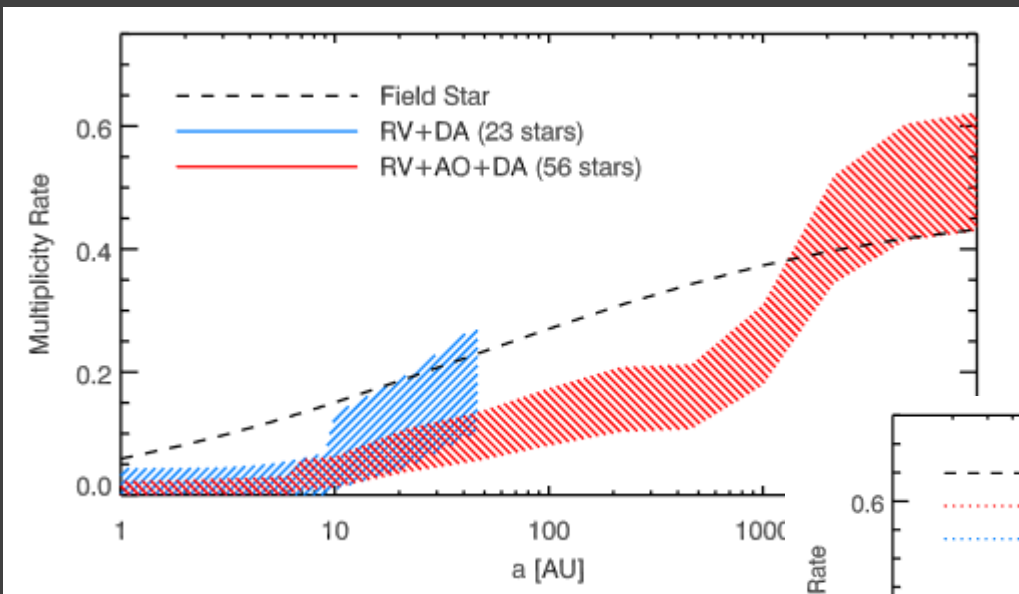
Поиск вторых звезд у звезд с планетами

Три метода:

- RV – рад. скорости
- AO – адап. оптика
- DA – дин. анализ



Статистика планет в тесных двойных

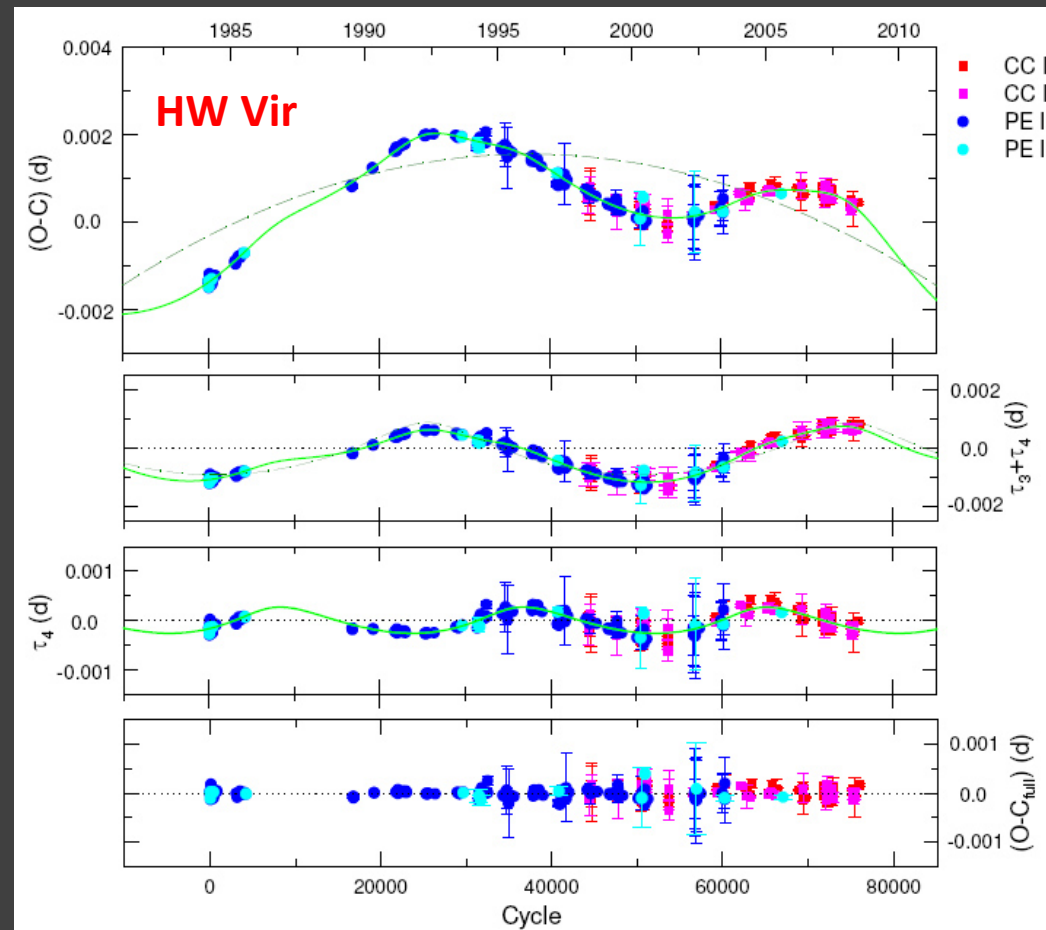


ETV: Eclipse timing variations

Вариации времени затмений в двойных системах

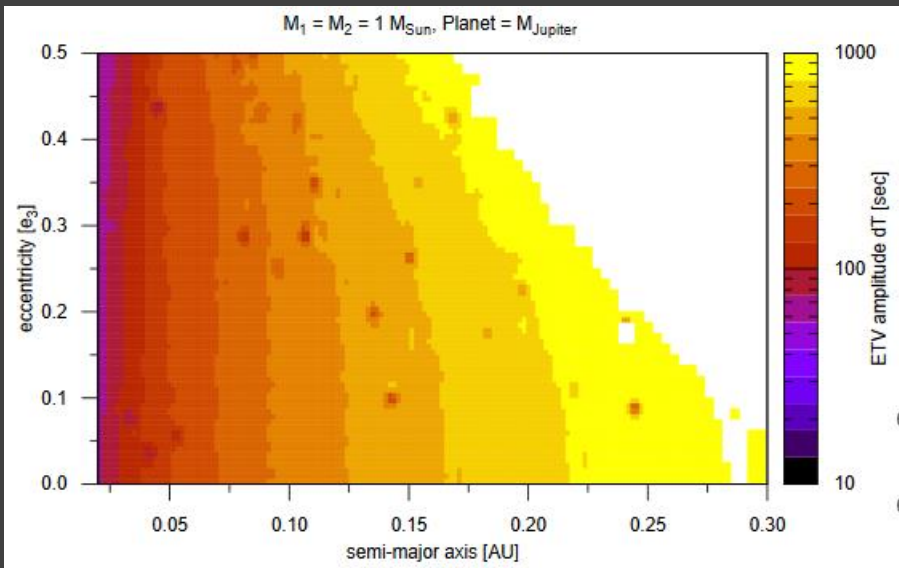
CoRoT: 4 сек – для ярких звезд (12 mag),
и 16 сек – для слабых (15.2 mag).

Kepler: 0.5 сек – для ярких звезд (9 mag),
и 4 сек – для слабых звезд (14.5 mag).

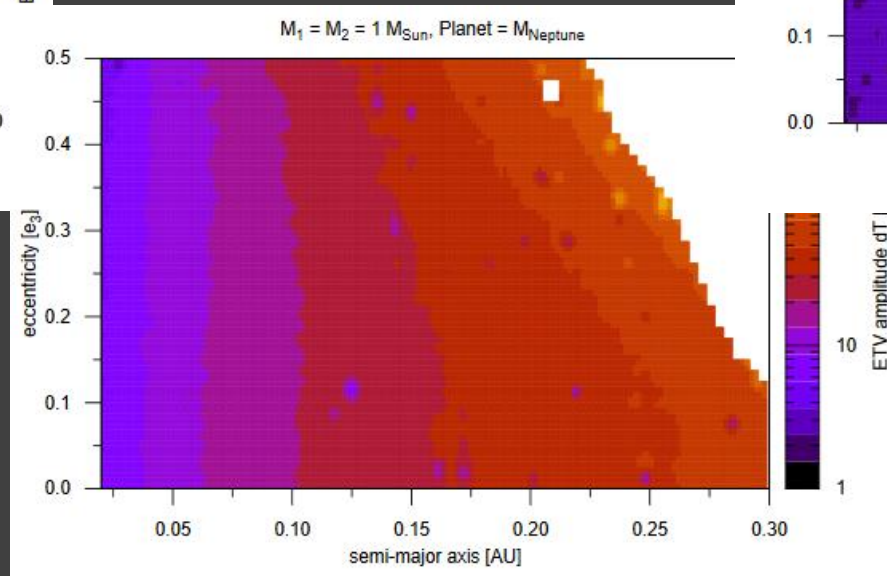
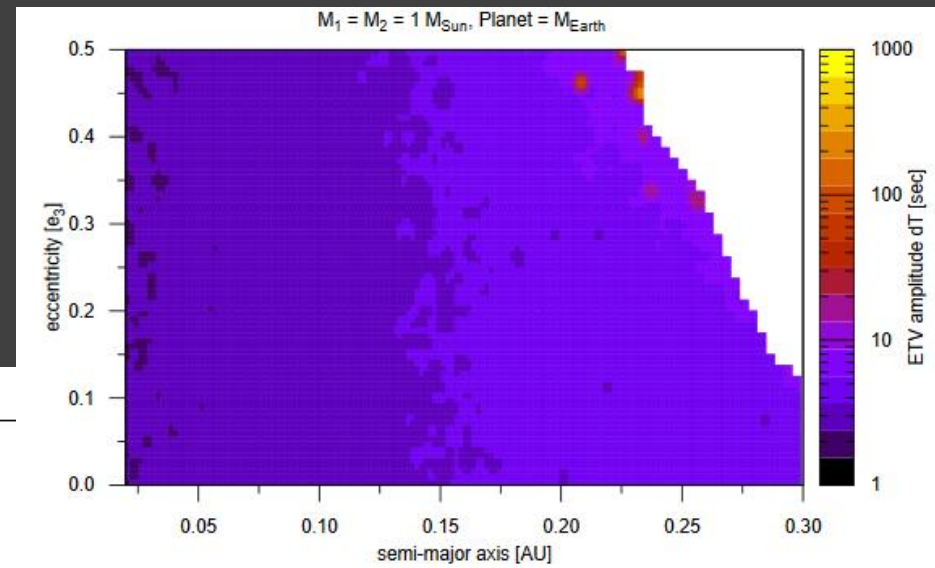


<http://astronomy.science.upjs.sk/projectdwarf/scientific-background/>

Моделирование ETV. Системы S-типа



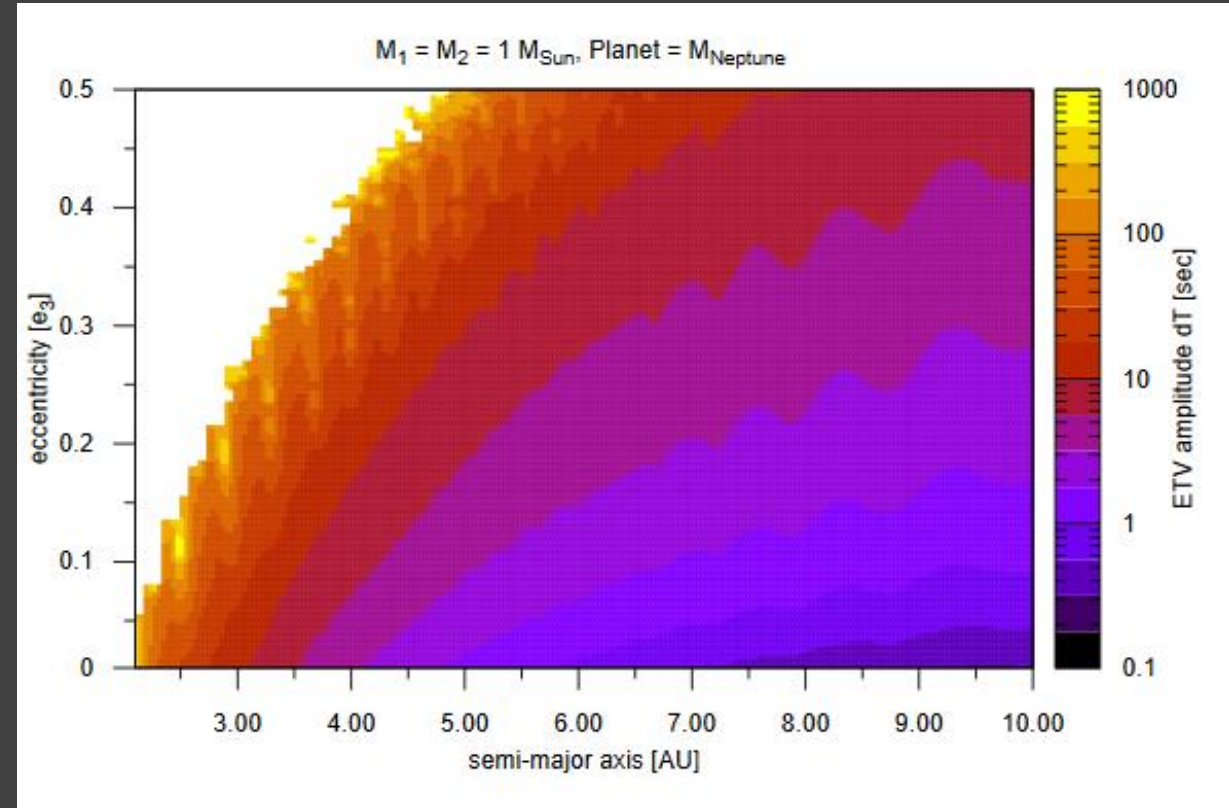
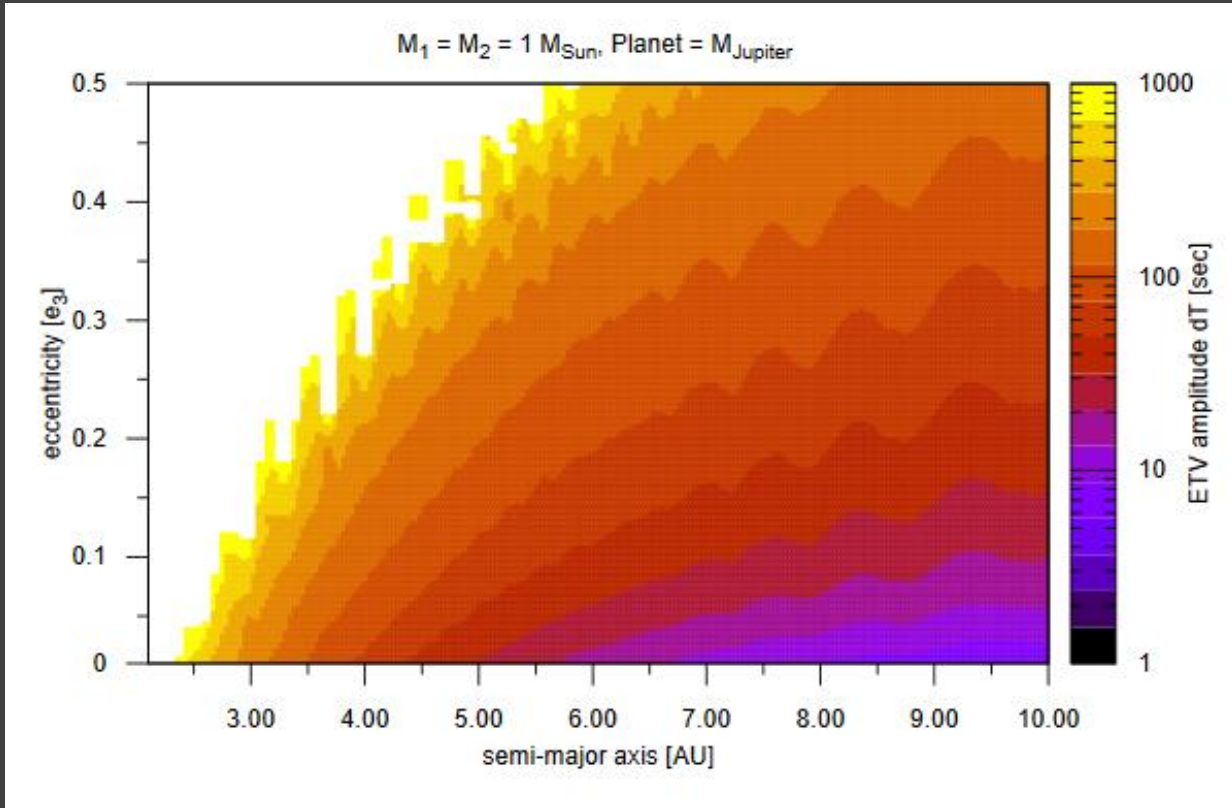
$a_{\text{bin}} = 1 \text{ а.е.}$
 $i = 0$ (орбита находится
в плоскости двойной)



Планеты земного типа
зарегистрировать не получается

Юпитеры регистрируются в 100% случаев

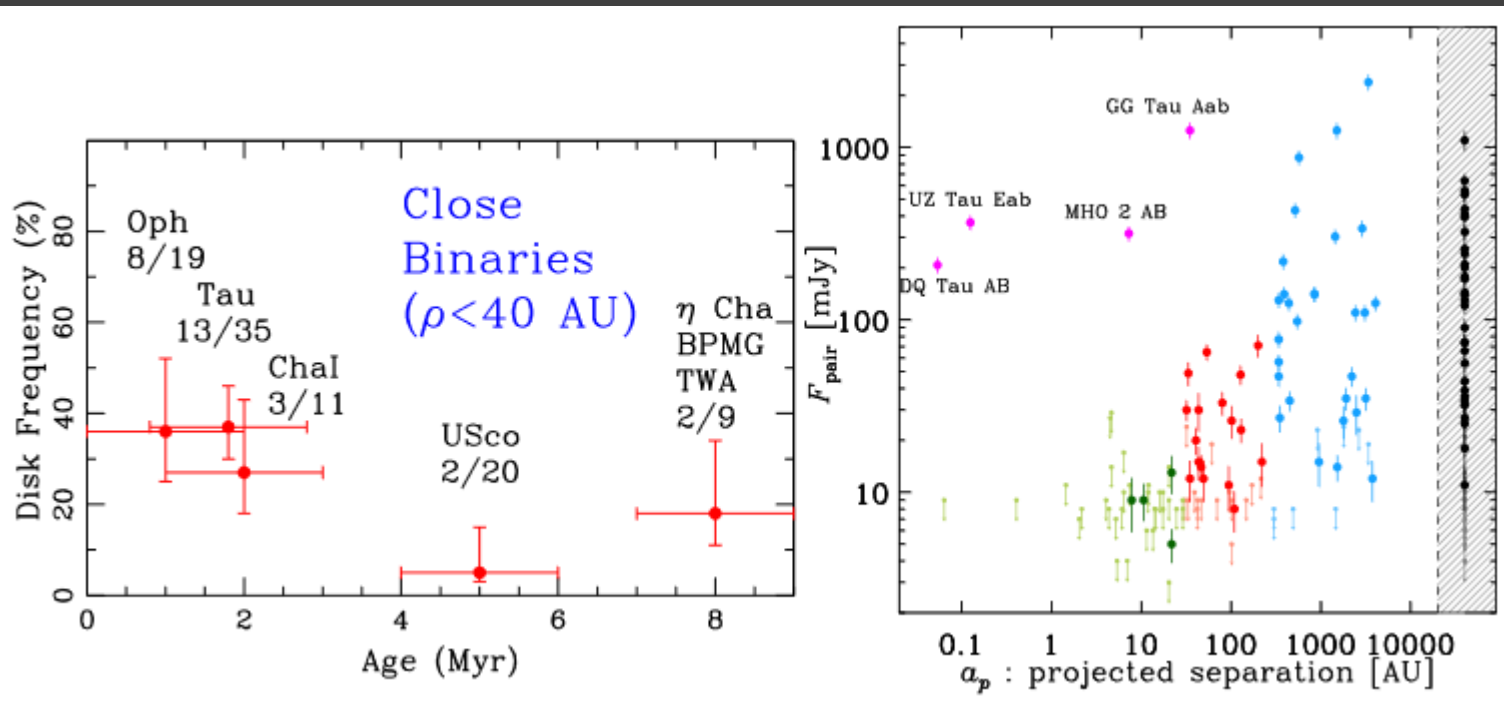
Моделирование ETV. Системы Р-типа



$$a_{\text{bin}} = 1 \text{ a.e.}; e_{\text{bin}} = 0$$

Протопланетные диски в двойных. S-тип

Диски в двойных обычно обрезаются (на 1/3 - 1/4 размера орбиты).



Возмущения в диске также влияют на рост планет.

Частота встречаемости дисков у широких двойных примерно такова, как и у одиночных. А для тесным систем – меньше.

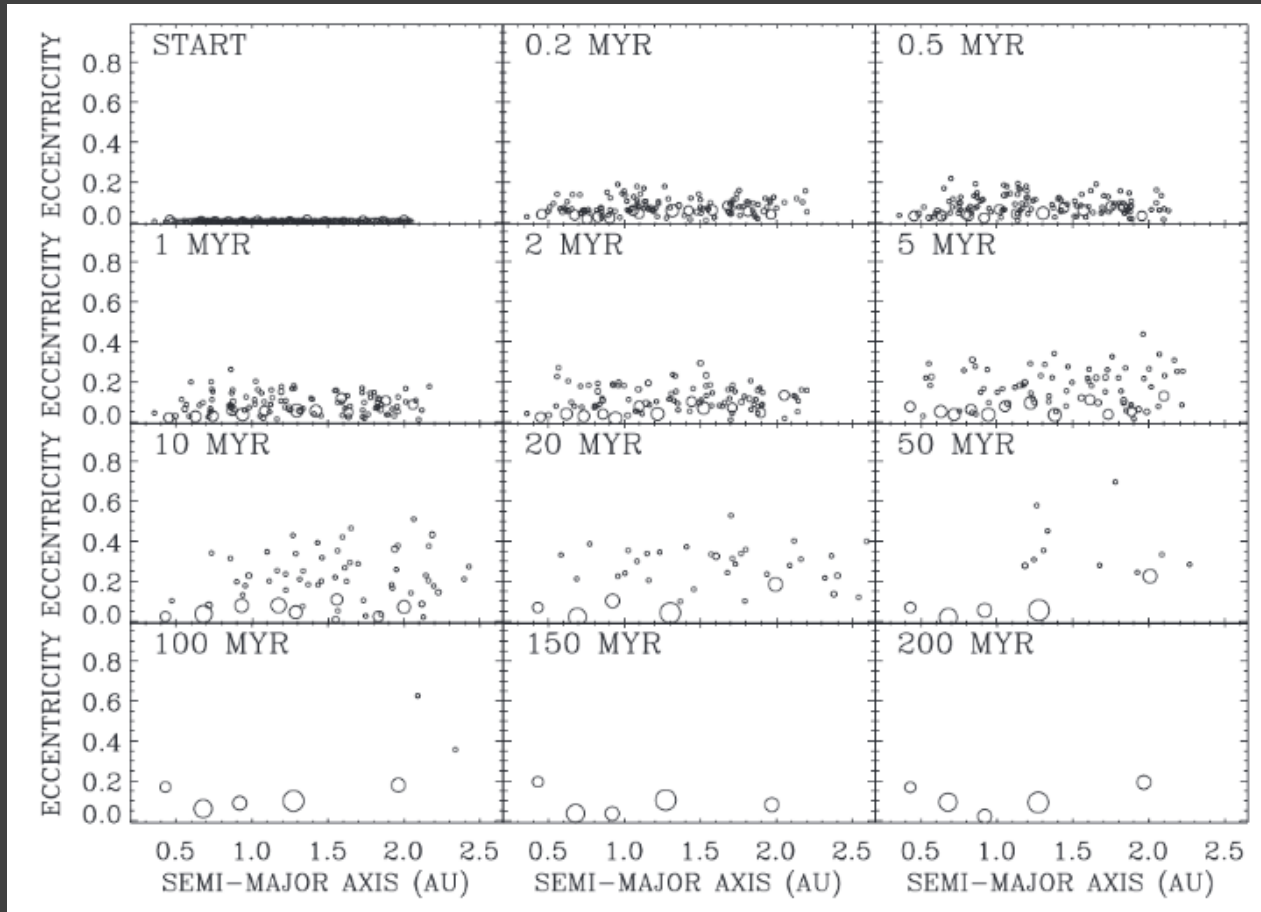
Масса пыли меньше в тесных двойных.

Обрезанные диски с малой массой пыли – плохое место для образования планет, особенно массивных.

Диски в тесных двойных живут меньше: в 2/3 случаев ~ 1 млн. лет.

Кроме того, в них выше температуры, что плохо для роста пыли.

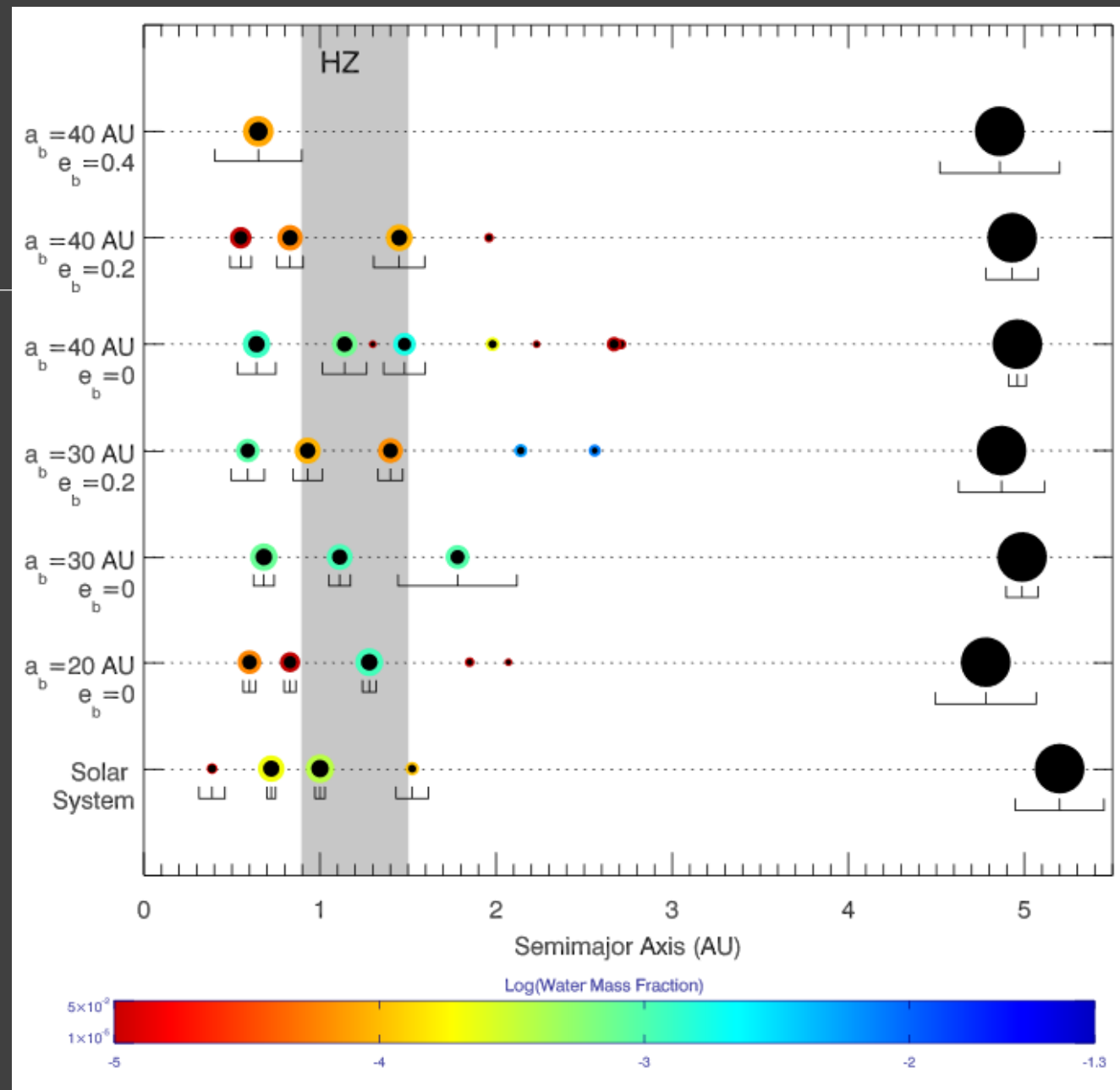
Двойная типа Альфа Центавра



В тесной двойной
формирование планет
(система S-типа)
возможно только
на небольших расстояниях
от звезды

Доставка воды

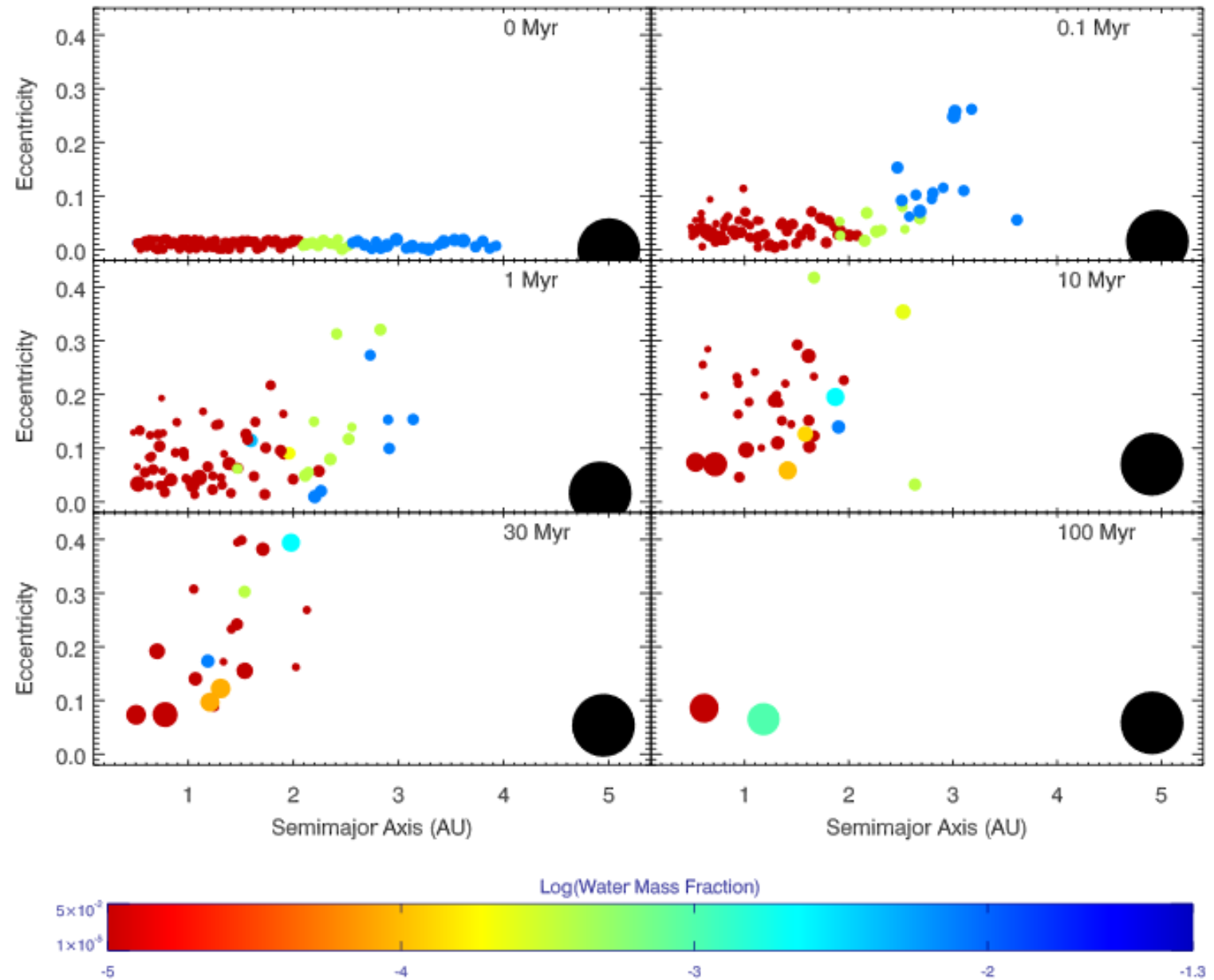
Тем не менее, земледобные планеты могут быть образованы в зоне обитаемости в двойной системе.



Типа Земли

Последовательность формирования планет земного типа в зоне обитаемости в двойной системе (S-тип).

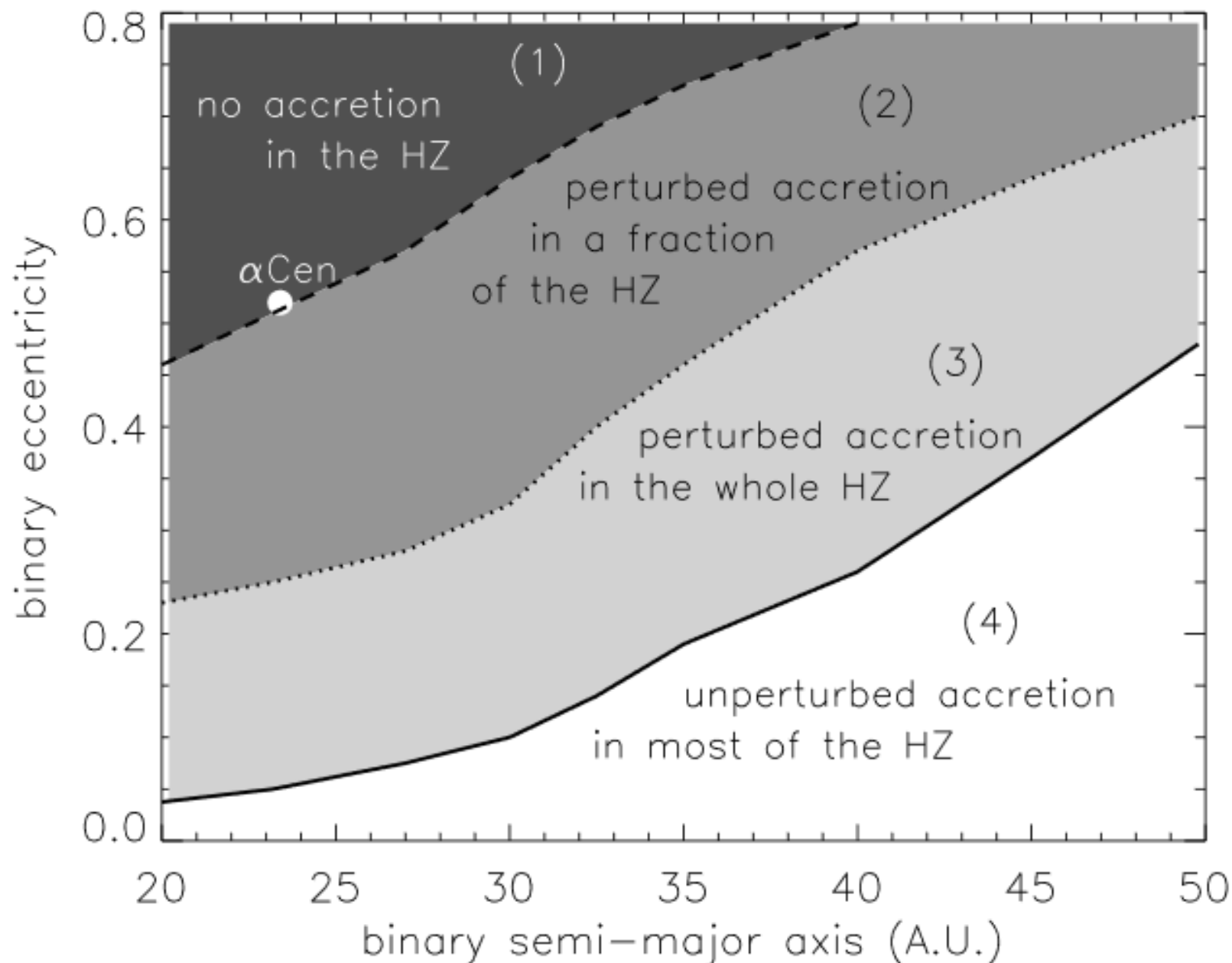
В этом моделировании было принято, что начальные этапы формирования планет были успешно пройдены.



Аккреция

Аккреция вещества на формирующиеся планеты в двойной системе происходит под действием динамического влияния второго компонента двойной.

Высокие скорости столкновения частиц приводят не к росту, а к разрушению.



Другие идеи для систем S-типа

Обсуждается несколько дополнительных идей по формированию планет в двойных (S-тип):

- Миграция планет
- Изменение параметров двойной
- Гравитационная неустойчивость в диске
 1. Планеты могли формироваться на других орбитах, а затем мигрировали наружу. Однако трудно обеспечить значительный эффект.
 2. Возможно, что двойные были ранее шире, а затем их орбиты сжимались, например, под действием звезд скопления.
 3. Гравитационная неустойчивость в протопланетном диске может помочь сформировать планеты на больших расстояниях, избегая проблем с аккрецией, ростом пыли и т.п.

Устойчивость орбит

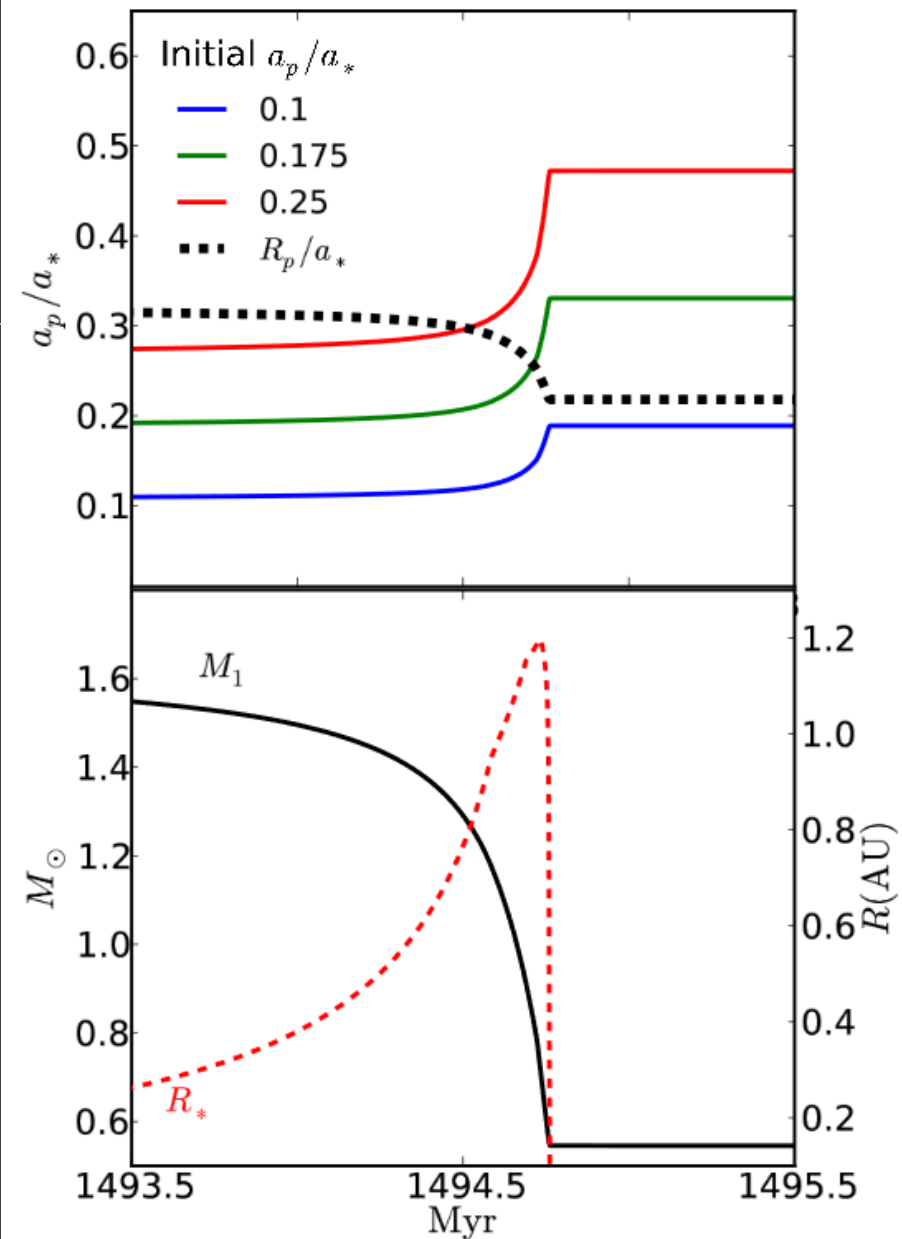
$$R_p = \left(0.464 - 0.38 \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) a_*$$

Для медленной потери массы орбита изменяется согласно:

$$a_f = \frac{M_i}{M_f} a_i,$$

Если мы считаем массу планеты много меньше масс звезд:

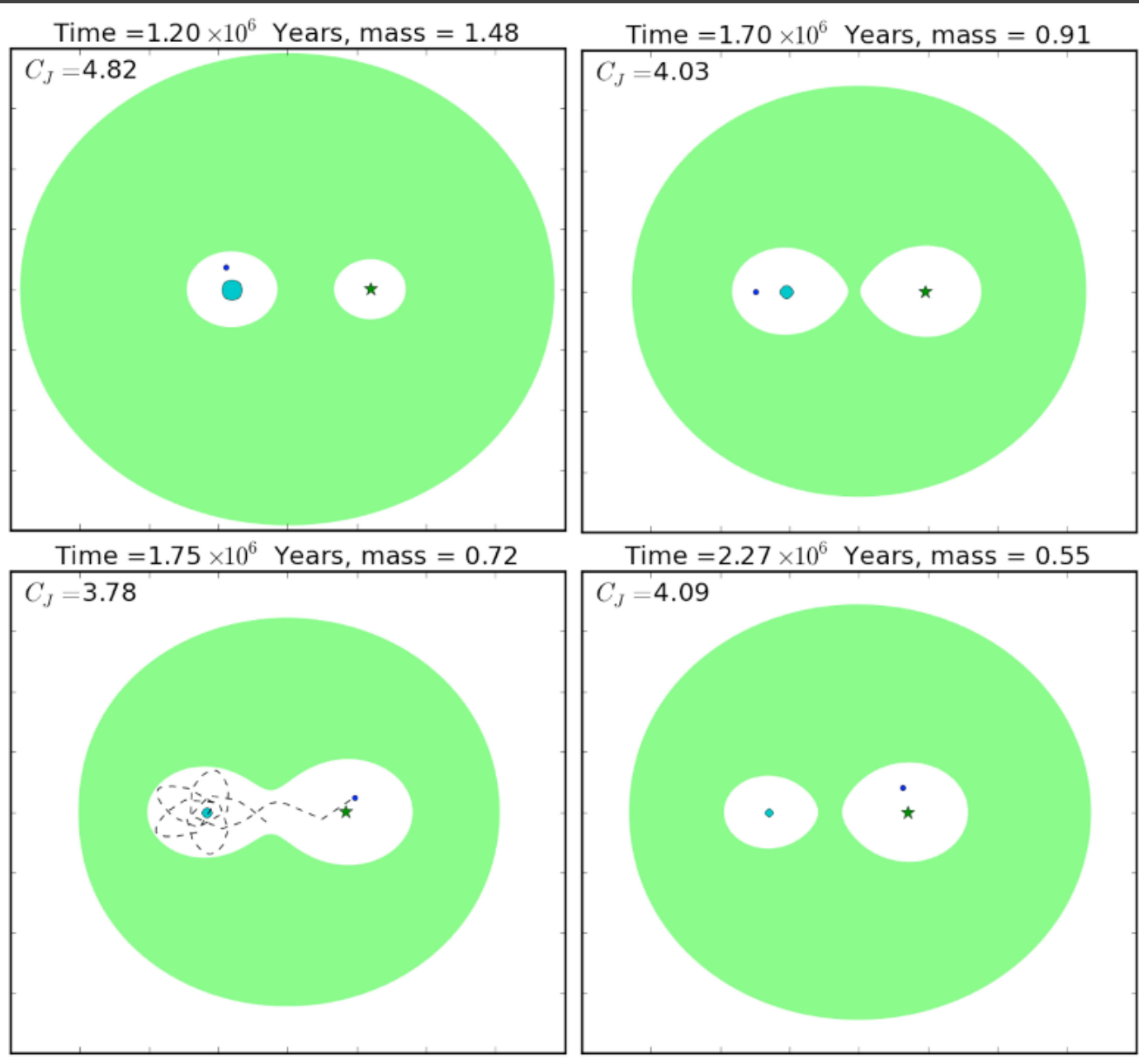
$$\left(\frac{a_{p,f}}{a_{*,f}} \right) / \left(\frac{a_{p,i}}{a_{*,i}} \right) = \left(\frac{m_{1,i}}{m_{1,f}} \right) \left(\frac{m_{1,f} + m_2}{m_{1,i} + m_2} \right)$$

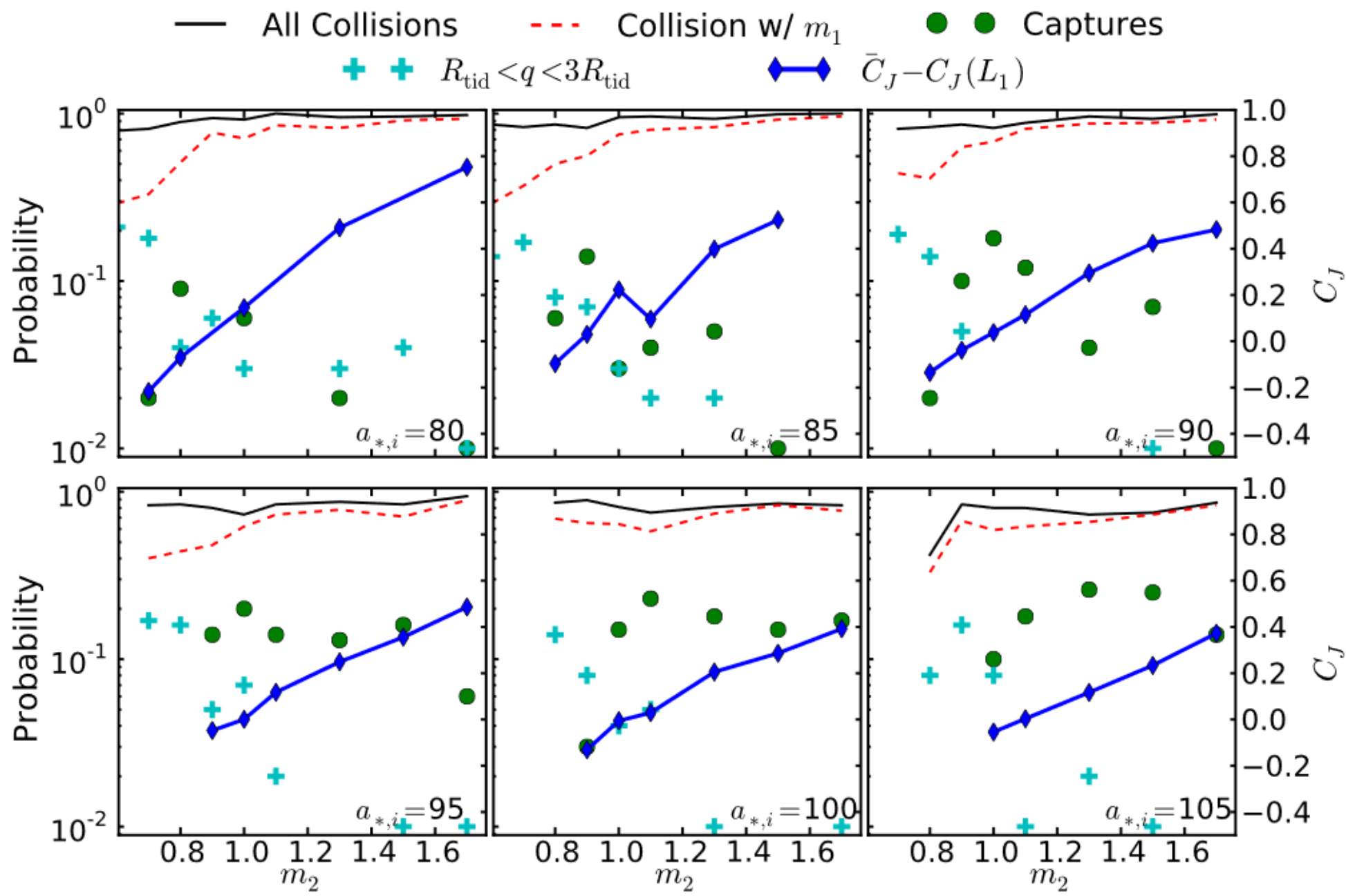


Звезды-прыгуны

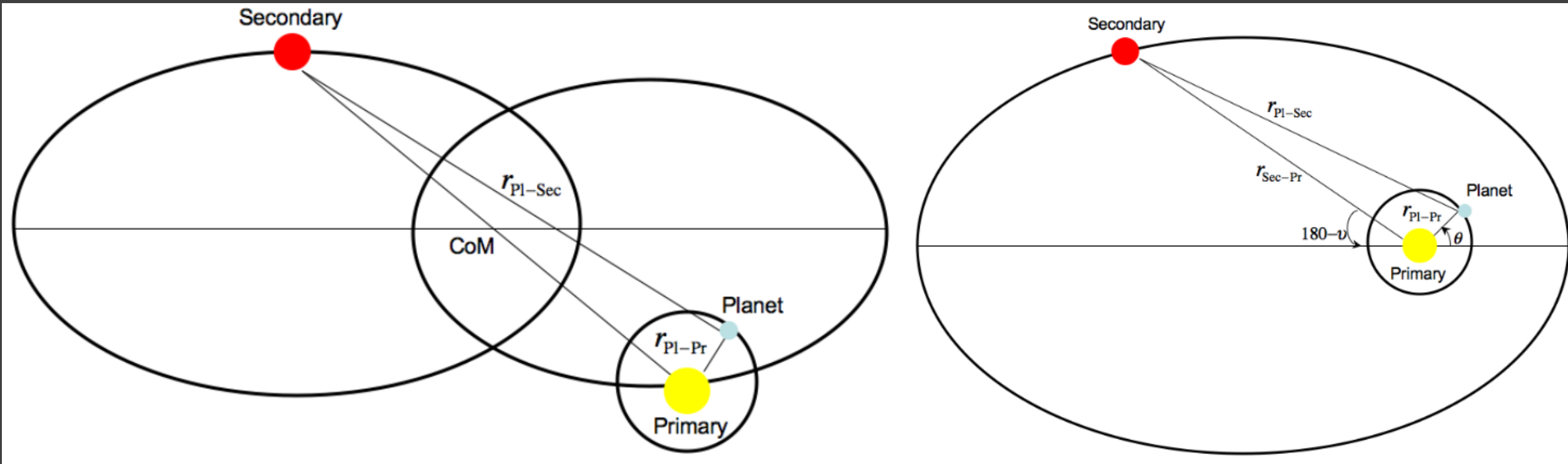
В двойной системе, если звезда с планетами теряет массу, то планета может перескочить к другой звезде.

Это важно для появления некоторых экзотических типов систем.

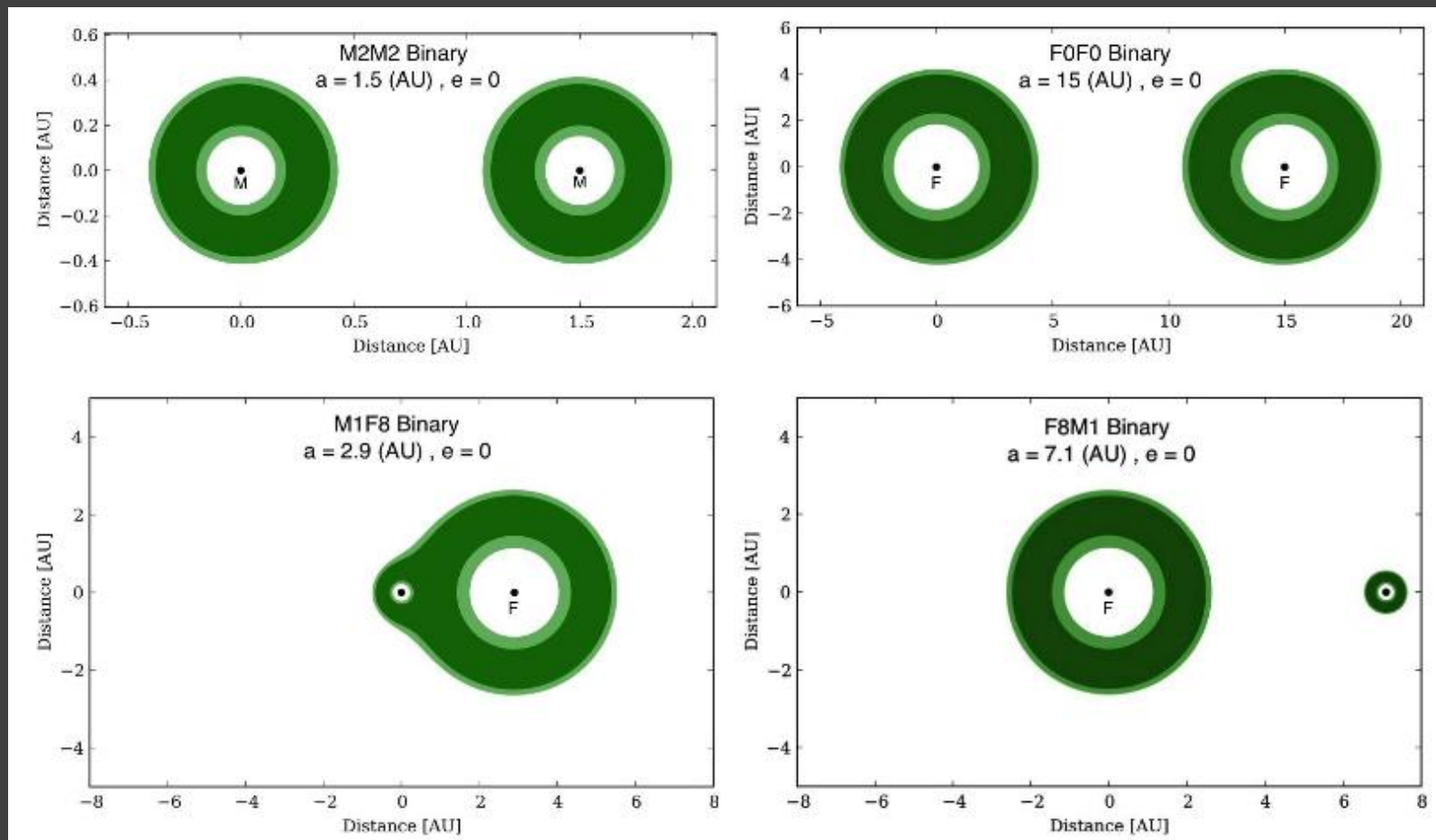




Расчеты зон обитаемости



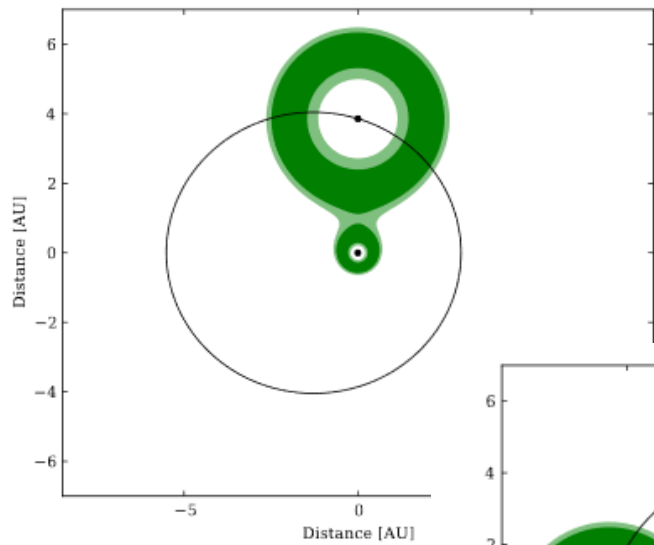
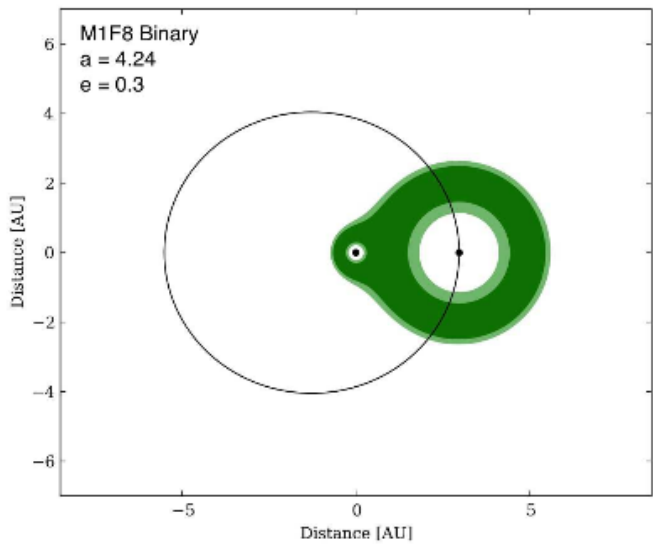
Примеры



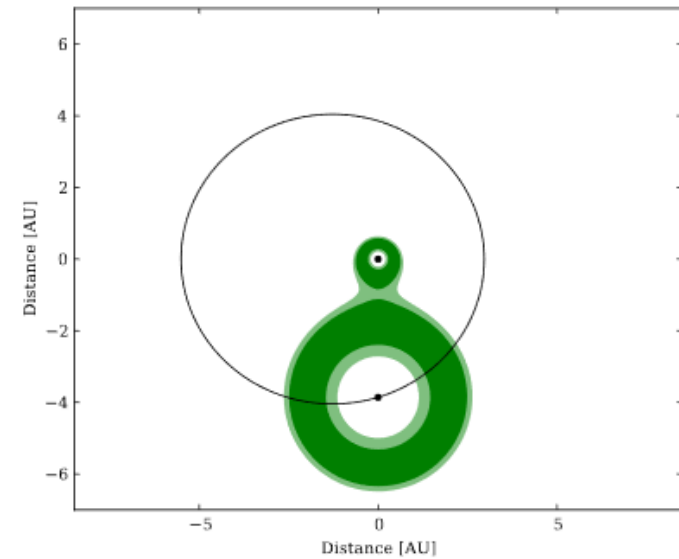
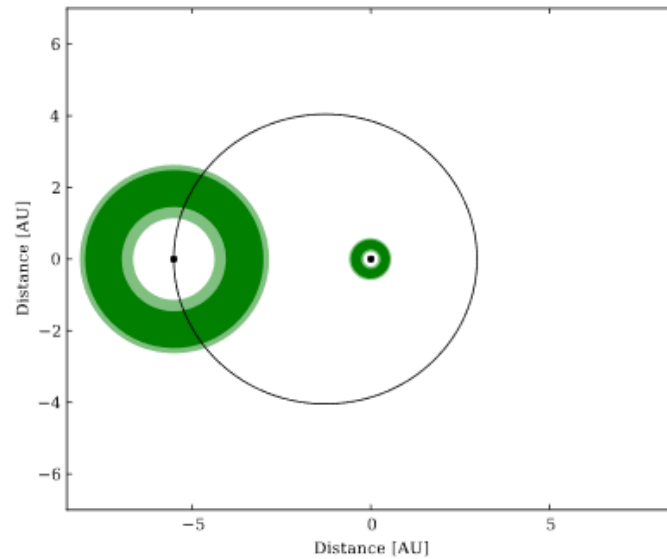
Темнозеленый – «узкая» HZ.

Светлозеленый –
эмпирическая HZ.

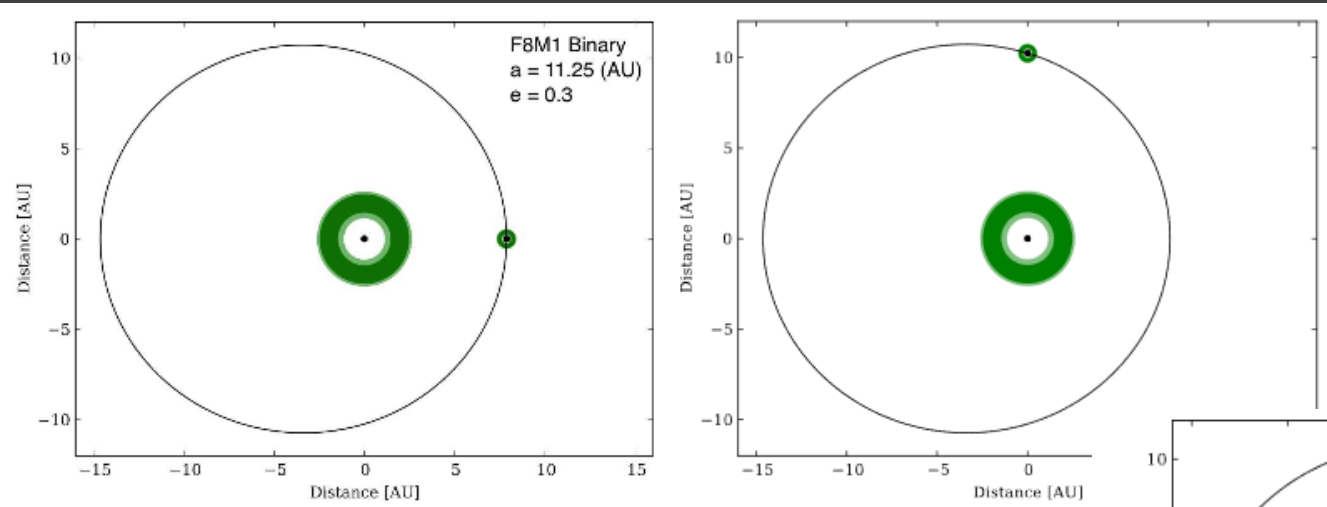
Примеры: Эксцентриситет=0.3



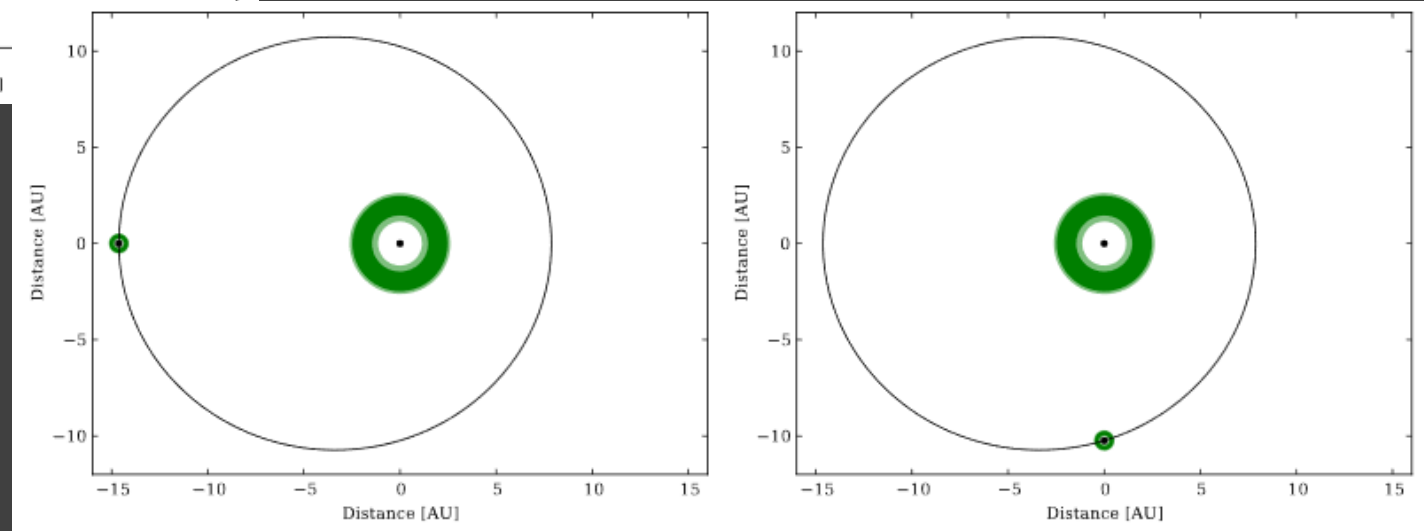
В центре показан красный карлик (M-звезда)



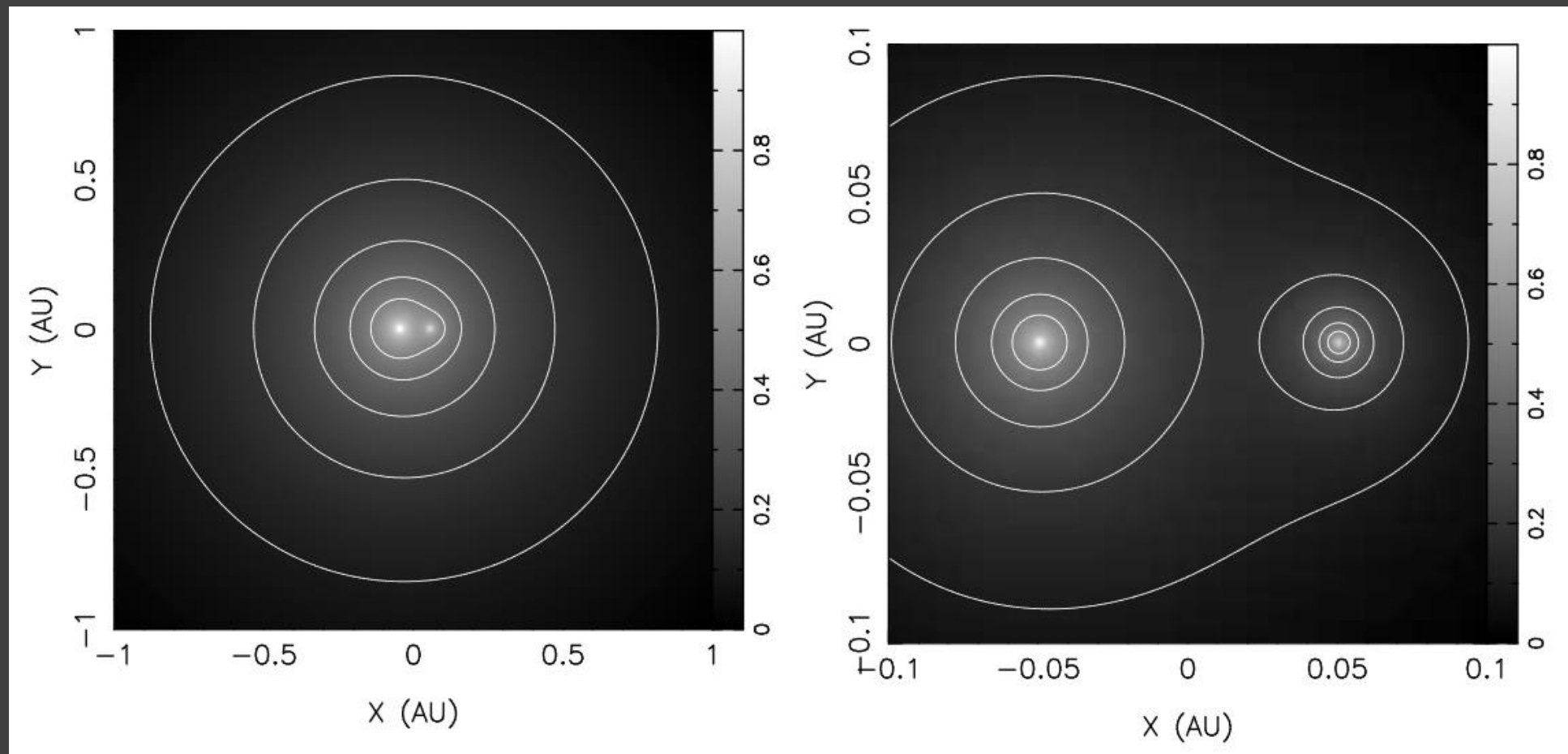
Примеры: эксцентриситет=0.3



В центре звезда F-класса



Карты потока излучения для системы Р-типа

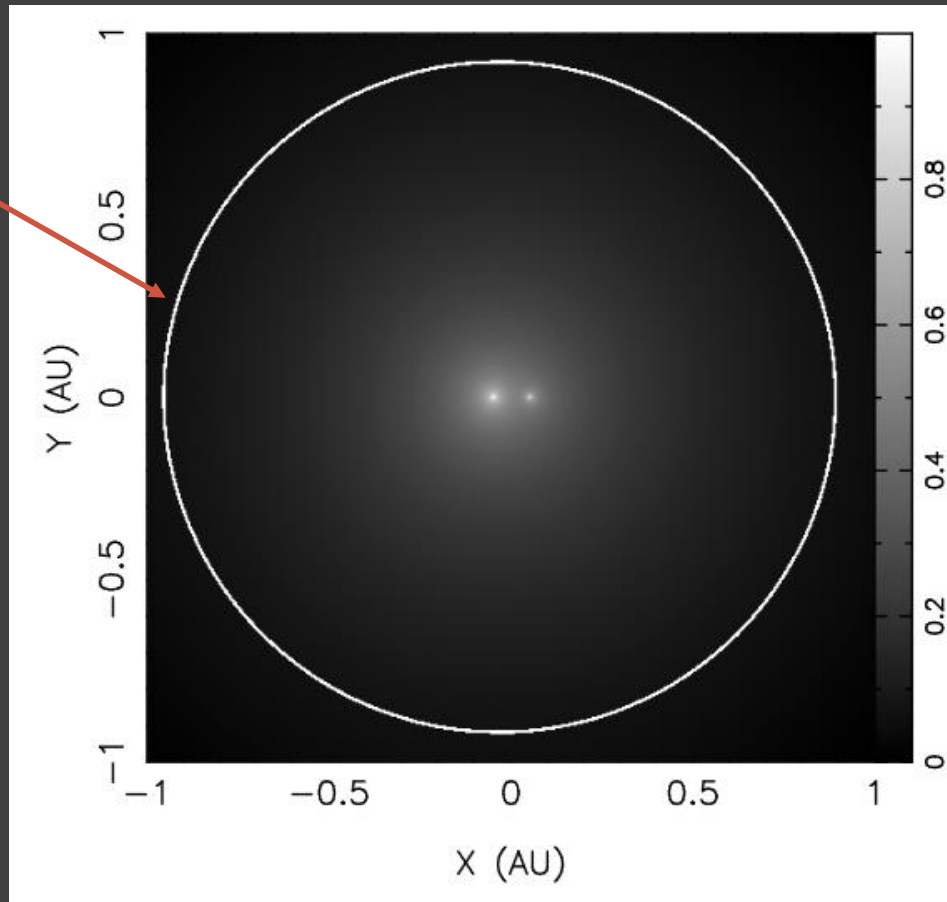


G2V+K5V
0.1 a.e.

Границы зоны обитаемости для Р-типа

Внутренняя граница

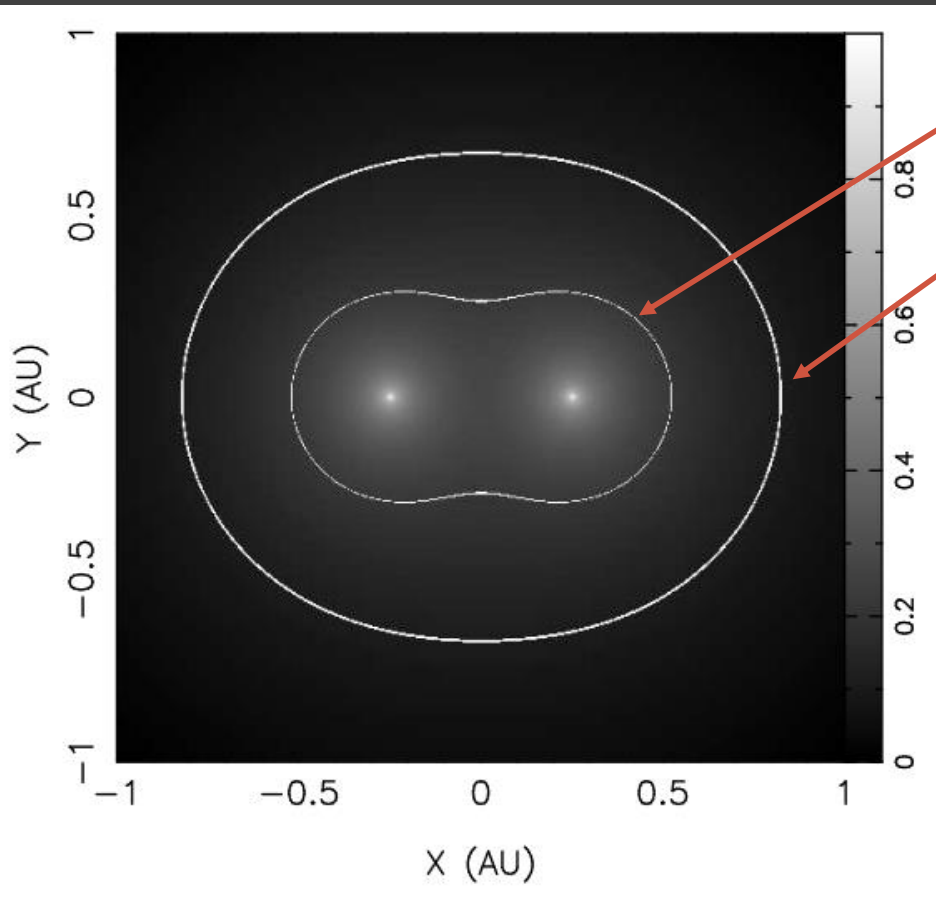
G2V+K5V
0.1 а.е.



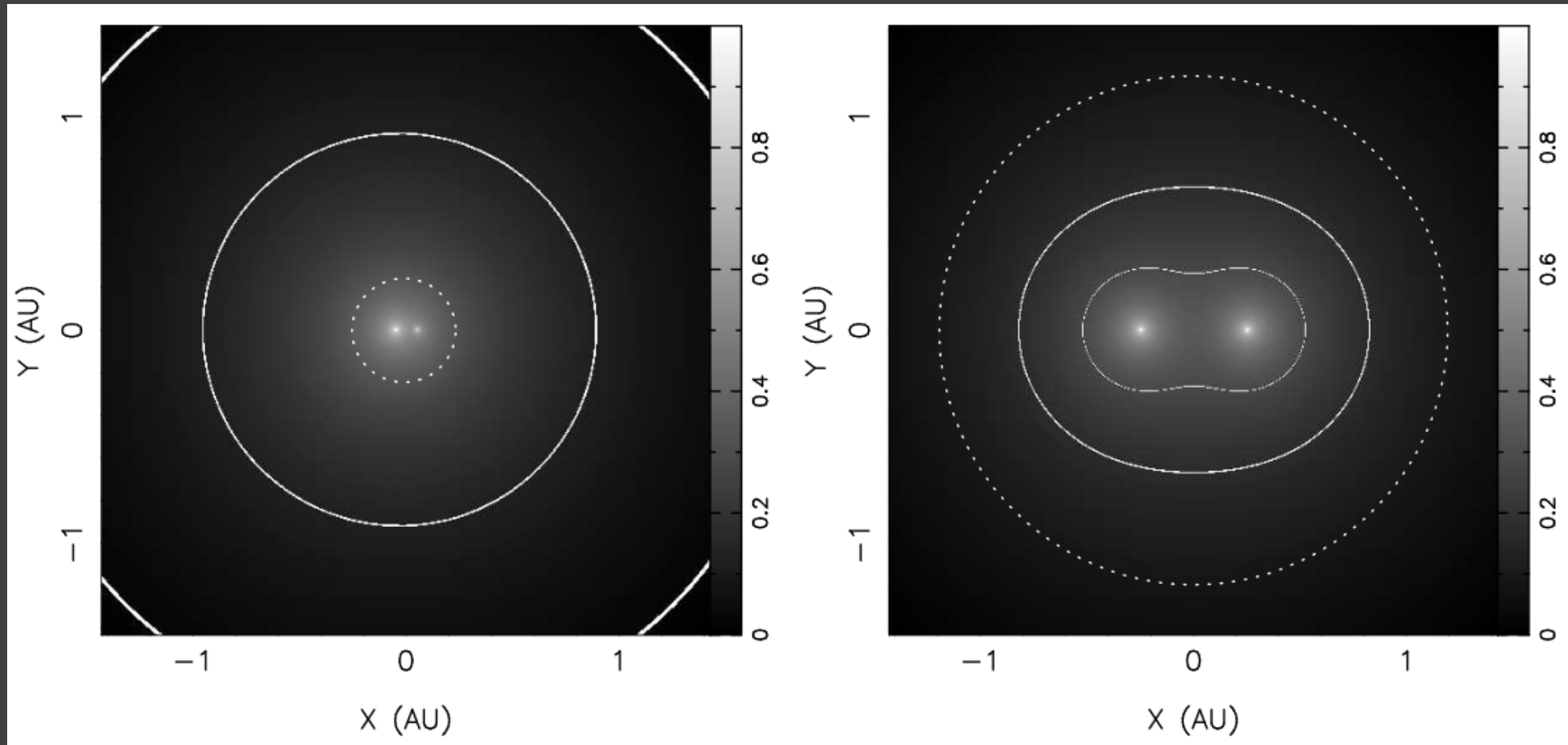
Внутренняя граница

Внешняя граница

M0V+M0V
0.5 а.е.



Устойчивость орбит планет



Он-лайн-овый калькулятор

Описание в 1401.0601

Величины T, L и M можно изменять
независимо друг от друга

Habitable Zones in Multiple Star Systems

Using this website, you can calculate the habitable zones of single, binary and multiple star systems (for single stars use the multiple star option with only one star. You can then compare the results with the [HZ Gallery](#) and the [HZ Calculator](#)). The methodology for calculating the HZ is described in [Müller & Haghighipour \(2014\)](#). The HZ can be calculated using the models by [Kopparapu et al \(2014\)](#) (assuming $M_{\text{planet}} = 1 M_{\text{Earth}}$), [Kopparapu et al \(2013\)](#), [Selsis et al \(2007\)](#), or [Kasting et al \(1993\)](#). The stability radii in the binary cases are calculated using the formulae given by [Holman & Wiegert \(1999\)](#).

Movies of time-dependent habitable zones can be found at <http://astro.twam.info/hz-ptype> and <http://astro.twam.info/hz-multi>.

If you encounter any problems while using this website please contact Tobias_Mueller@twam.info.

You are welcome to use any of the figures created with this website in your papers, presentations and for teaching. In that case, we ask you that you kindly cite the paper [Müller & Haghighipour \(2014\)](#), and mention the URL address to the website.

Binary Multiple

Primary

Temperature: 5780 K

Luminosity: 1.0 L_{solar}

Mass: 1.0 M_{solar}

Secondary

Temperature: 5780 K

Luminosity: 1.0 L_{solar}

Mass: 1.0 M_{solar}

System

Semi-major axis: 1.0 AU

Eccentricity: 0.0

True anomaly: 0.0 °

Parameters

Model: Kopparapu et al. (2014)

Plot region: Radius around each star

Plot radius: 2.0 AU

Resolution: 0.05 AU

Render Clear

Star	Temperature	Luminosity	Mass
primary	5780 K	1 L_{solar}	1 M_{solar}
secondary	5780 K	1 L_{solar}	1 M_{solar}

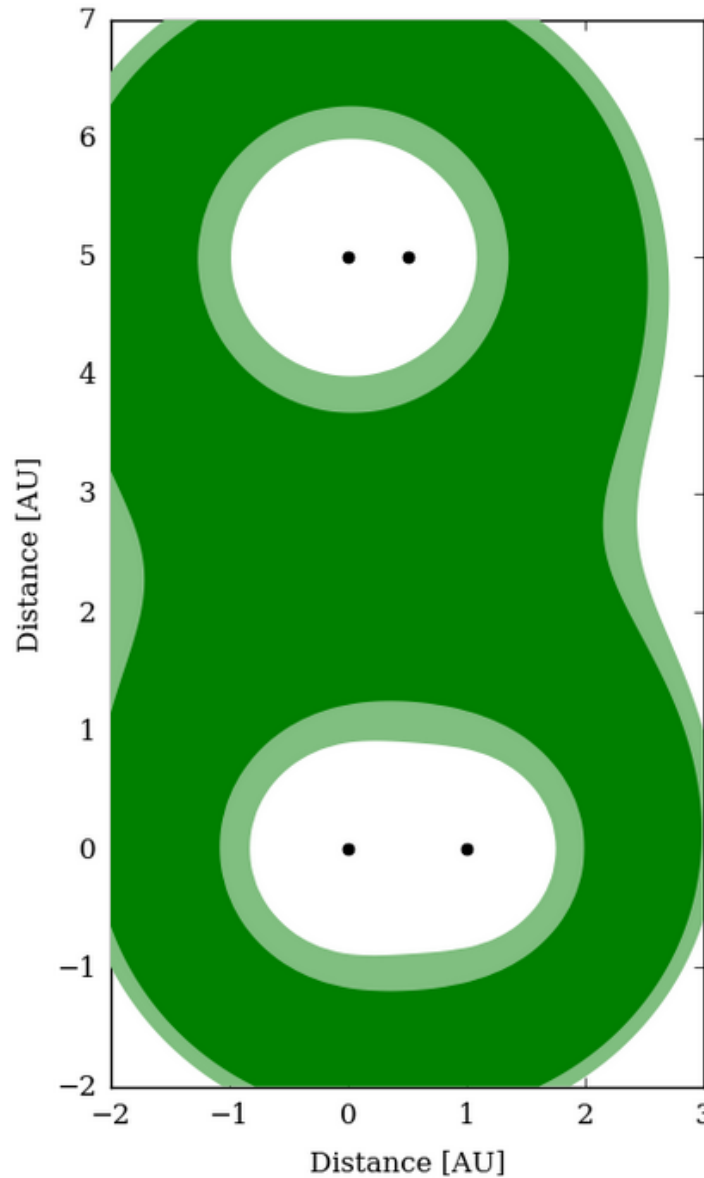
Semimajor Axis	Eccentricity	True Anomaly
1 AU	0	0 °

Download as PNG Download as PDF

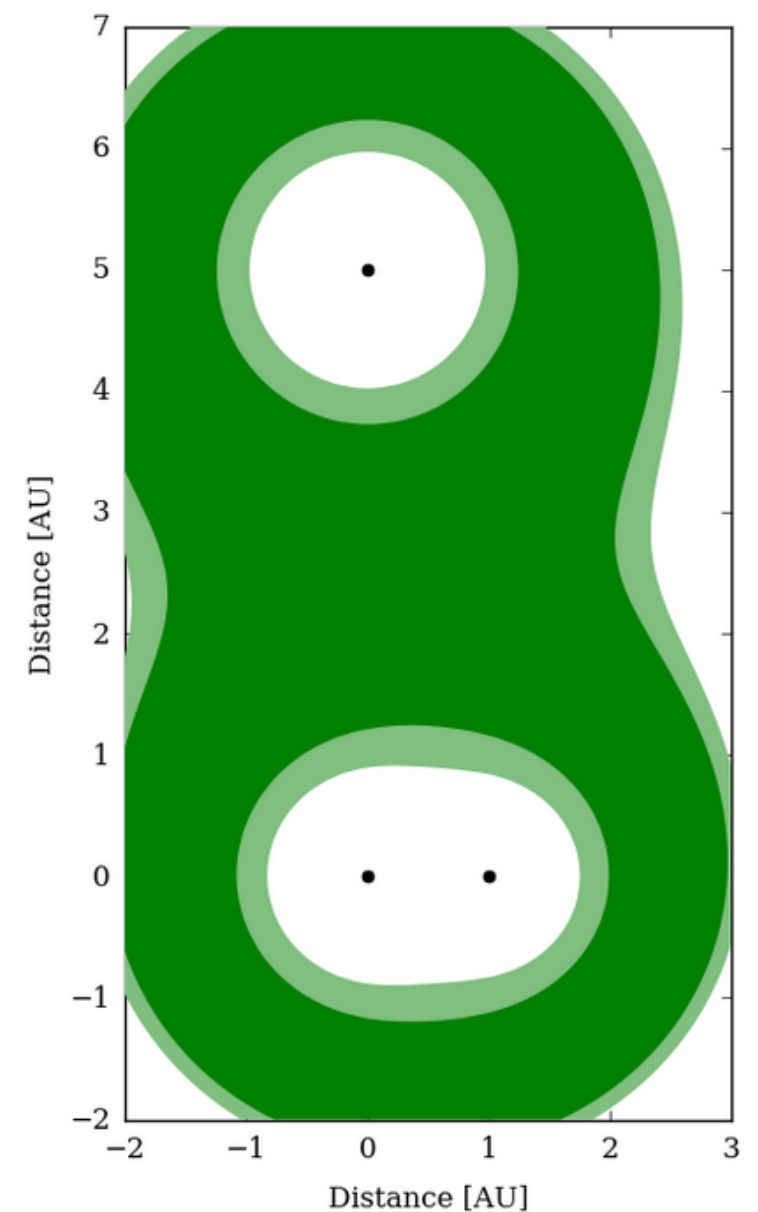
Кратные системы

Метод позволяет делать расчеты (и рисунки) для систем любой кратности.

Однако, пользователь сам должен следить за тем, что система получается согласованной (устойчивость, параметры звезд и тп.).

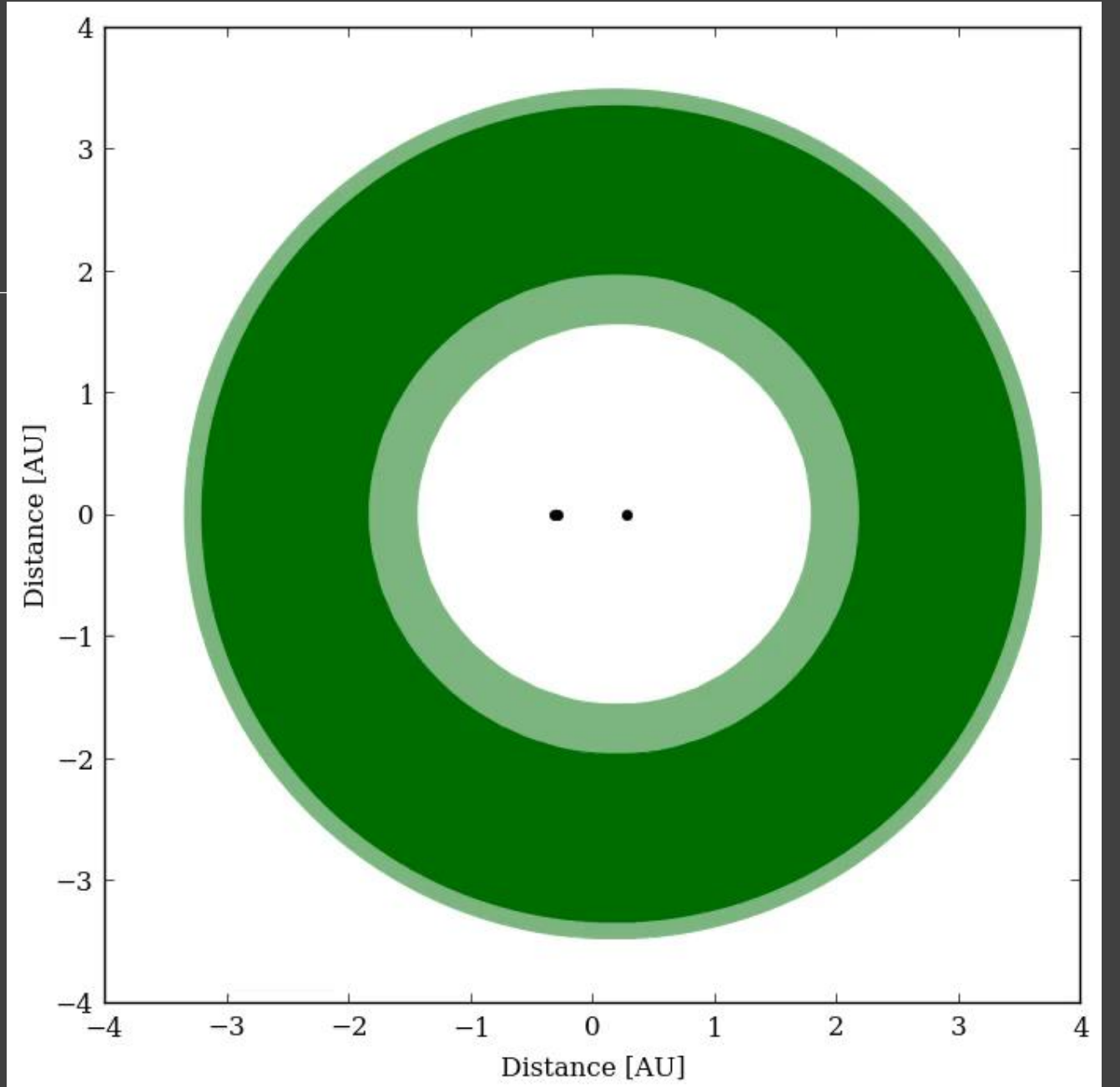


Star	Temperature	Luminosity	Mass	X	Y
A	5780 K	1 L_{solar}	1 M_{solar}	0 AU	0 AU
B	4780 K	0.7 L_{solar}	0.7 M_{solar}	1 AU	0 AU
C	6780 K	1.8 L_{solar}	1.4 M_{solar}	0 AU	5 AU
D	3780 K	0.1 L_{solar}	0.2 M_{solar}	0.5 AU	5 AU

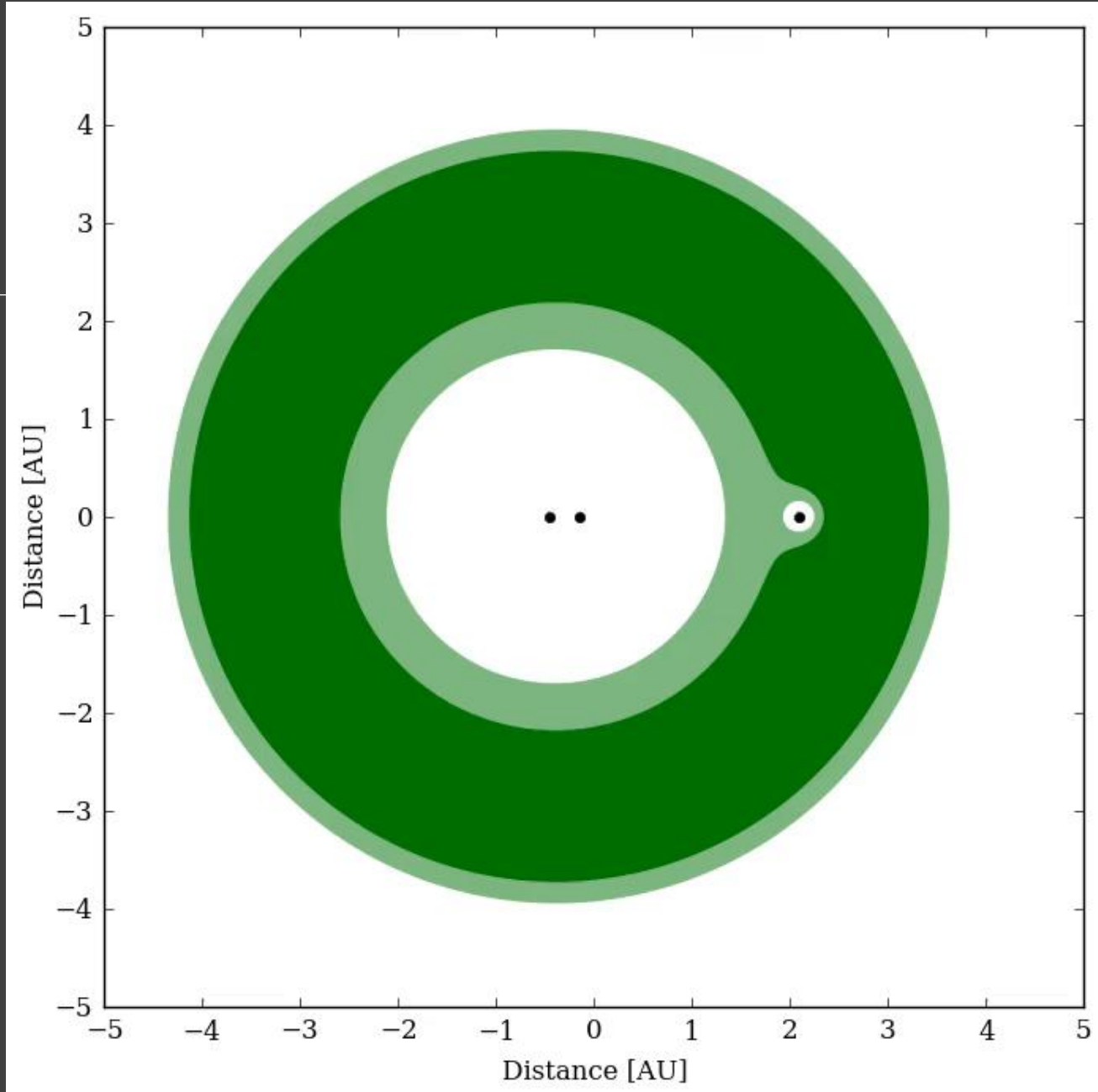


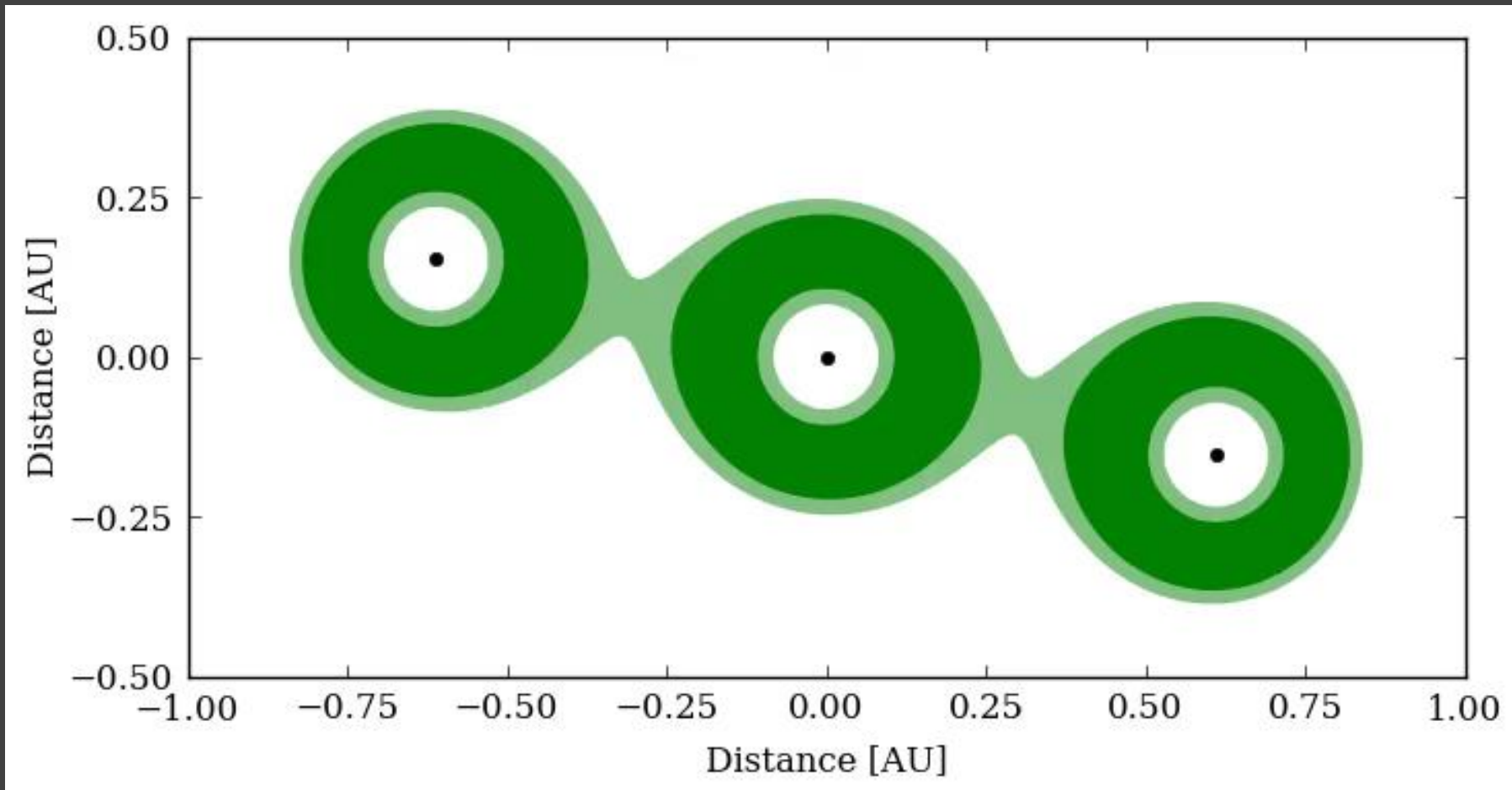
Star	Temperature	Luminosity	Mass	X	Y
A	5780 K	1 L_{solar}	1 M_{solar}	0 AU	0 AU
B	4780 K	0.7 L_{solar}	0.7 M_{solar}	1 AU	0 AU
C	6780 K	1.8 L_{solar}	1.4 M_{solar}	0 AU	5 AU

KIC 4150611



KID 5653126





Планеты вокруг двойных (P-type)

$$a_{\text{crit}} \approx 1.60 + 5.10 e_{\text{bin}} - 2.22 e_{\text{bin}}^2 + 4.12 \frac{M_s}{M_p + M_s} - 4.27 e_{\text{bin}} \frac{M_s}{M_p + M_s} - 5.09 \frac{M_s^2}{(M_p + M_s)^2} + 4.61 e_{\text{bin}}^2 \frac{M_s^2}{(M_p + M_s)^2},$$

Внутри критического радиуса орбиты спутников неустойчивы.

Двойная расчищает область вплоть до 2-5 размеров большой полуоси.

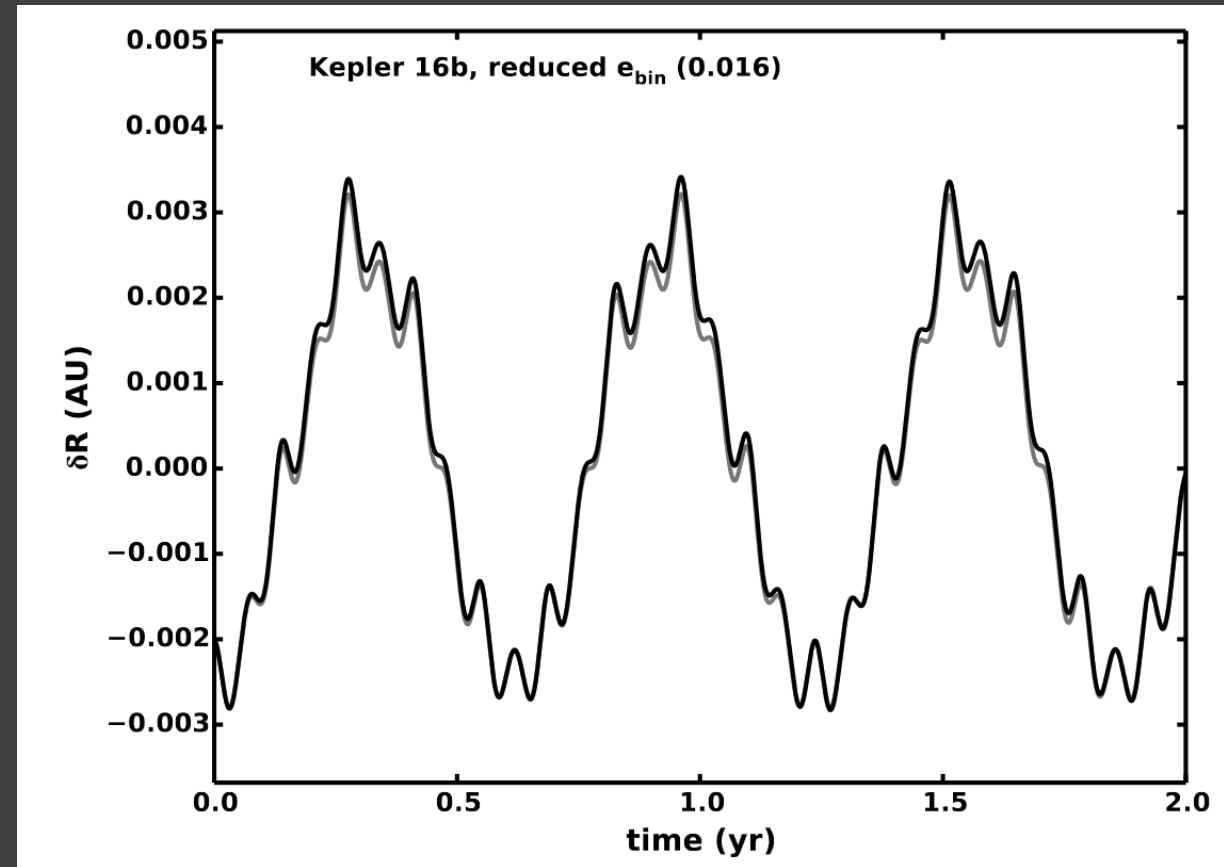
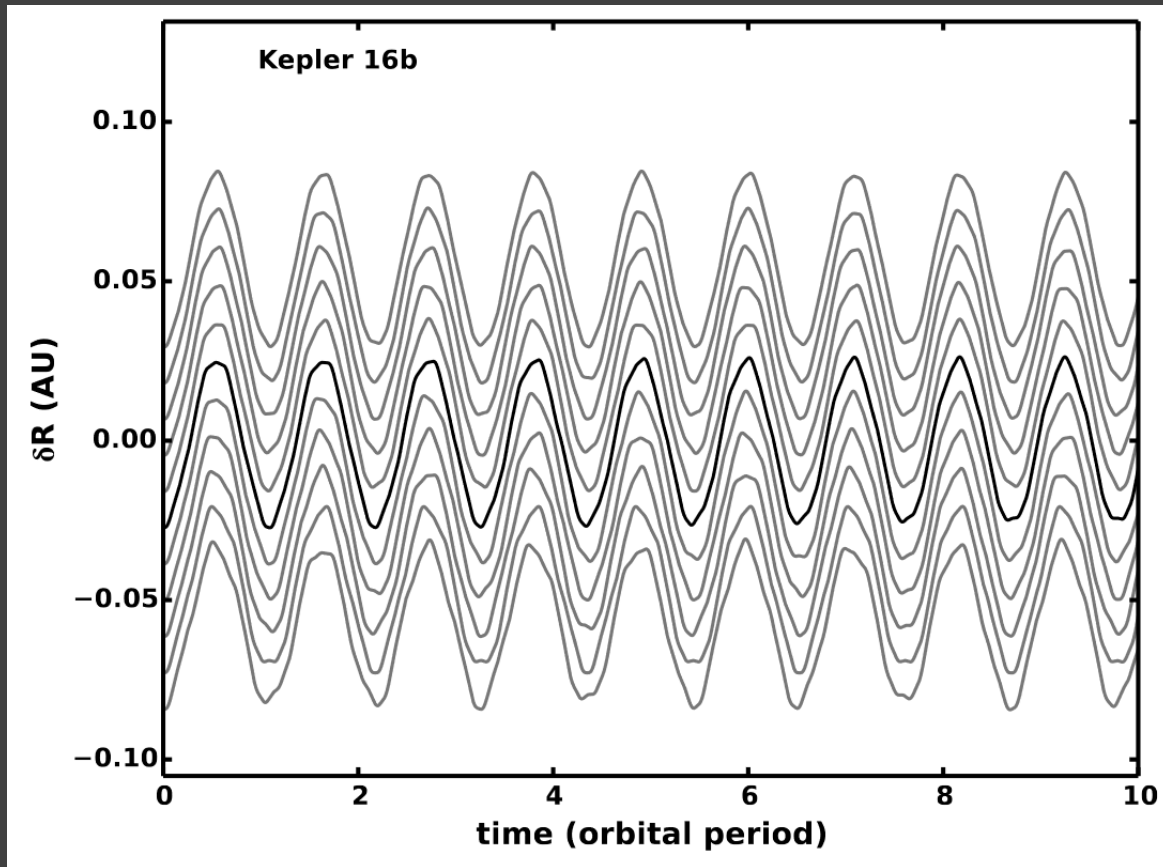
Вне критического расстояния (кроме областей резонансов) существует семейство вложенных почти круговых орбит. Поведение на них подобно поведению на орбитах вокруг одиночных звезд.

За область резонанса 6:1 орбиты устойчивы в случае малых эксцентриситетов двойной.

Это позволяет формировать планеты в обычном режиме.

Most circular orbits

Частицы на таких орбитах мало двигаются по радиусу и редко сталкиваются.



Образование планет в системах Р-типа

Газ и мелкие частицы быстро садятся на почти круговые (most circular) орбиты.

$v_{\text{dest}} \gtrsim 0.1 \text{ km/s}$ [destructive collisions, $r = 1 \text{ km}$]

На почти круговых орбитах частицы имеют небольшие относительные скорости.

Поэтому столкновения не ведут к разрушению.

Соответственно, группировка тел размером с Луну, может дать в итоге планету.

Однако существуют проблемы с объяснением известных планет, т.к. они массивны и находят близко к звездам.

Это требует высокой массы диска (в 10 раз тяжелее, чем в MMSN).

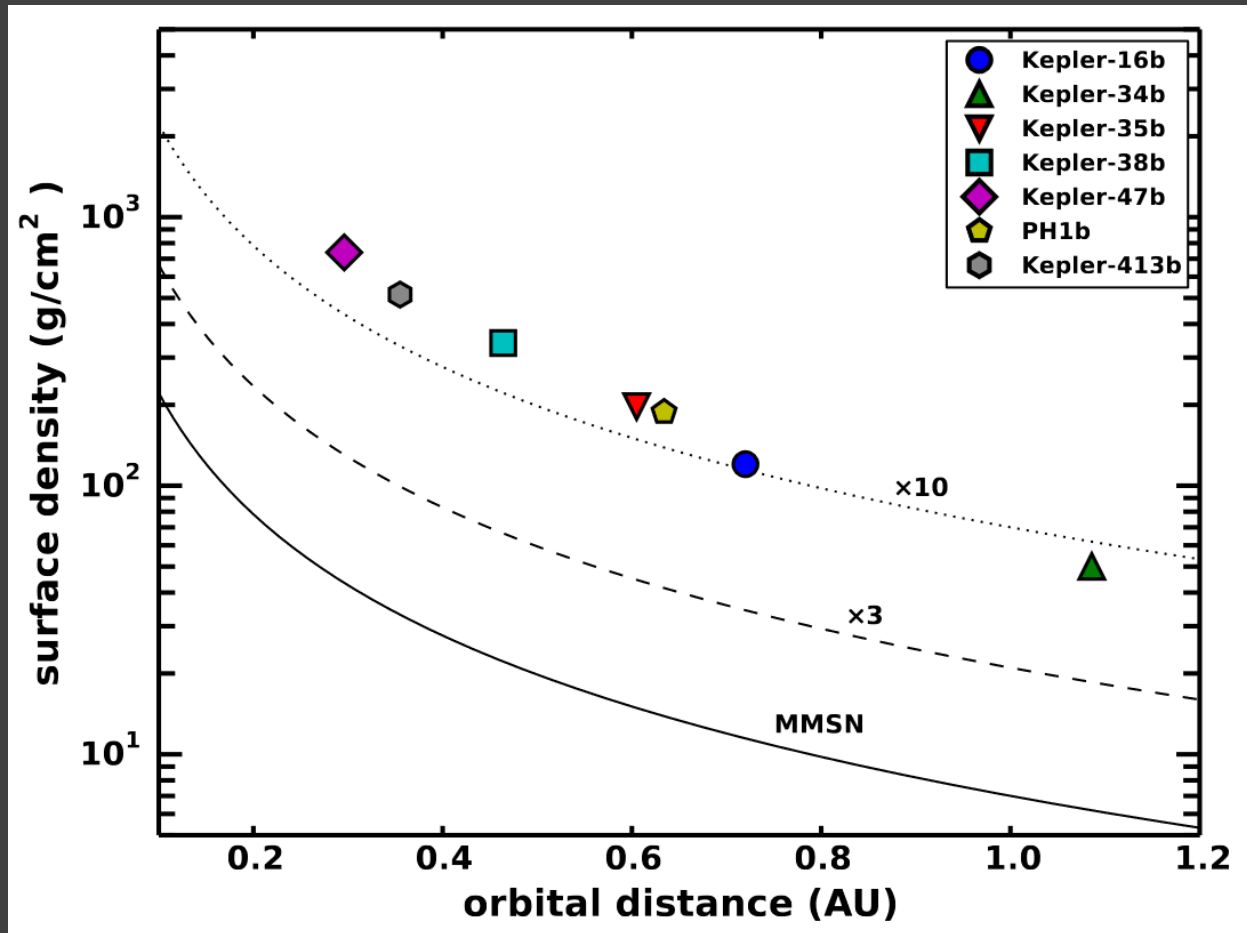
Поэтому обсуждается четыре сценария:

- Формирование *in situ*
- Миграция – затем «сборка»
- Миграция в газовом диске
- Рассеяние планет

Анализ 6-7 известных планет дает преимущество моделям «миграция – затем сборка» и «миграция в газовом диске», а в некоторых случаях – рассеянию.

Но формирование «на месте» проходит плохо из-за большой массы планет.

Образование планет *in situ* в массивных дисках



Минимальная поверхностная плотность вещества в протопланетном диске, необходимая для формирования планет.

Нижняя кривая – MMSN (Hayashi 1981)

Верхние – умножение MMSN на коэффициент.

Типичная масса диска в MMSN 0.01 Мсолнца.

Трудно объяснить массивные планеты в модели образования *in situ*.

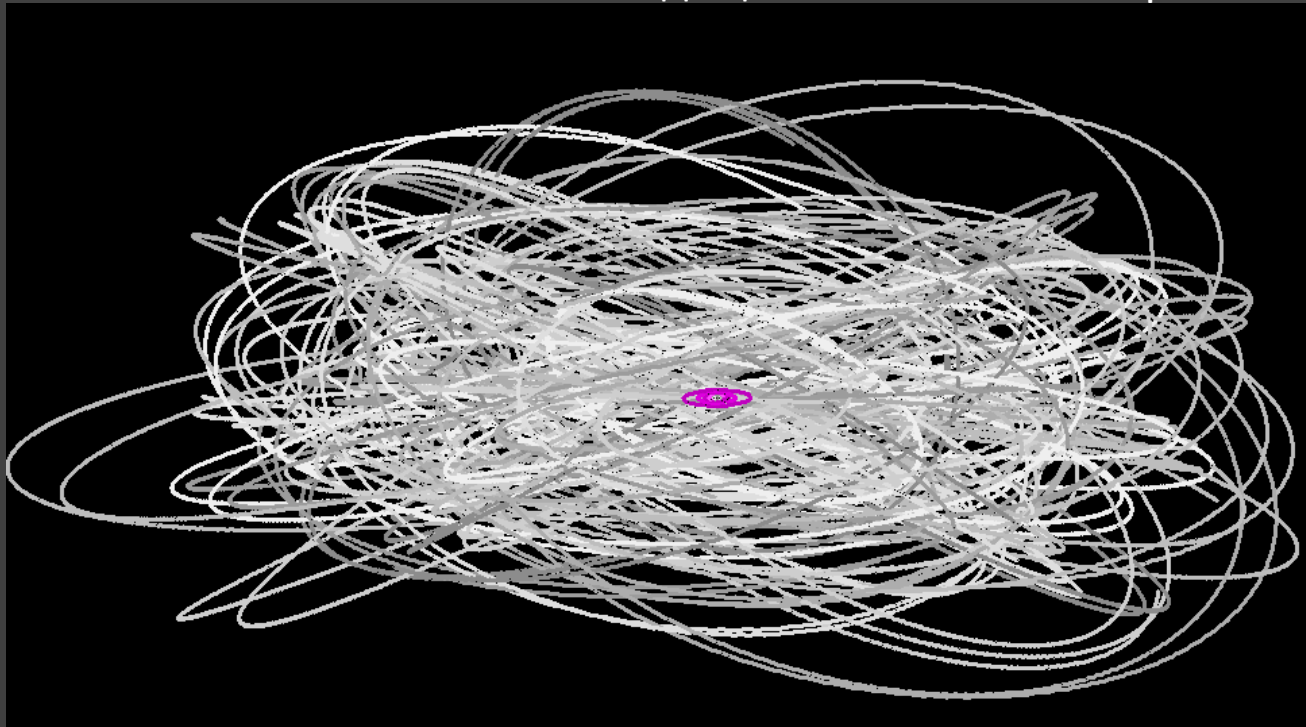
А вот легкие планеты могут формироваться на нужных орбитах без существенной миграции.

Эффект Лидова-Козаи

У орбиты могут одновременно меняться наклонение эксцентриситет.

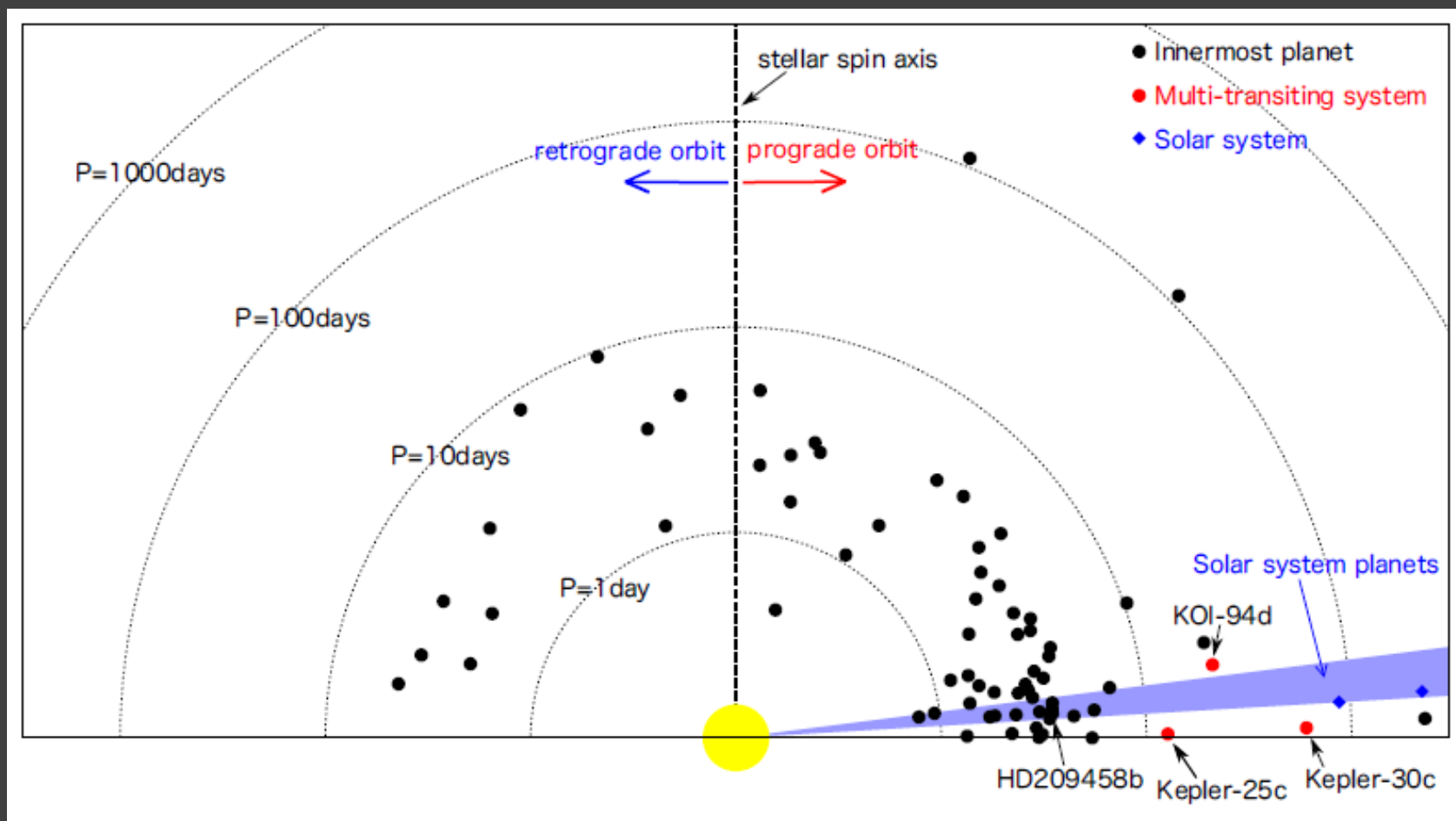
Эффект связан с воздействием тела, находящегося на внешней орбите.

$$e_{\max} \approx \sqrt{1 - (5/3) \cos^2 i_0}$$



Эффект был впервые описан Михаилом Лидовым для спутников в 1961 г., а затем в 1962 г. был описан Козаи для астероидов.

Распределение планет по ориентации орбиты



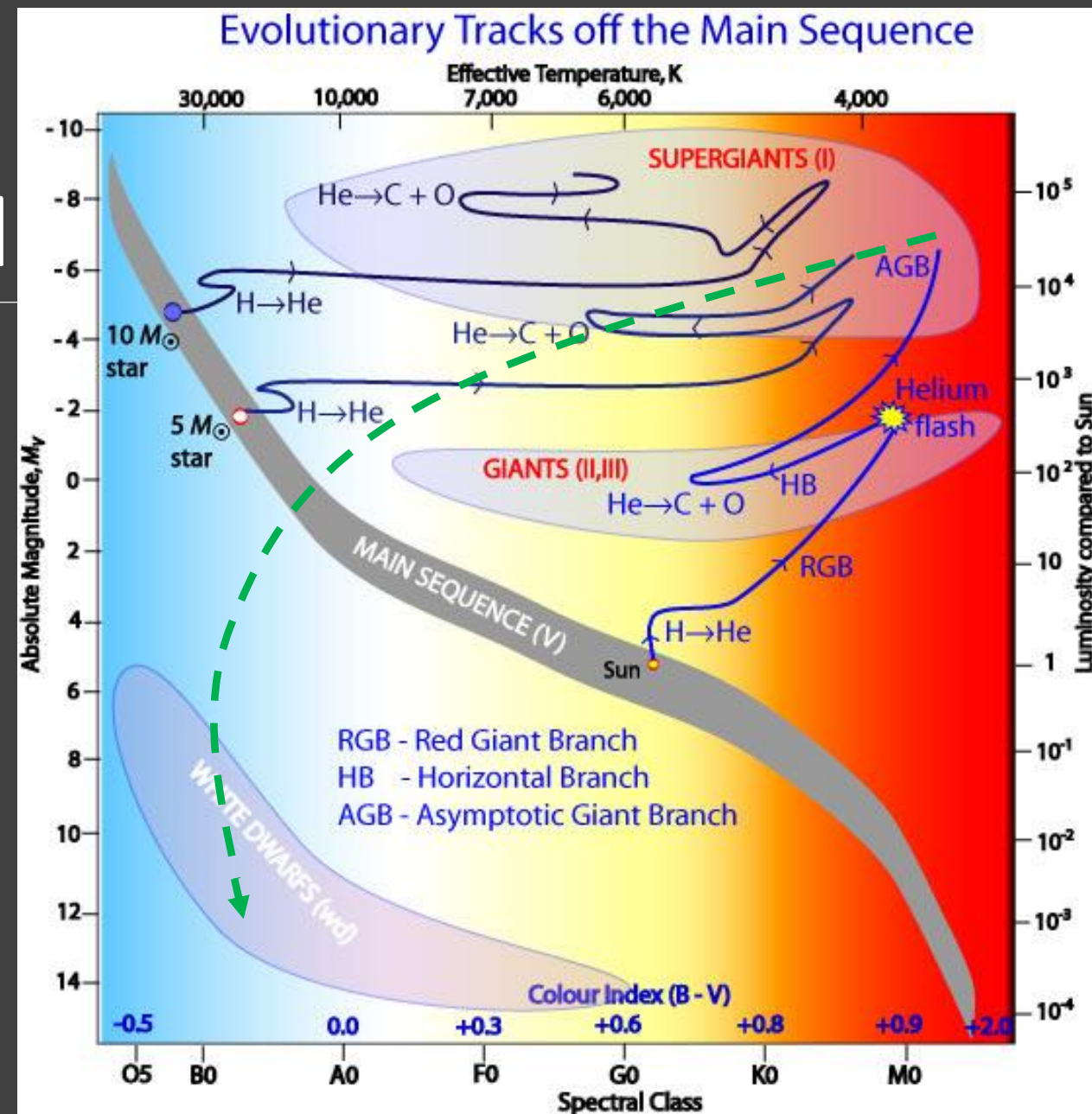
Есть планеты с полярными и даже обратными орбитами.

Эволюция после ГП

Эволюция звезд влияет на планетную систему.

Расширение звезды, потеря массы, приливы – приводят к изменению орбит планет.

Наблюдаются планеты у красных гигантов, в проэволюционировавших двойных, а также вокруг белых карликов и нейтронных звезд.

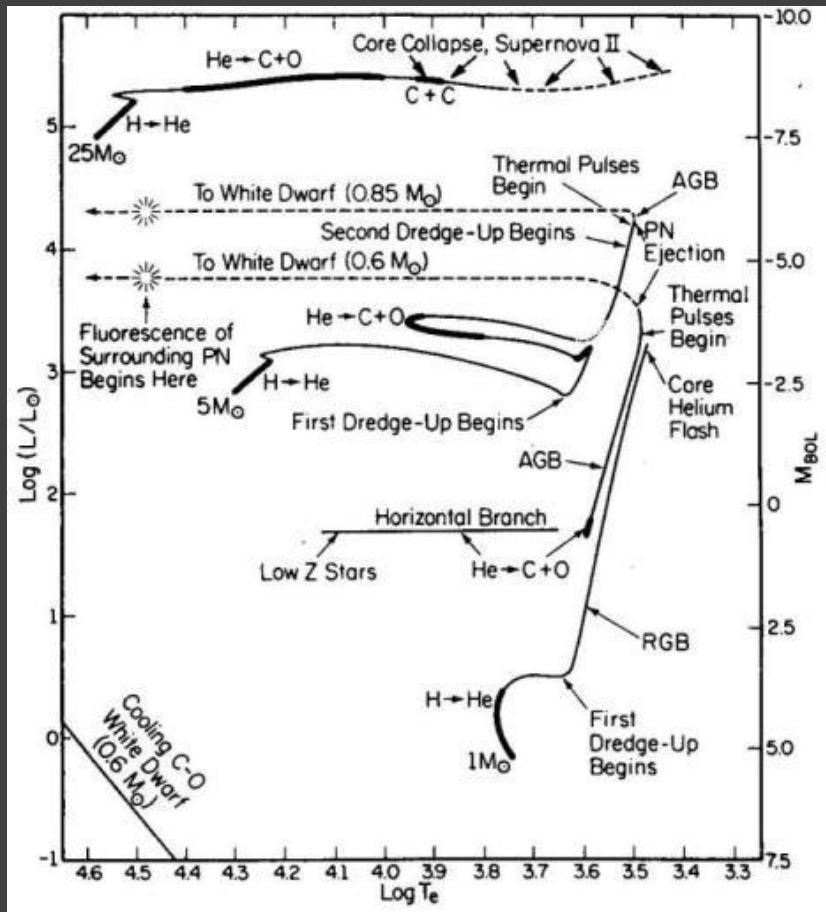


Примеры систем после ГП

name	type
BD+48 740 ^a	GB star with possible pollution
G 29-38 ^b	WD with disc and pollution
GD 362 ^c	WD with disc and pollution
GJ 86 ^d	binary WD-MS with planet
NN Ser ^e	binary WD-MS with planets
PSR B1257+12 ^f	pulsar with planets
PSR B1620-26 ^g	binary pulsar-WD with planet
SDSS J1228+1040 ^h	WD with disc and pollution
WD 0806-661 ⁱ	WD with planet
WD 1145+017 ^j	WD with asteroids, disc and pollution
WD J0959-0200 ^k	WD with disc and pollution
vMa2 ^l	WD with pollution

Некоторые необычные системы могут проливать свет на важные вопросы эволюции звезд и планет.

Звездная эволюция



Iben (1991)

MS stellar type	MS mass (M_{\odot})	WD mass (M_{\odot})	max AGB radius (AU)	max mass loss rate (M_{\odot}/yr)	max luminosity (L_{\odot})	RGB time span (Myr)	AGB time span (Myr)	RGB mass loss/AGB mass loss
B3	6.30	1.18	6.19	9.27×10^{-5}	66200	0.086	0.92	2.0×10^{-4}
B4	5.00	1.00	4.98	6.51×10^{-5}	46100	0.25	1.41	2.5×10^{-4}
B5	4.30	0.91	4.29	5.15×10^{-5}	35900	0.49	1.89	3.0×10^{-4}
B8	3.00	0.75	2.86	2.78×10^{-5}	18700	2.42	4.19	4.5×10^{-4}
A0	2.34	0.65	2.26	2.33×10^{-5}	12700	7.71	5.72	6.0×10^{-4}
A5	2.04	0.64	1.86	1.88×10^{-5}	9500	20.0	6.27	1.4×10^{-3}
F0	1.66	0.60	1.55	1.32×10^{-5}	7140	88.0	5.24	0.040
F5	1.41	0.57	1.35	9.56×10^{-6}	5800	220	5.08	0.11
G0	1.16	0.53	1.15	1.14×10^{-5}	4520	536	4.82	0.41
G2	1.11	0.53	1.11	7.44×10^{-6}	4300	621	4.77	0.57
G5	1.05	0.52	1.07	6.89×10^{-6}	4130	684	4.77	0.82
K0	0.90	0.51	0.92	2.07×10^{-7}	3590	888	5.01	4.14

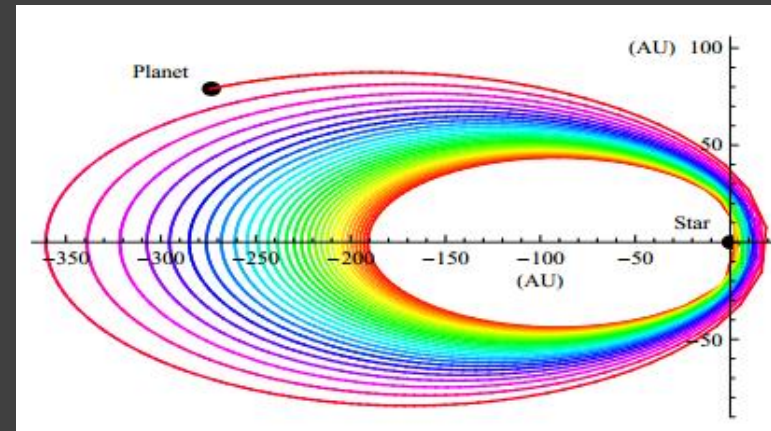
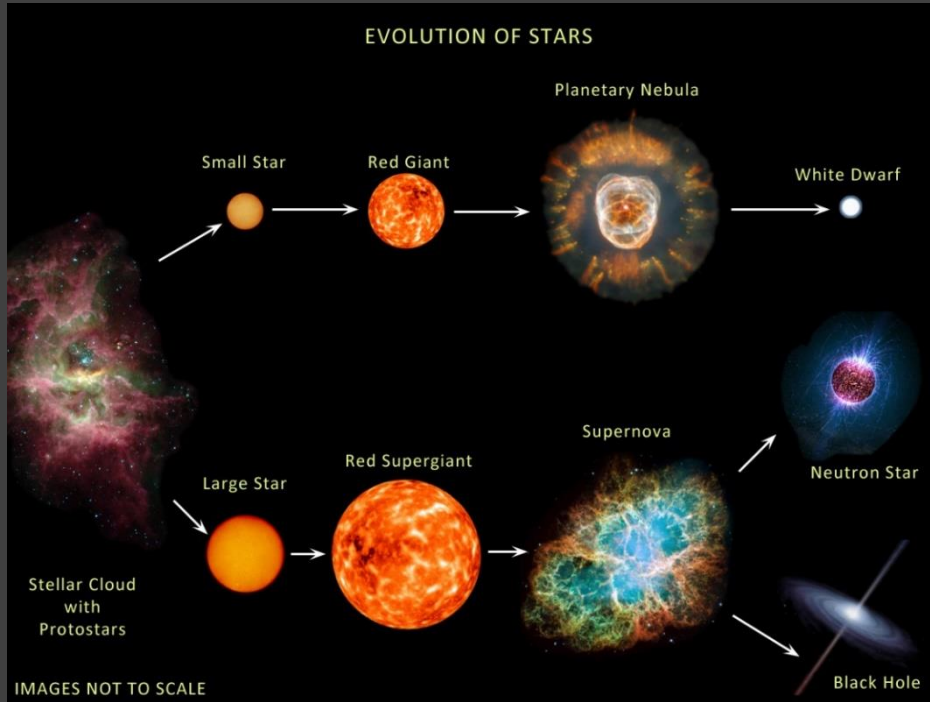
Veras (2016)

Выброс планет звездами

Что происходит с планетами
когда звезда теряет массу?

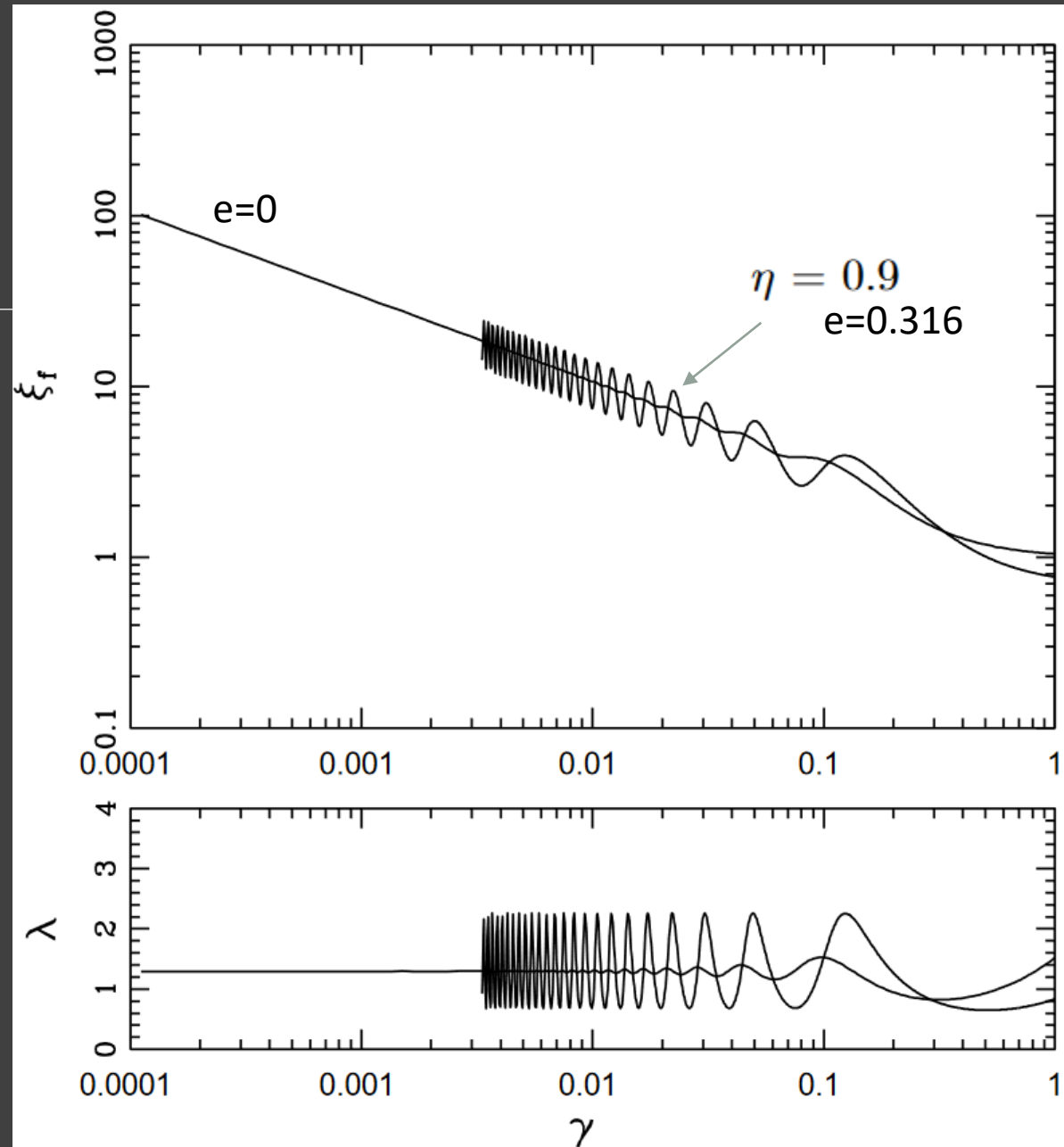
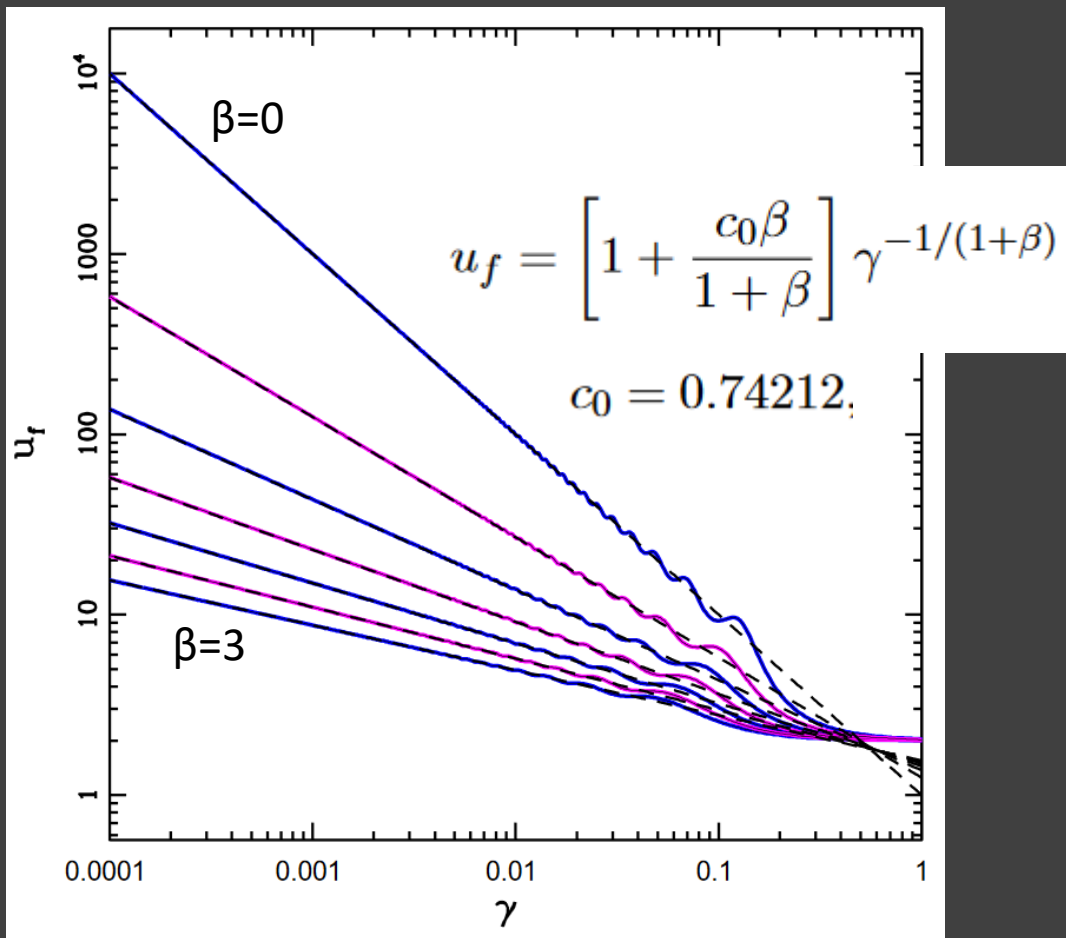
У звезд типа Солнца планеты на орбитах, как в СС, останутся в системе, но орбиты будут шире. Поэтому и наблюдают планеты у белых карликов

Далекие планеты могут «улетать»

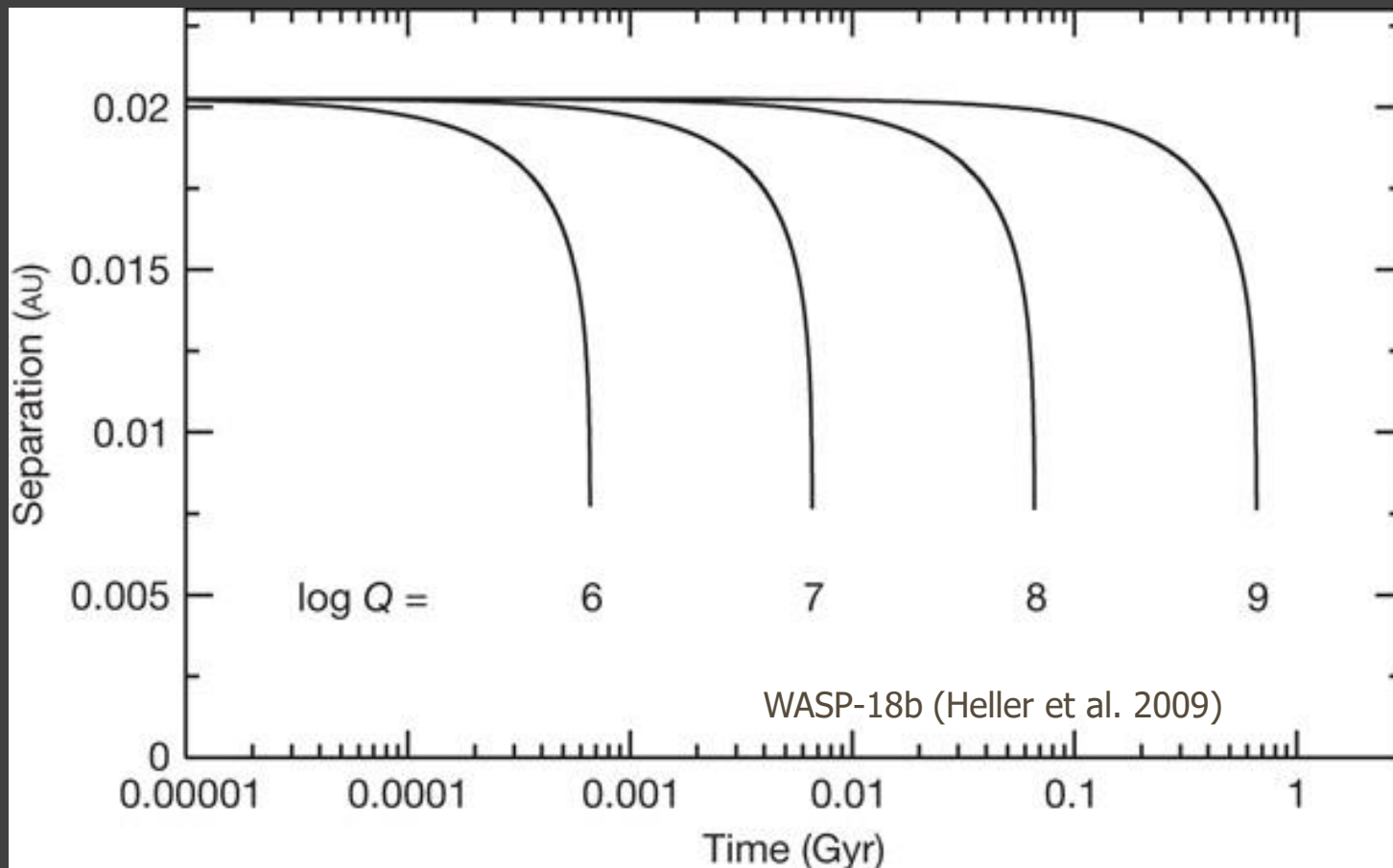


Интересные потери планет могут происходить в двойных системах!

Результаты расчетов



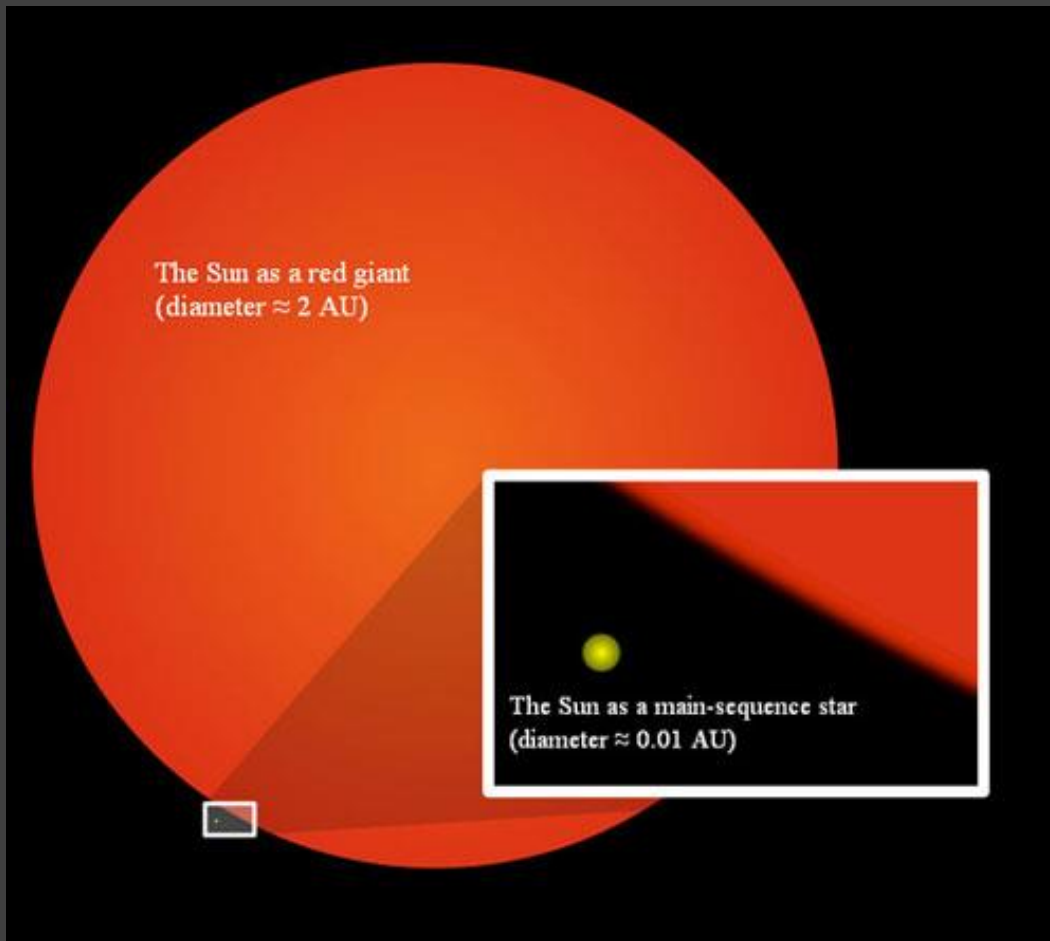
Приливы



Планеты и звезды (а также планеты друг с другом) могут активно взаимодействовать за счет приливов. Это будет приводить к изменению орбиты и скорости собственного вращения.

При орбитальном периоде короче нескольких дней (орбита менее 0.02 а.е.) невозможно равновесие, и орбита планеты постоянно сокращается, пока планета не будет разрушена и/или поглощена.

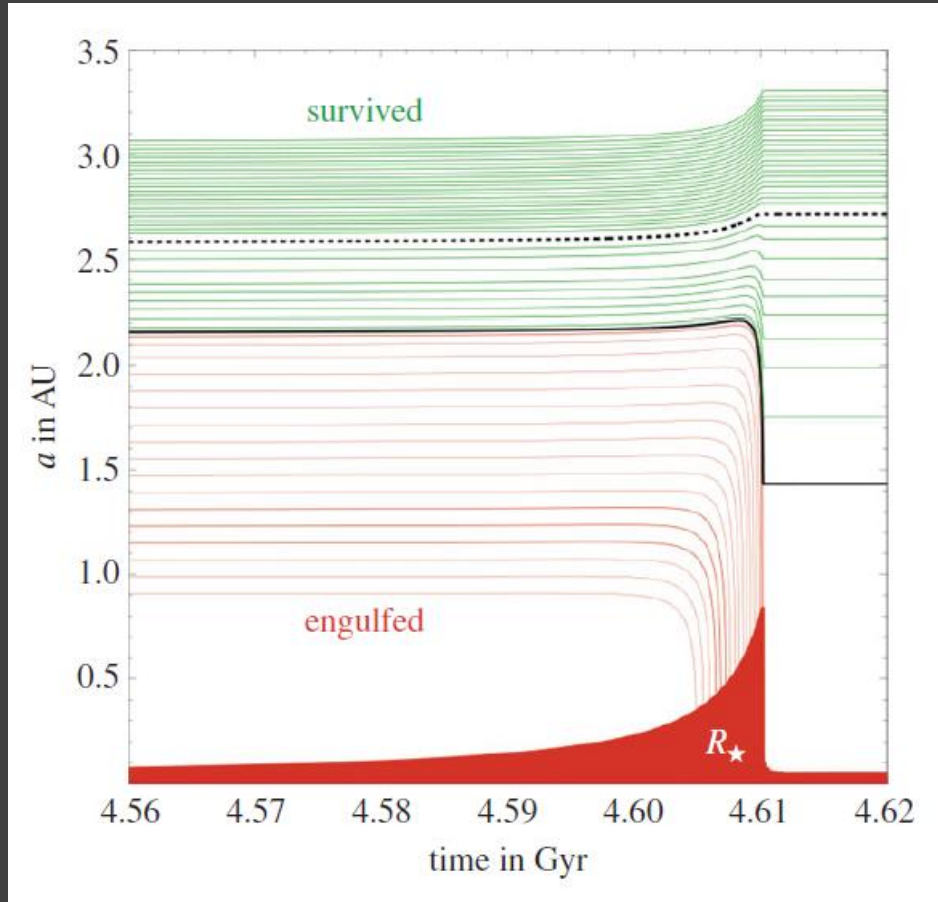
Превращение звезды в красный гигант



Звездная эволюция отражается на планетах.

При превращении звезды в красного гиганта часть планет оказывается поглощенными.

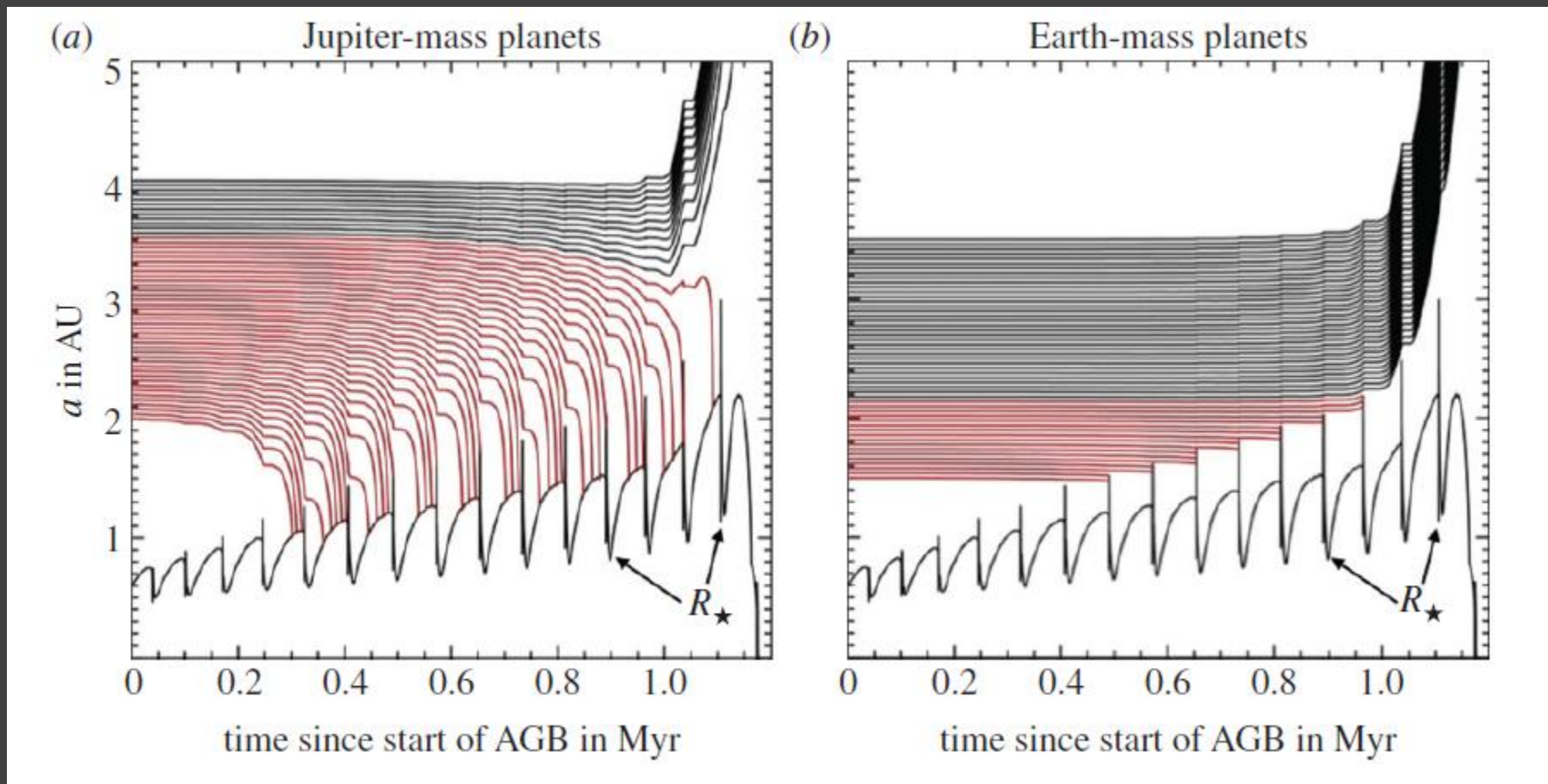
Приливное поглощение красным гигантом



Звезда имела массу 1.5 солнечной на Главной последовательности.

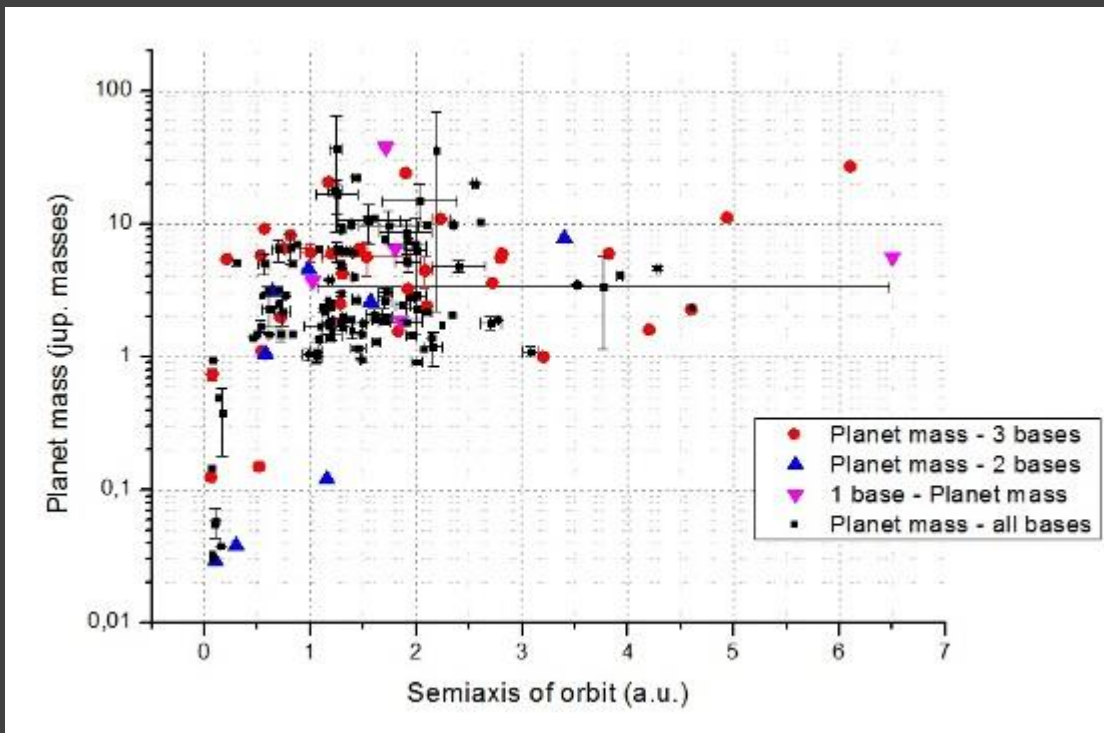
Планета имеет массу Юпитера.

Приливное поглощение звездой AGB

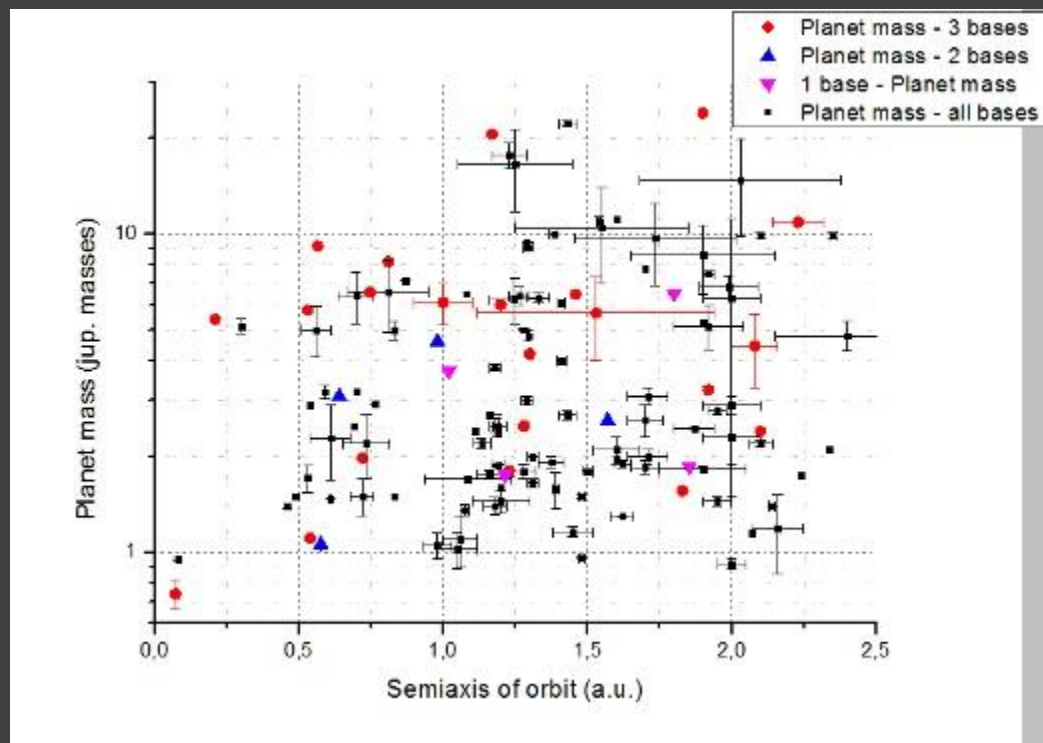


Звезда имела массу 2 солнечных на стадии Главной последоват.

Планеты вокруг красных гигантов



>100 планет

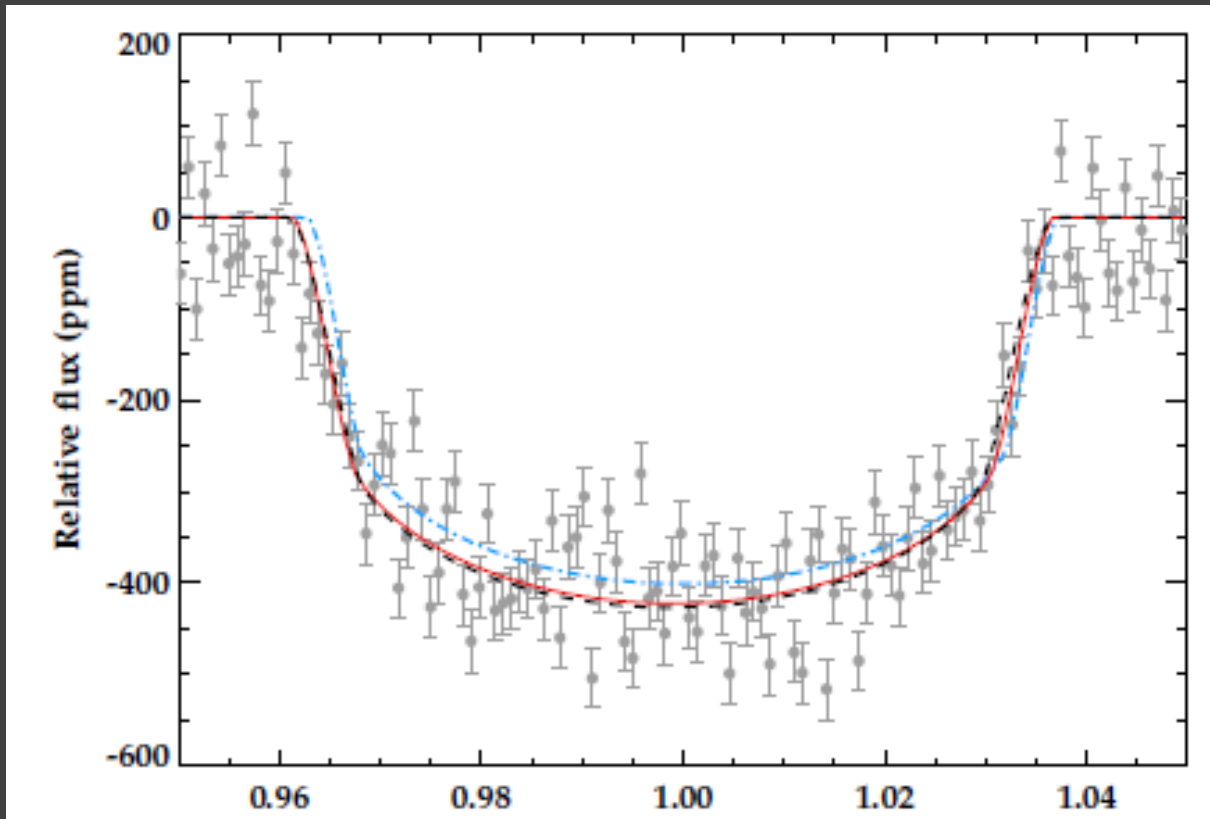


<http://www.astronet.ru/db/msg/1391325>

См. также каталог в <https://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/sreffert/giantplanets/giantplanets.php>

Планеты вокруг звезд-гигантов

Кеплер-91

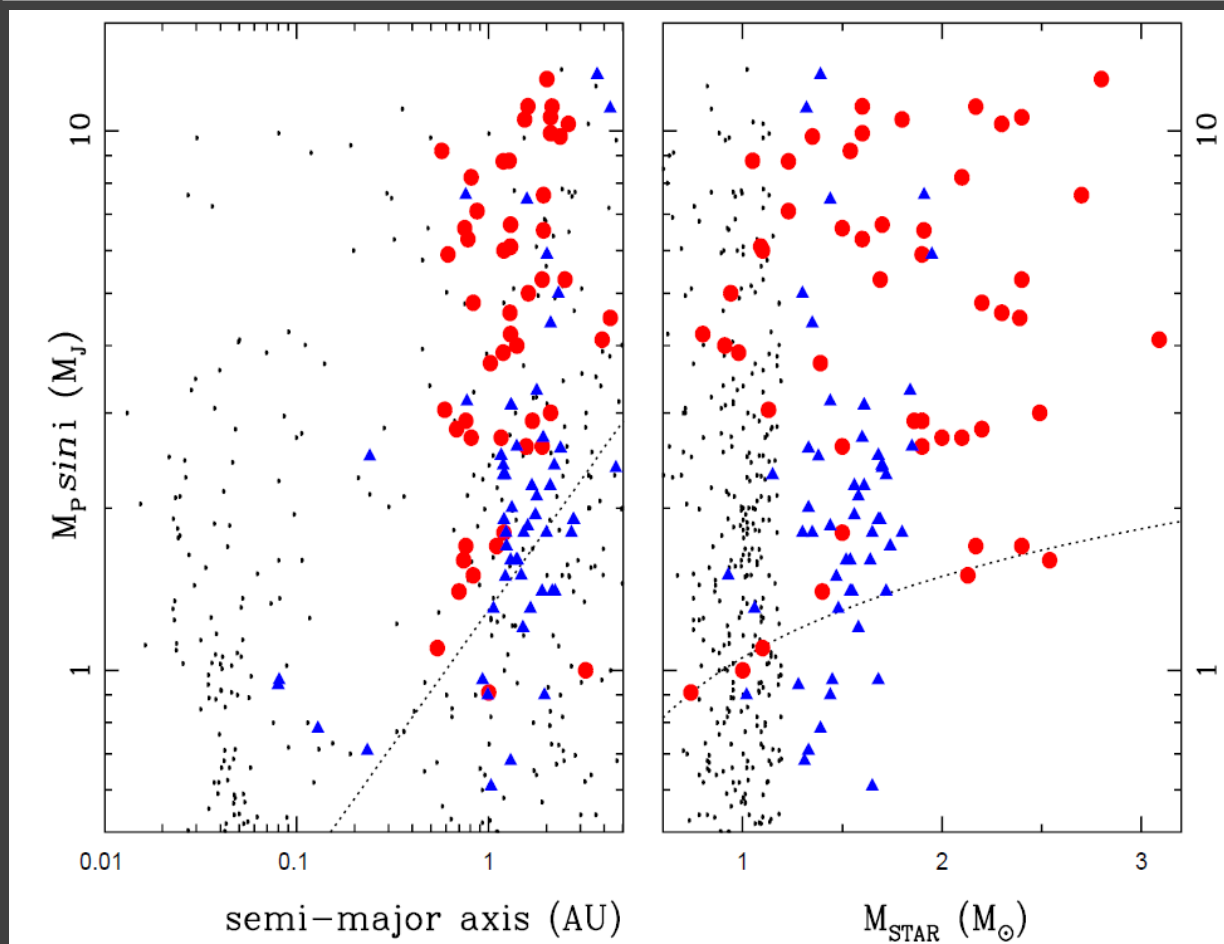


Известно несколько десятков таких планет. Они особенно интересны в связи с пониманием судьбы планетных систем на поздних стадиях эволюции звезд.

Планета Кеплер-91b, во-первых, является самой близкой к звезде среди планет у гигантов (<1.5 радиуса звезды над поверхностью). Звезда закрывает 10% неба!

Во-вторых, через <55 млн лет планета упадет на звезду.

Статистика планет вокруг гигантов



Все надежные планеты вокруг гигантов вращаются не слишком близко к самой звезде.

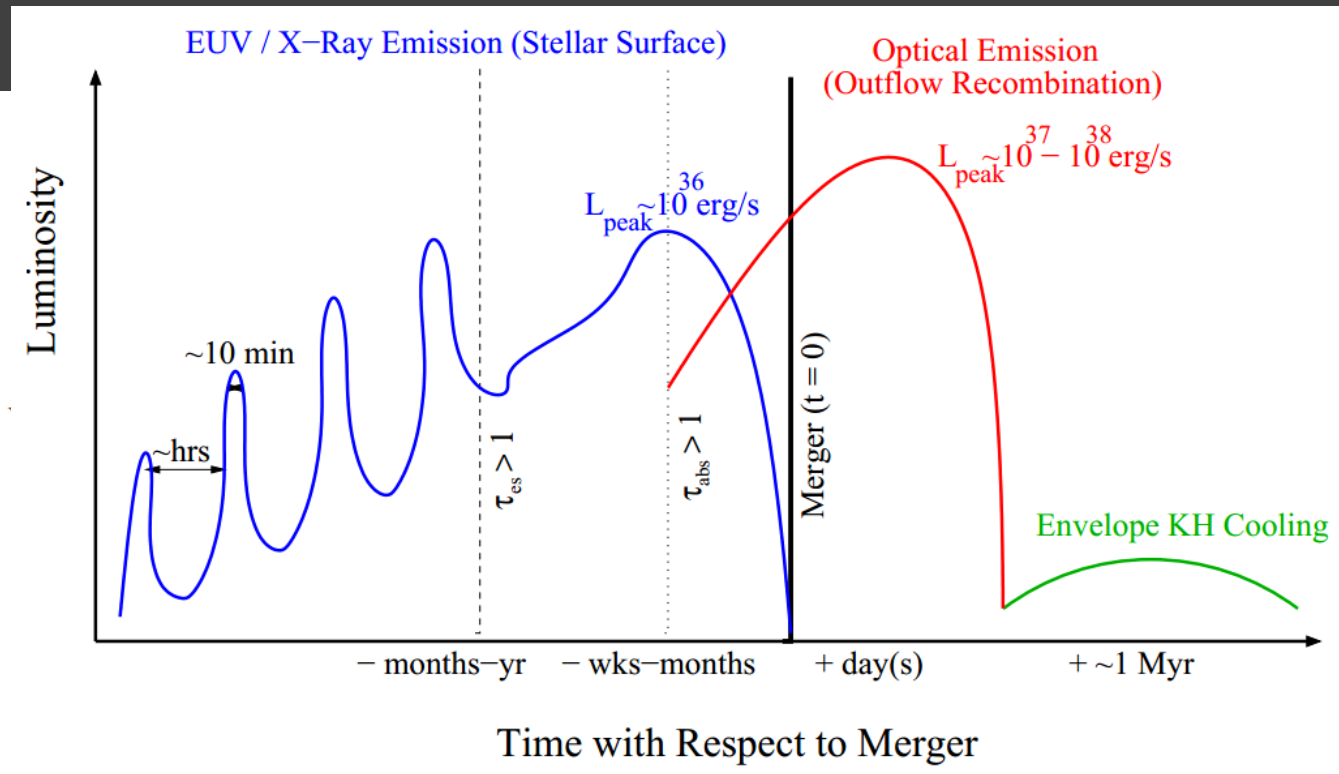
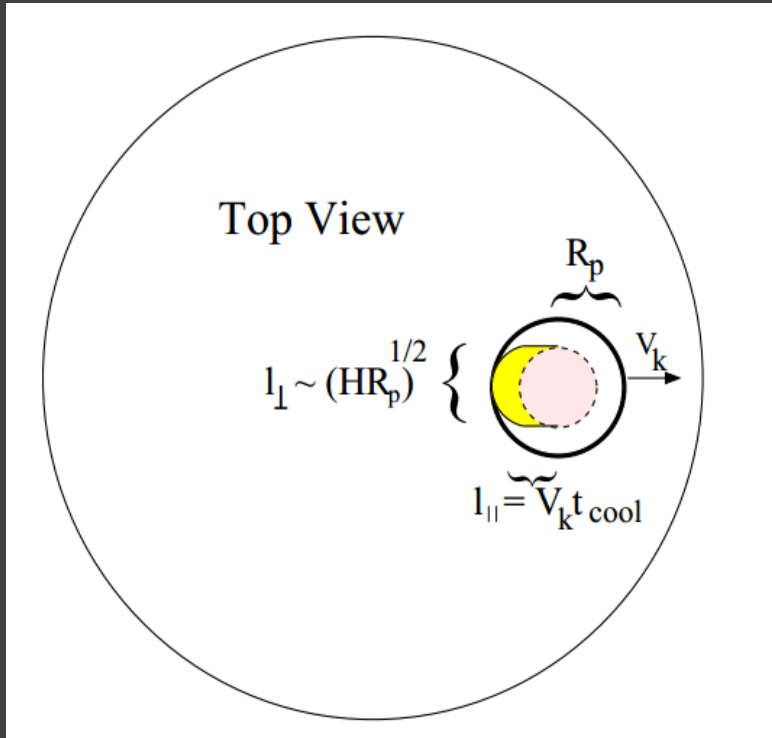
Концентрация планет на орбитах 0.5-0.9 а.е. может быть связана с приливными эффектами.

Планеты массивны, и авторы выдвигают гипотезу, что масса планет могла расти за счет вещества звезды.

Орбиты более круглые — за счет взаимодействия.

Слияния звезд и планет

Раз в несколько лет в Галактике (Мецгер и др. 2012). Новые оценки дают меньше.



Звездное излучение

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = -\frac{G(M_\star + M_{\text{SB}})}{r^3}\mathbf{r} + \frac{A_{\text{SB}}L_\star}{4\pi M_{\text{SB}}cr^2} \left\{ \left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}}{cr}\right) \frac{\mathbf{r}}{r} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right\} \\ \times \left[Q_{\text{abs}}\mathbb{I} + Q_{\text{ref}}\mathbb{I} + \left\{ \mathcal{H} \left(R_{\text{SB}} - \sqrt{\frac{K_{\text{SB}}P_{\text{SB}}^{(\text{spin})}}{\pi\rho_{\text{SB}}c_{\text{SB}}}} \right) \right\} w(Q_{\text{abs}} - Q_{\text{ref}})\mathbb{Y} \right].$$

- Торможение Пойнтинга-Робертсона
- Давление излучение
- Эффект Ярковского

Формирование звезды-гиганта само по себе может влиять, особенно на мелкие тела, т.к. резко возрастает светимость, и снеговая линия существенно смещается наружу.

Кроме того, для мелких тел (легче 100 кг) может быть важно разрушение звездным ветром.

Эффект Ярковского: насколько важен?

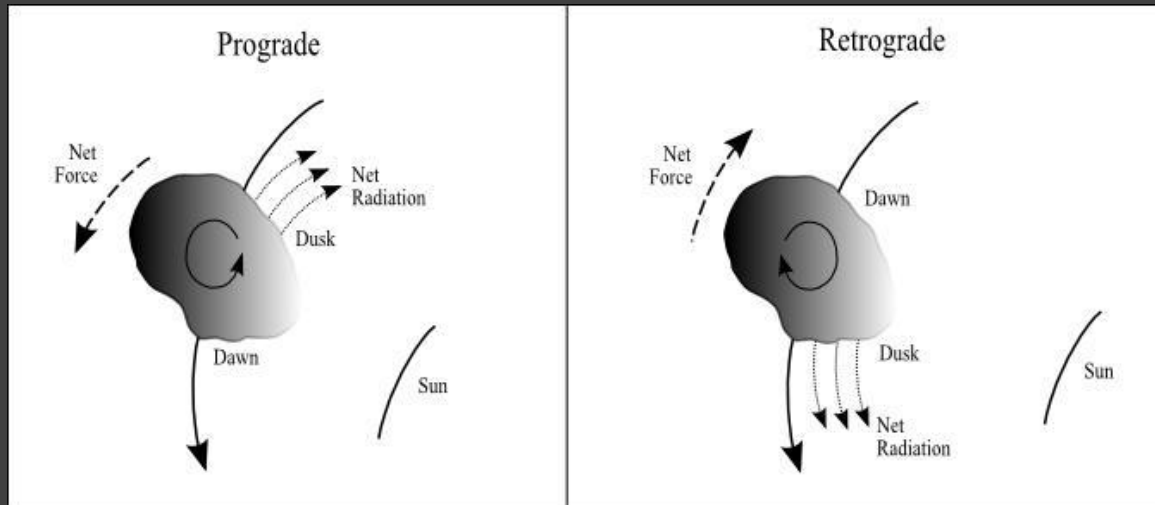
$$\left\langle \frac{de}{dt} \right\rangle^{(\text{Yarkovsky})} = \mathcal{O} \left(\frac{1}{c} \frac{A_{\text{SB}} L_{\star}}{8\pi M_{\text{SB}} n a^3} \right) \sim \frac{0.08}{\text{Myr}} \left(\frac{M_{\star}}{1M_{\odot}} \right)^{-1/2} \left(\frac{\rho_{\text{SB}}}{2 \text{ g cm}^{-3}} \right)^{-1} \\ \times \left(\frac{R_{\text{SB}}}{1 \text{ km}} \right)^{-1} \left(\frac{a}{5 \text{ AU}} \right)^{-3/2} \left(\frac{L_{\star}}{10^3 L_{\odot}} \right)$$

$$\left\langle \frac{de}{dt} \right\rangle^{(\text{PR+rp})} = \mathcal{O} \left(\frac{1}{c^2} \frac{5A_{\text{SB}} L_{\star}}{8\pi M_{\text{SB}} a^2} \right) \sim \frac{1.8 \times 10^{-5}}{\text{Myr}} \left(\frac{\rho_{\text{SB}}}{2 \text{ g cm}^{-3}} \right)^{-1} \\ \times \left(\frac{R_{\text{SB}}}{1 \text{ km}} \right)^{-1} \left(\frac{a}{5 \text{ AU}} \right)^{-2} \left(\frac{L_{\star}}{10^3 L_{\odot}} \right).$$

Однако заметьте, что эффект Ярковского не работает для небольших тел!

Эффект Ярковского

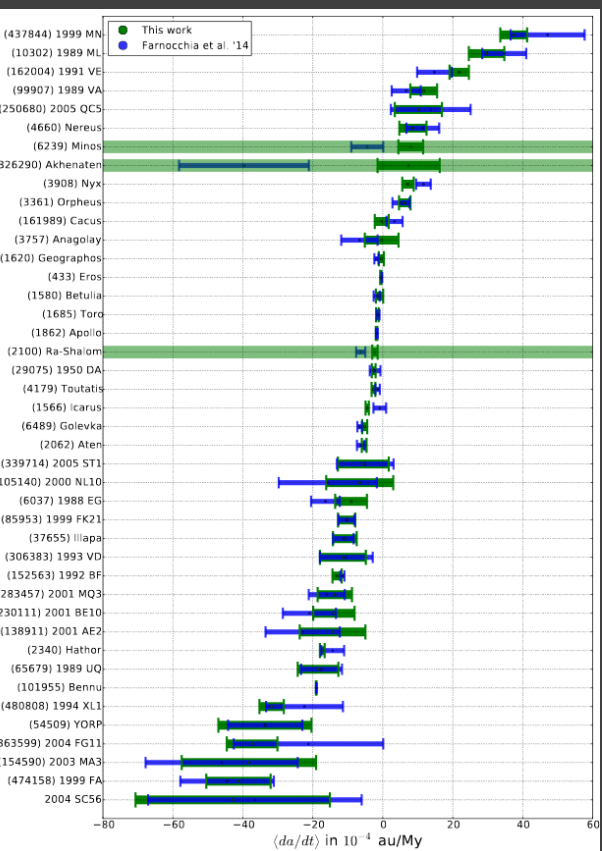
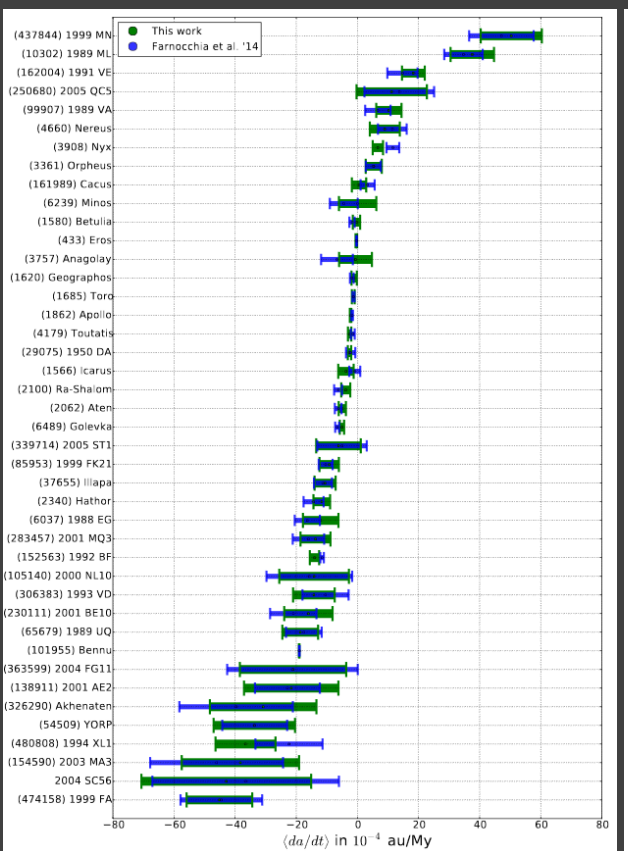
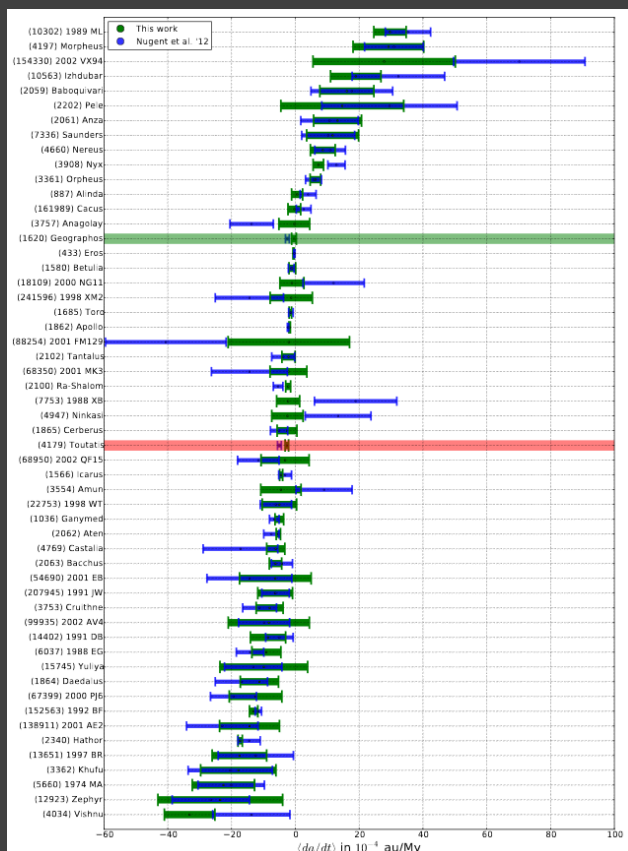
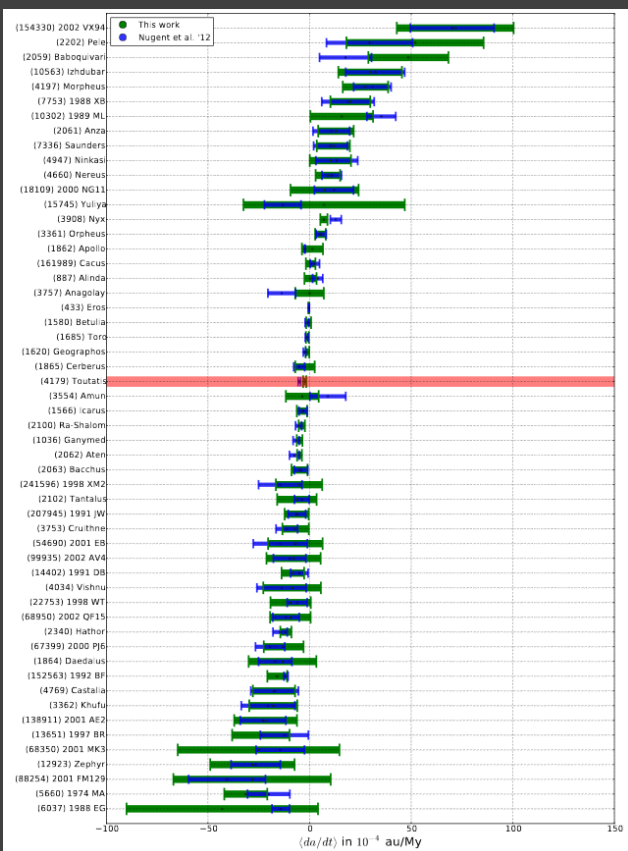
При таком вращении горячая часть будет разгонять объект. Т.е., орбита будет раскручивающейся спиралью.



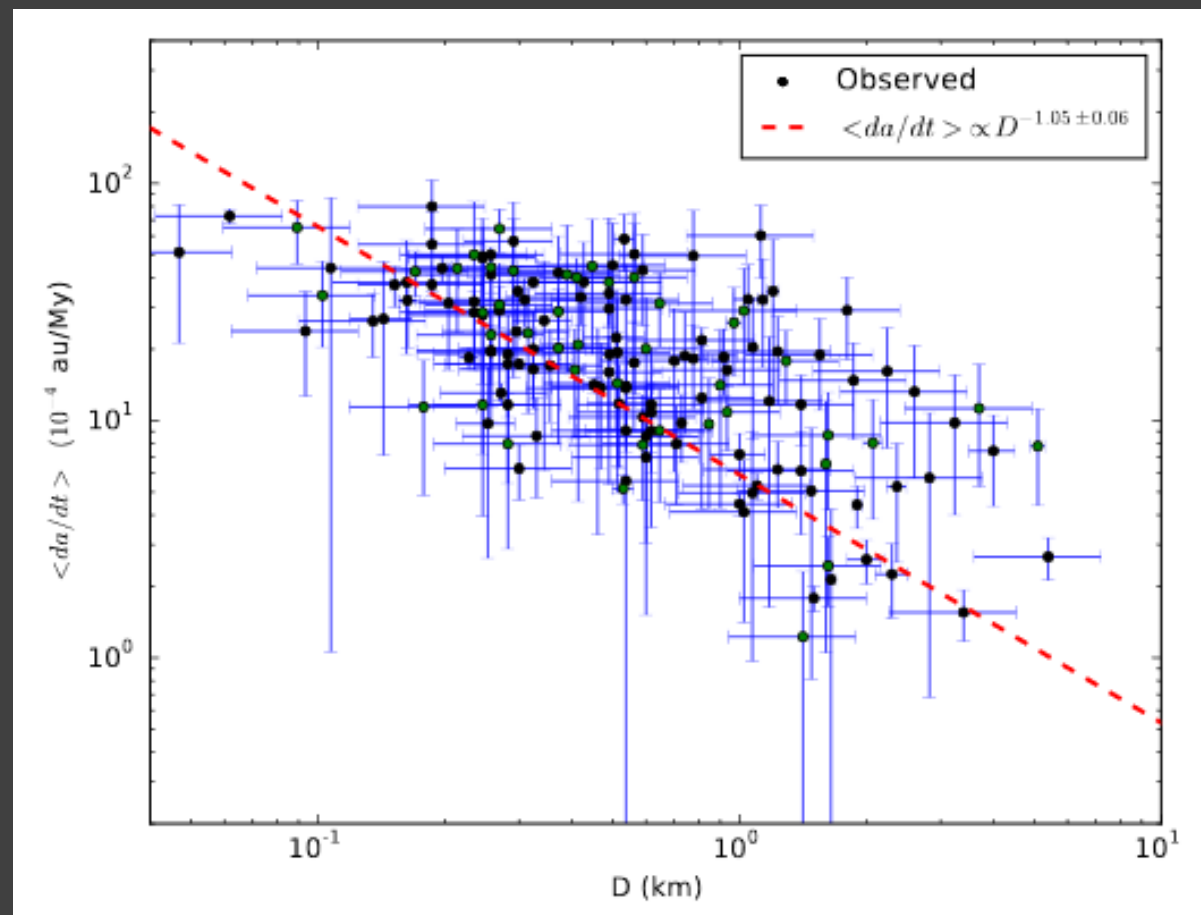
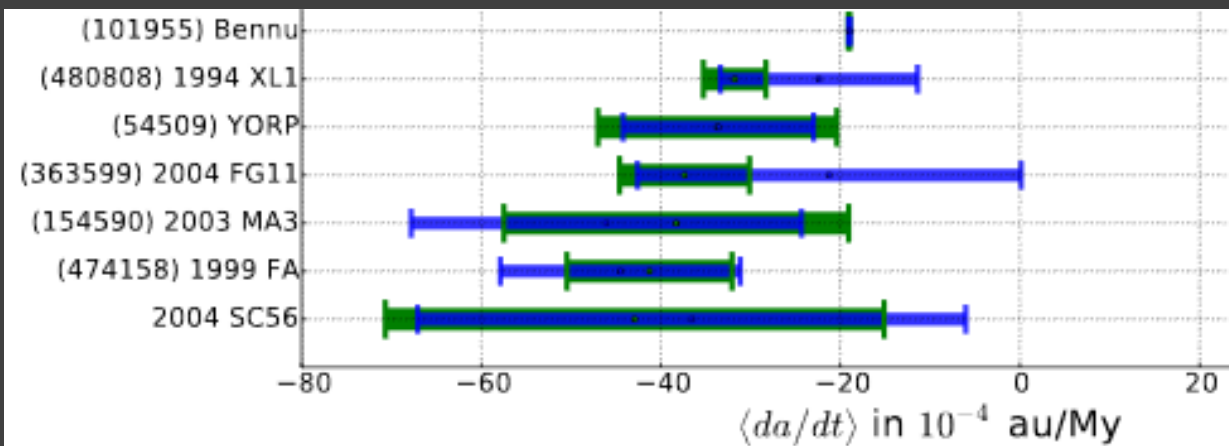
При обратном вращении тело будет тормозиться и приближаться к звезде.

Измерения эффекта Ярковского

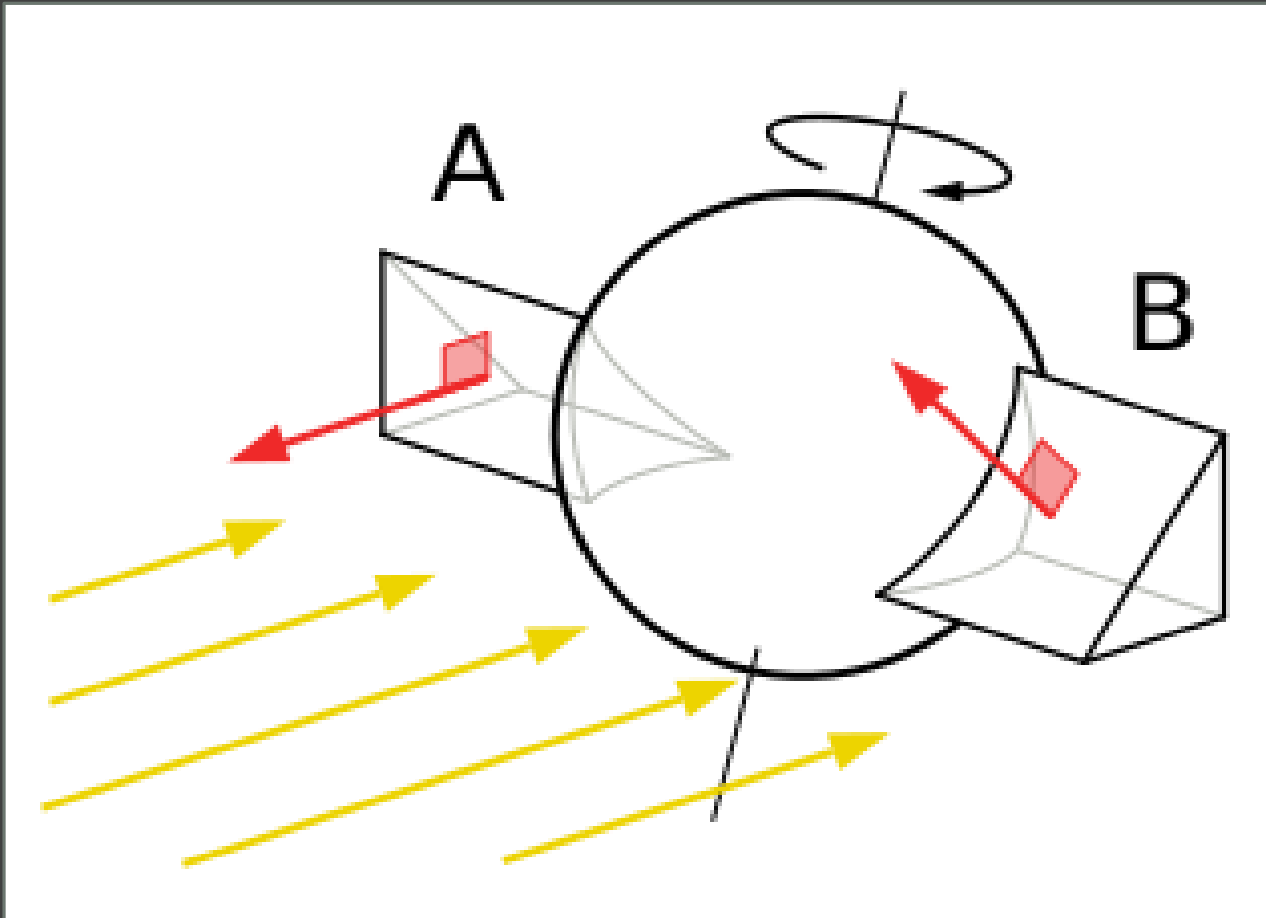
159 астероидов



Средний дрейф и его аппроксимация



YORP-эффeкт

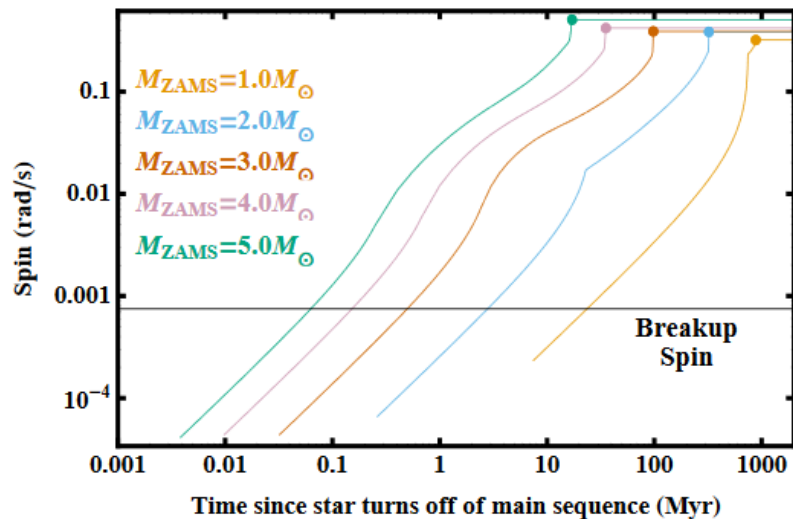


$$\left\langle \frac{ds_{SB}}{dt} \right\rangle = \frac{j}{2\pi\rho_{SB}R_{SB}^2} \left(\frac{1}{a^2\sqrt{1-e^2}} \right) \left(10^{17} \text{ kg m s}^{-2} \frac{L_{\star}}{L_{\odot}} \right),$$

$$s_{\text{crit}} = 2\pi \sqrt{\frac{G\rho_{SB}}{3\pi}} = 7.48 \times 10^{-4} \frac{\text{rad}}{\text{s}} \left(\frac{\rho_{SB}}{2 \text{ g cm}^{-3}} \right)^{1/2}$$

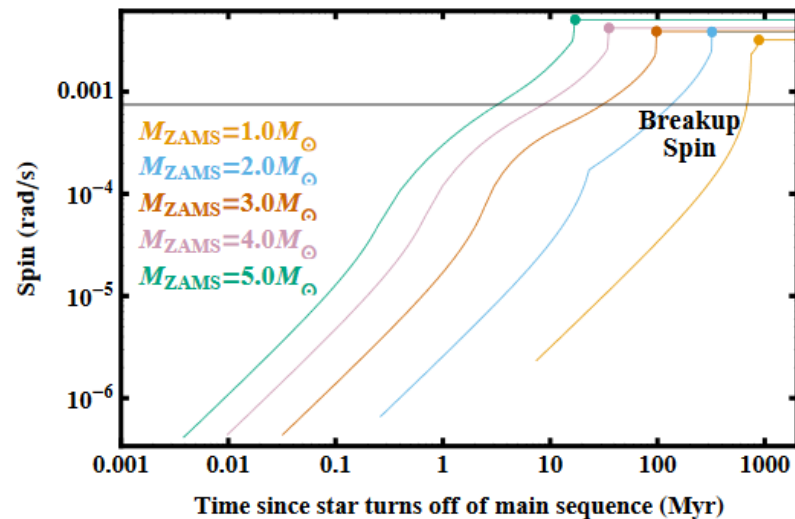
Spin evolution during giant branch phases

$a_0 = 3.0 \text{ au}, e = 0.00, Y = 0.01, R = 1 \text{ km}, \rho = 2 \text{ g/cm}^3$

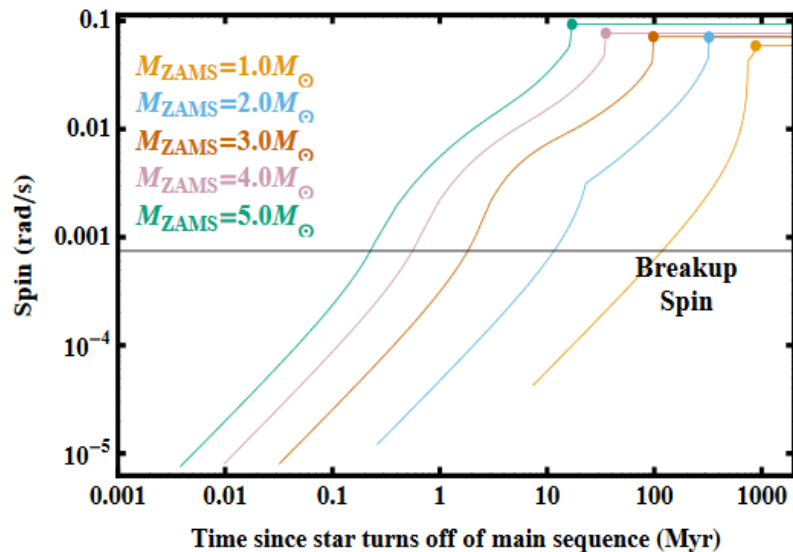


Spin evolution during giant branch phases

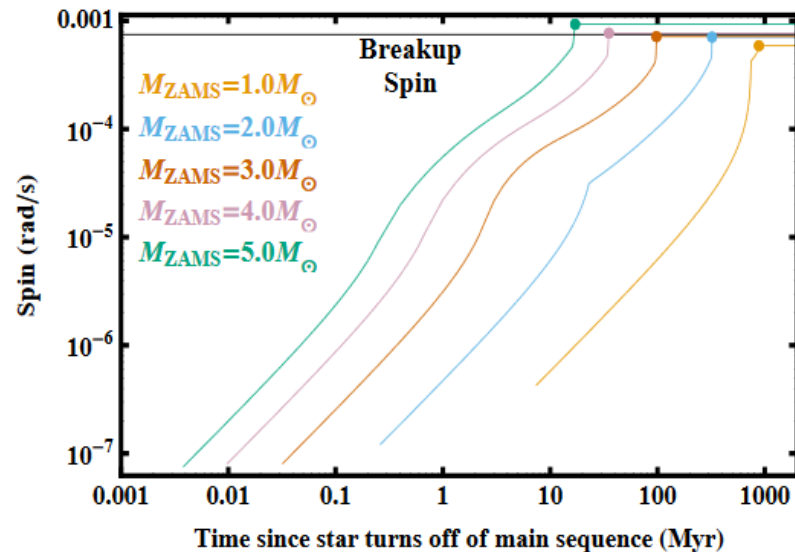
$a_0 = 3.0 \text{ au}, e = 0.00, Y = 0.01, R = 10 \text{ km}, \rho = 2 \text{ g/cm}^3$



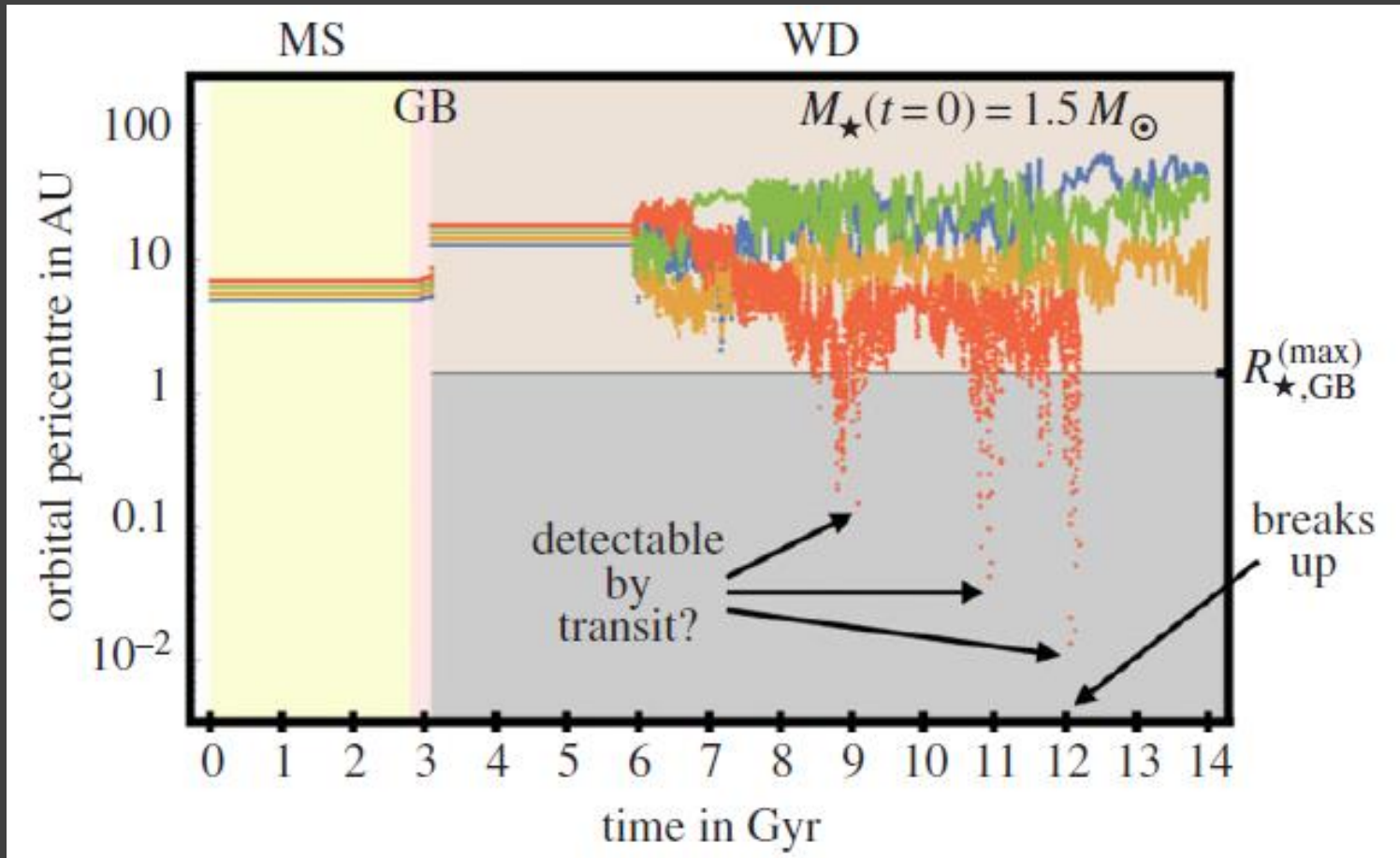
$a_0 = 7.0 \text{ au}, e = 0.00, Y = 0.01, R = 1 \text{ km}, \rho = 2 \text{ g/cm}^3$



$a_0 = 7.0 \text{ au}, e = 0.00, Y = 0.01, R = 10 \text{ km}, \rho = 2 \text{ g/cm}^3$



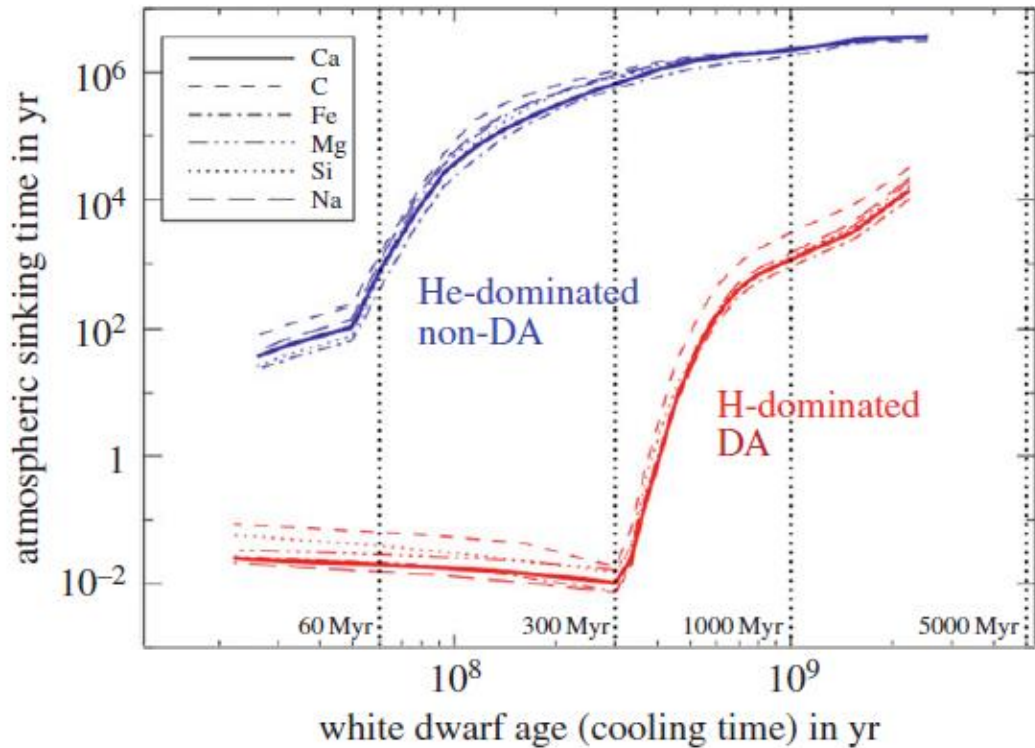
Неустойчивость после формирования БК



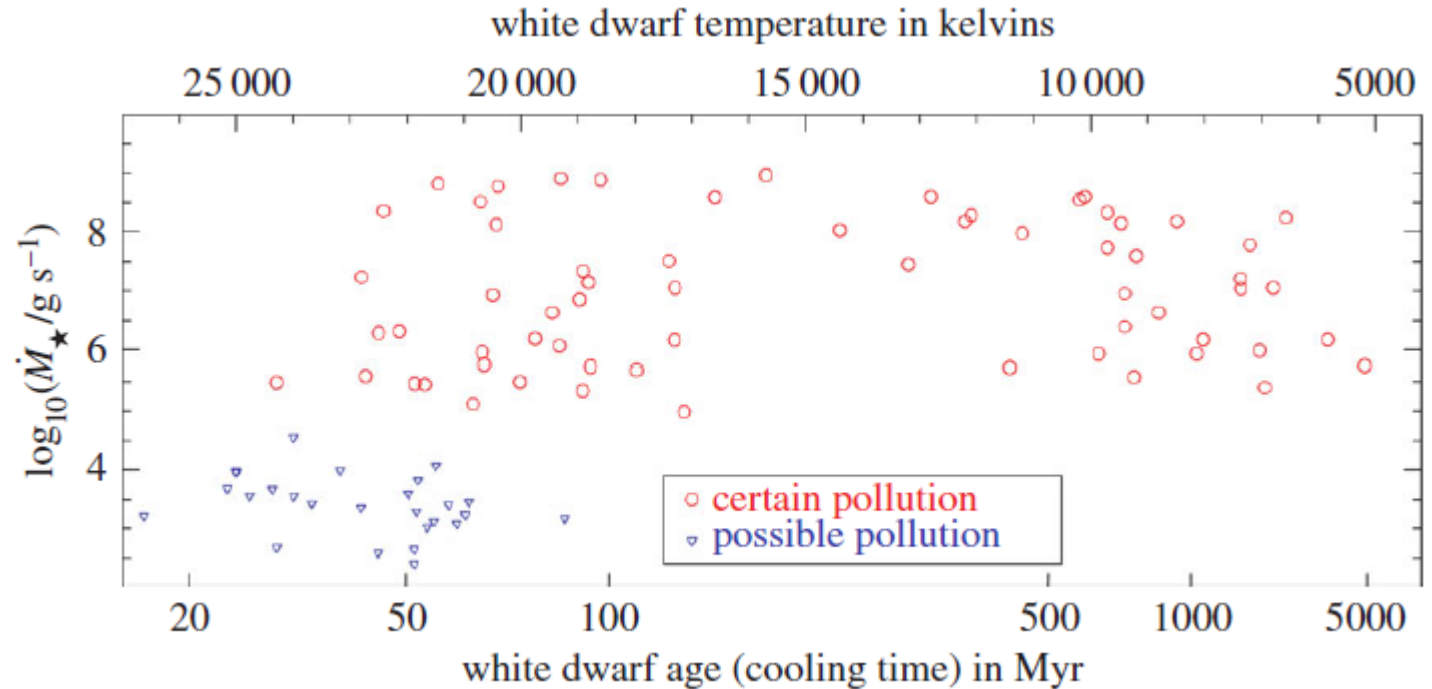
Рассмотрена система из четырех планет земной массы.

Система становится неустойчивой спустя несколько миллиардов лет после формирования белого карлика.

Загрязнение атмосферы БК и погружение аккрецированного вещества



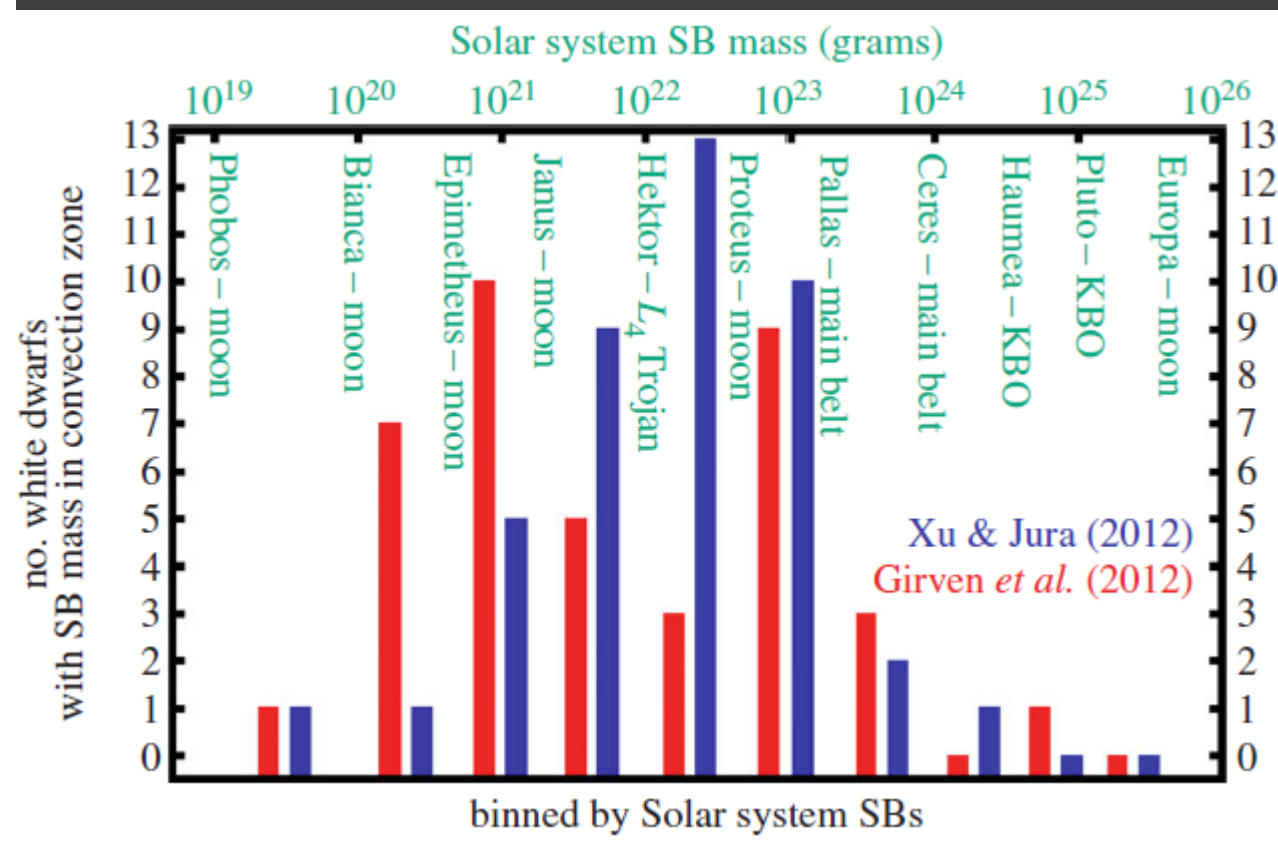
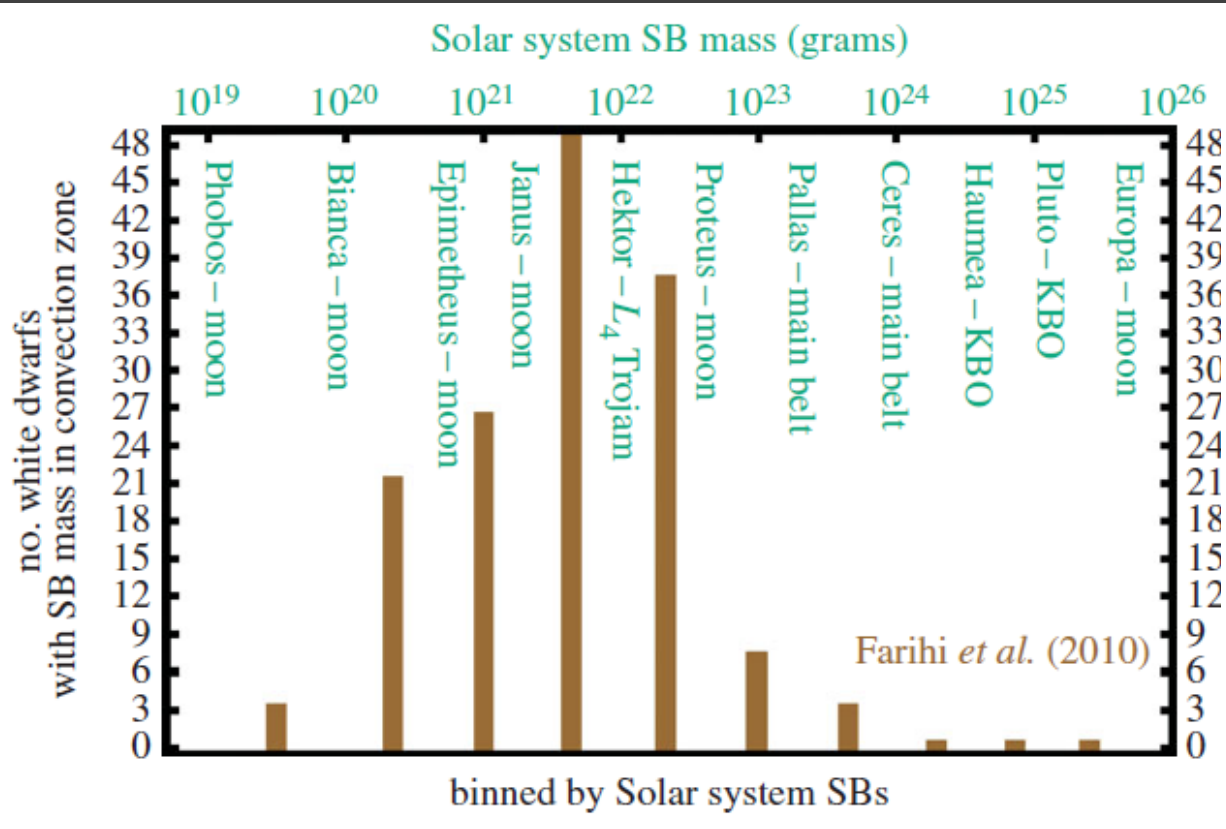
Чтобы поддерживать высокое содержание тяжелых элементов в атмосфере БК, необходимо постоянно аккрецировать вещество. Количество нападавшего вещества можно оценить по спектрам.



Аккрецируемые тяжелые элементы быстро тонут.

Сколько эти БК нааккрецировали?

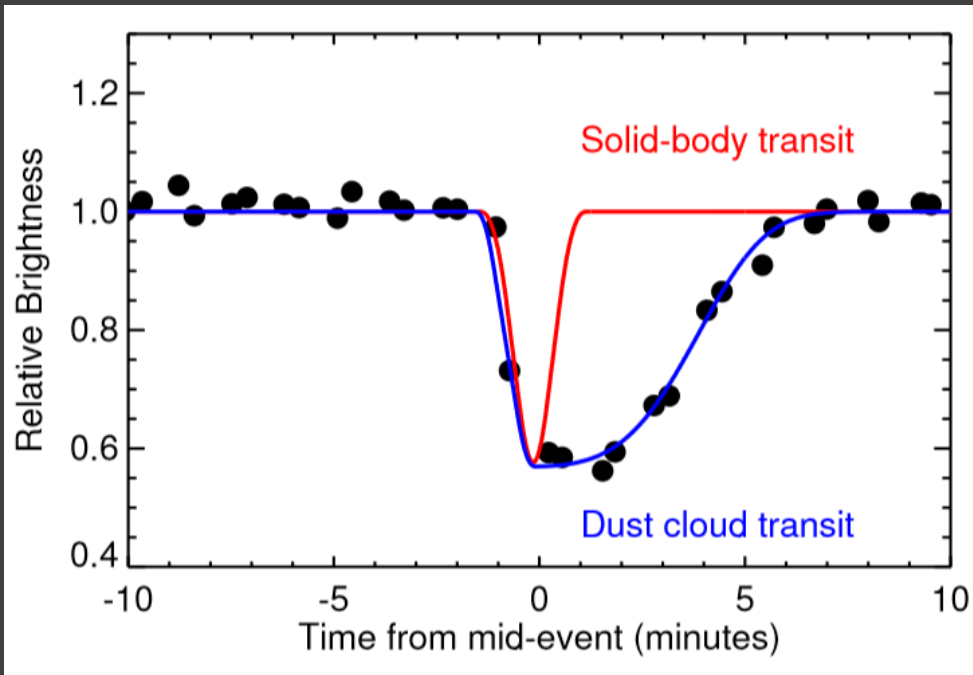
Аккреция суммирована за период порядка миллиона лет.



Линия Кальция. Предполагается, что кальций составляет 1.6% массы.

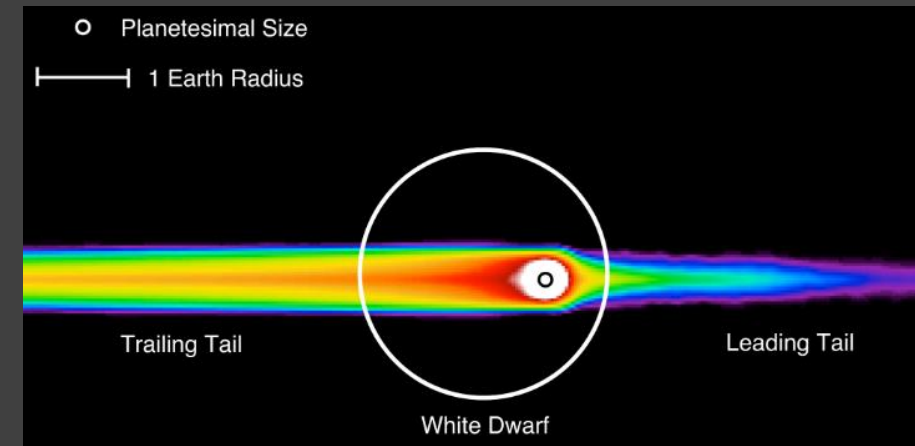
Veras (2016)

Разрушение планеты белым карликом



Удалось пронаблюдать транзиты газопылевых облаков. Кроме того, видны аномалии в спектре белого карлика.

Наиболее вероятно, что было разорвано тело планетной массы. Хотя, может быть, и несколько тел типа крупных астероидов.



Планеты вокруг нейтронных звезд

Как образовать:

- Выжившие планеты
- Диск после возвратной аккреции
- Испарение компаньона
- Приливной разрыв компаньона

См. детальное обсуждение механизмов образования планет вокруг НЗ в Martin et al. (2016) arXiv: 1609.06409.

$$a^{(NS)} = \left[a^{(MS)} \frac{M_{\star}^{(NS)} + M_{SB}}{M_{\star}^{(MS)} + M_{SB}} \right]$$

$$\times \left[1 - \frac{2(1 + e^{(MS)} \cos f^{(MS)})}{1 - e^{(MS)2}} \left(\frac{M_{\star}^{(MS)} - M_{\star}^{(NS)}}{M_{\star}^{(MS)} + M_{SB}} \right) - \frac{a^{(MS)}(v^{(NS)2} - v^{(MS)2})}{G(M_{\star}^{(MS)} + M_{SB})} \right]^{-1}$$

$$e^{(NS)2} = 1 - (1 - e^{(MS)2})$$

$$\times \left[\frac{M_{\star}^{(NS)} + M_{SB}}{M_{\star}^{(MS)} + M_{SB}} \right]^{-2} \left[1 - 2 \left(\frac{M_{\star}^{(MS)} - M_{\star}^{(NS)}}{M_{\star}^{(MS)} + M_{SB}} \right) \left(\frac{1 + e^{(MS)} \cos f^{(MS)}}{1 - e^{(MS)2}} \right) \right]$$

$$M_{\star}^{(MS)} - M_{\star}^{(NS)} > \left[\frac{M_{\star}^{(MS)} + M_{SB}}{2} \right] \left(\frac{1 - e^{(MS)2}}{1 + e^{(MS)} \cos f^{(MS)}} \right) \left(1 - \frac{a^{(MS)}(v^{(NS)2} - v^{(MS)2})}{G(M_{\star}^{(MS)} + M_{SB})} \right)$$

В каталогах

Planet	Mass (M_{Jup})	Radius (R_{Jup})	Period (day)	a (AU)	e	i (deg)	Ang. dist. (arcsec)	Discovery	Update
PSR B0943+10 c	2.6	—	1460	2.9	—	—	—	2014	2017-10-26
PSR B0943+10 b	2.8	—	730	1.8	—	—	—	2014	2017-10-26
PSR B0329+54 b	0.0062	—	10139.34	10.26	0.236	—	—	2017	2017-10-25
PSR 0636 b	8	—	0.067	—	—	—	—	2016	2016-10-28
PSR B1957+20 b	22	—	0.38	—	—	—	—	1988	2016-07-23
PSR J1807-2459 A b	9.4	—	0.07	—	0	—	—	2000	2015-10-29
PSR J2241-5236 b	12	—	0.1456722395	—	0	—	—	2011	2015-10-26
PSR J2051-0827 b	28.3	—	0.099110266	—	0	—	—	1996	2015-10-26
PSR 1257 12 d	0.012	—	98.2114	0.46	0.0252	47	0.00092	1992	2014-02-25
PSR 1257 12 c	0.013	—	66.5419	0.36	0.0186	53	0.00072	1992	2014-02-25
PSR 1257 12 b	0.00007	—	25.262	0.19	0	—	0.00038	1992	2014-02-25
PSR B1620-26 b	2.5	—	36525	23	—	—	0.006053	2003	2013-07-11
PSR 1719-14 b	1	0.4	0.090706293	0.0044	0.06	—	—	2011	2012-07-24

Exoplanets.eu

vs.

Exoplanets.org

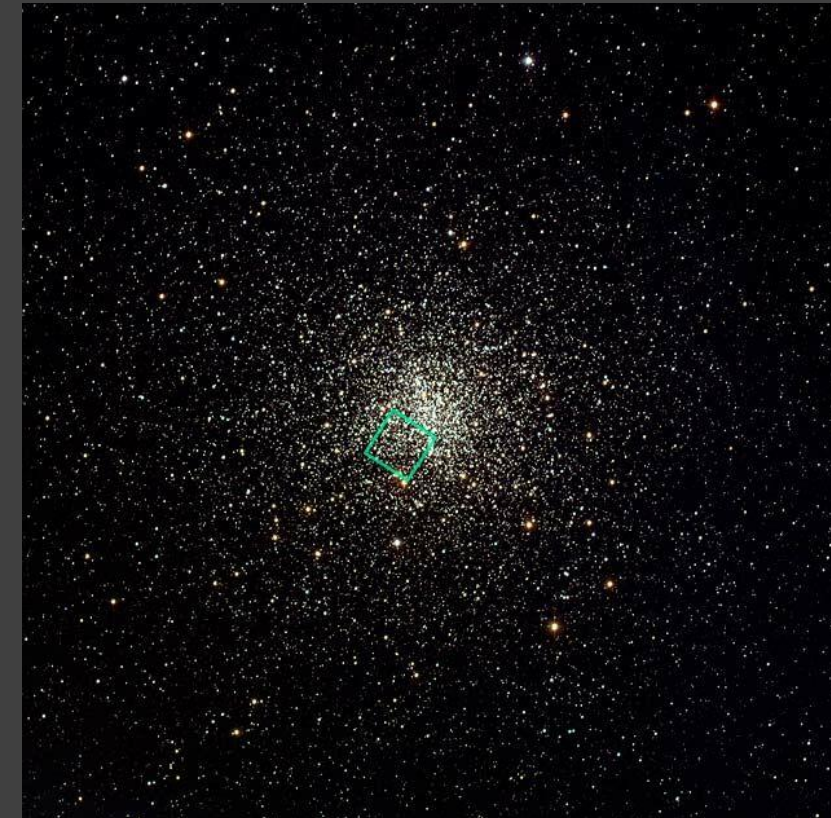
Name	$M \sin(i)$ mjupiter \pm	Semi-Major Axis au \pm	Orbital Period day \pm	Orbital Eccentricity \pm	ω deg \pm	Time of Periastron jd \pm	Velocity Semiamplitude m/s \pm	Orbit Reference	First Reference
PSR B1257+12 B		0.3214	66.54190	0.01860	250.40	2449768.10		Konacki 2003	Wolszczan 1992
PSR B1257+12 C		0.4166	98.21140	0.02520	108.30	2449766.50		Konacki 2003	Wolszczan 1994
PSR B1257+12 A		0.1685	25.2620	0	90	2449765.10		Konacki 2003	Wolszczan 1992

Вокруг пульсара

PSR B1620-26

Пульсар (нейтронная звезда) в паре с белым карликом. Вокруг этой пары крутится планета с массой 2.5 массы Юпитера.

Предполагается, что планета со звездой были захвачены нейтронной звездой в двойной системе. Партнер нейтронной звезды был вышвырнут. Затем оставшаяся звезда превратилась в белого карлика, и сформировалась наблюдаемая сейчас система.



Столкновение миров

Авторы исследовали большую выборку старых (~ 1 Gyr) звезд с избытком инфракрасного излучения. Наилучшим объяснение таких свойств является столкновение крупных твердых тел типа Земли. Примером такого столкновения в истории Солнечной системы может быть формирование Луны.

