

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ГОРЯЧИХ ЮПИТЕРОВ

ЛАЗОВИК ЯРОСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ⁽¹⁾,

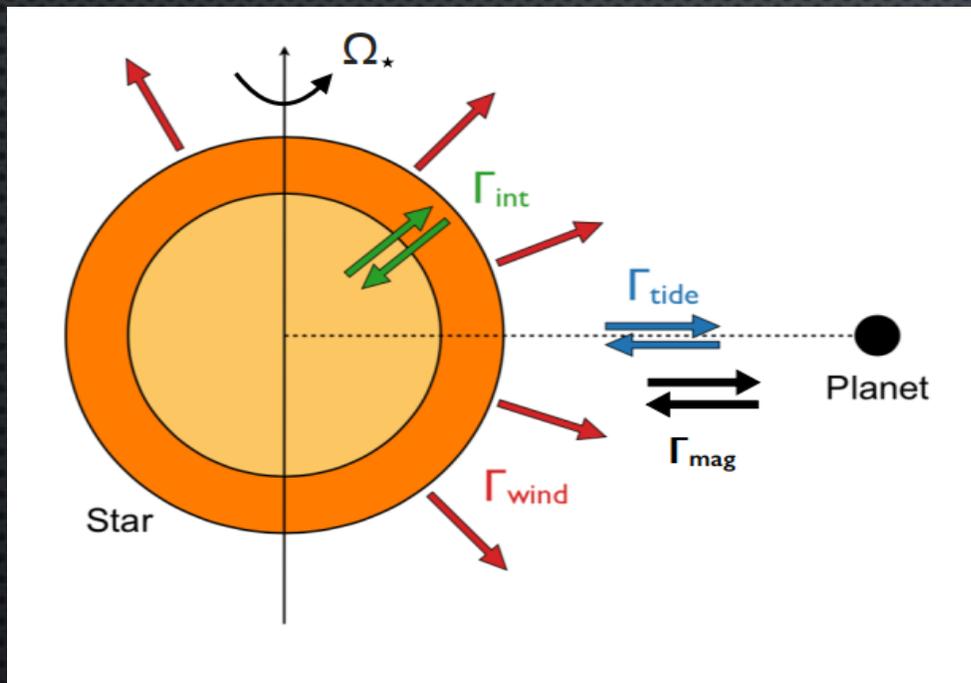
1 – ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.К.ШТЕРНБЕРГА

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

ТРЕБУЕТСЯ РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ,
ОПИСЫВАЮЩИХ ДИНАМИКУ ПОПУЛЯЦИИ
ЭКЗОПЛАНЕТ ПОСЛЕ ДИССИПАЦИИ
ПРОТОПЛАНЕТНОГО ДИСКА



ТИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМАХ «ЗВЕЗДА-ПЛАНЕТА»



1. ВНУТРЕННИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗВЕЗДАХ
2. ЗВЕЗДНЫЙ ВЕТЕР
3. ПРИЛИВНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
4. МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
5. ПОТЕРЯ ВЕЩЕСТВА:
 - ФОТОИСПАРЕНИЕ
 - ЗАПОЛНЕНИЕ ПОЛОСТИ РОША

ЗВЕЗДНЫЙ ВЕТЕР

$$M_* = 1M_{\odot}, [\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$$

ЗАКОН ТОРМОЖЕНИЯ – AMARD ET AL. (2019):

$$\Gamma_{wind} = \begin{cases} -\Gamma_0 \chi^p \frac{\Omega}{\Omega_{\odot}}, & Ro = \frac{1}{\tau_{cz} \Omega} \leq Ro_{SAT} \\ -\Gamma_0 \chi^p \left(\frac{\tau_{cz}}{\tau_{cz\odot}}\right)^p \left(\frac{\Omega}{\Omega_{\odot}}\right)^{p+1}, & Ro = \frac{1}{\tau_{cz} \Omega} > Ro_{SAT} \end{cases}$$

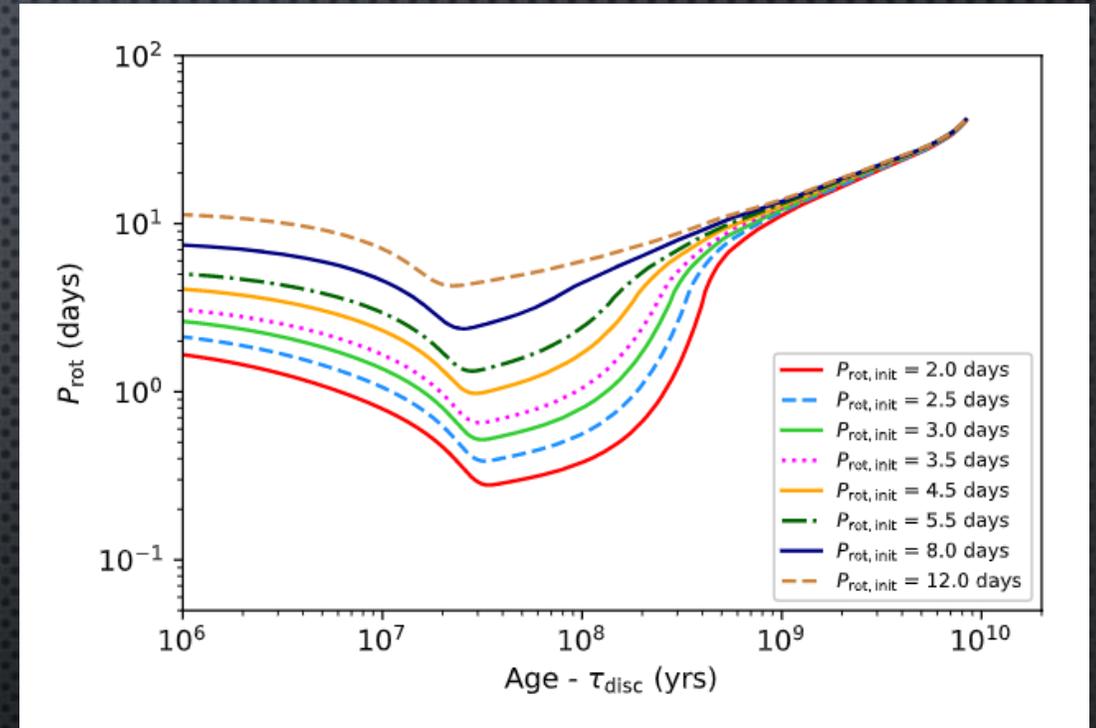
$$\Gamma_0 = K \left(\frac{R_*}{R_{\odot}}\right)^{3.1} \left(\frac{M_*}{M_{\odot}}\right)^{0.5} \gamma^{-2m}$$

$$\gamma = \sqrt{1 + \left(\frac{u}{0.072}\right)^2}$$

$$u = \frac{v}{v_{crit}}$$

Gossage et al. (2021)

| K | m | χ | Ro_{sat} | p |
|-------------------------|------|--------|------------|-----|
| $1.5 \cdot 10^{30}$ эрг | 0.22 | 14 | 0.14 | 2.3 |



Период вращения звезды как функция времени с момента диссипации диска

M_* – масса звезды;

R_* – радиус звезды;

Ω – угловая скорость вращения звезды;

τ_{cz} – время конвективного перемешивания

ПРИЛИВНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

1. КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ПРИЛИВЫ (Q'_{eq})

2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИЛИВЫ

- ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ (Q'_{iw}) –
ПРИ $2P_{orb} > P_{rot}$
- ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ (Q'_{gw}) –
ПРИ $M_{pl} > M_{crit}(P_{orb}, M_*, t)$

$$\frac{1}{Q'} = \frac{1}{Q'_{eq}} + \frac{1}{Q'_{iw}} + \frac{1}{Q'_{gw}}$$

$$\frac{1}{a} \left(\frac{da}{dt} \right)_t = \frac{\Omega - n}{|\Omega - n|} \frac{9n}{2} \left(\frac{M_{pl}}{M_*} \right) \left(\frac{R_*}{a} \right)^5 \frac{1}{Q'}$$

Q' – ПАРАМЕТР ПРИЛИВНОЙ ДИССИПАЦИИ
(ОПРЕДЕЛЯЕТ ТЕМП МИГРАЦИИ ПЛАНЕТЫ);

I_* – МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ЗВЕЗДЫ;

M_{pl} – МАССА ПЛАНЕТЫ;

n – УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ ПЛАНЕТЫ;

a – ОРБИТАЛЬНЫЙ РАДИУС.

Расчет темпов диссипации приливной энергии – Barker (2020) и Lazovik (2021).

ПРИЛИВНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

$M_* = 1M_{\odot}$, $P_{rot} = 4.5$ сут., $P_{orb} = 1$ сут., $[Fe/H] = +0.2$

ПРИЛИВНОЙ ФАКТОР Q' :

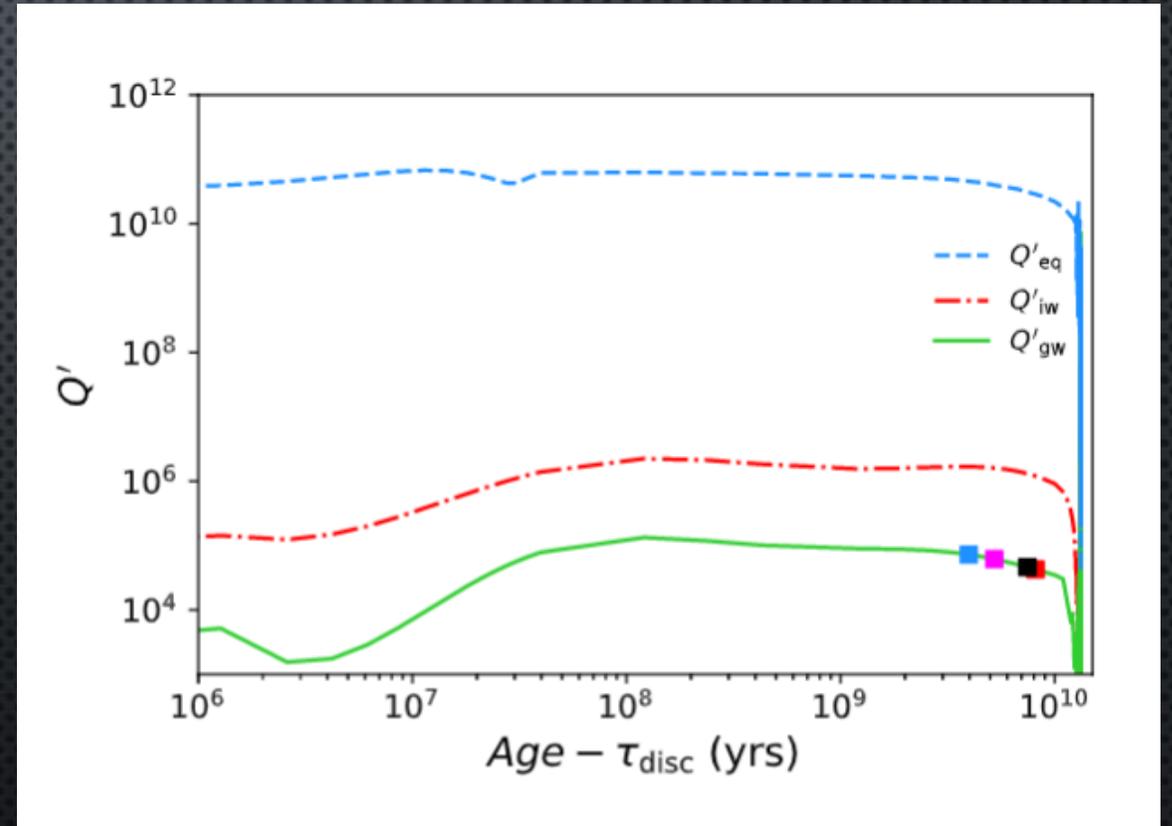
$$\frac{1}{Q'_{eq}} = \frac{16\pi G}{3(2l+1)R_*^{2l+1}|A|^2} \frac{D_v}{|w_t|}$$

$$\frac{1}{Q'_{iw}} = \frac{32\pi^2 G}{3(2l+1)R_*^{2l+1}|A|^2} (E_l + E_{l-1} + E_{l+1}) \propto \Omega^2$$

$$\frac{1}{Q'_{gw}} = \frac{2 \left[\Gamma\left(\frac{1}{3}\right) \right]^2}{3^{\frac{1}{3}}(2l+1)(l(l+1))^{\frac{4}{3}}} \frac{R_*}{GM_*^2} \mathcal{G} |w_t|^{\frac{8}{3}}$$

$$\frac{1}{Q'} = \frac{1}{Q'_{eq}} + \frac{1}{Q'_{iw}} + \frac{1}{Q'_{gw}}$$

Подробности – в статье Barker (2020)



Эволюция приливного фактора. Цветные квадраты – начало диссипации гравитационных волн для $M_{pl} = 10, 3, 1, 0.3 M_J$ (слева направо)

МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

$$\frac{1}{a} \left(\frac{da}{dt} \right)_m = \frac{\Omega_* - n}{|\Omega_* - n|} \frac{2c_d p}{I_{pl} n} A_{eff}$$

$$I_{pl} = M_{pl} a^2 \quad p \approx \frac{B_{wind}^2}{8\pi}$$

$$c_d \approx \frac{M_a}{\sqrt{M_a^2 + 1}} \quad M_a = \frac{v}{v_a} = \frac{a |\Omega_* - n| \sqrt{4\pi \rho_{wind}}}{B_{wind}}$$

$$A_{eff} = \begin{cases} (10.8 M_a^{-0.56} \Lambda_{pl}^{0.28}) \pi R_{pl}^2, & \Lambda_{pl} > 1 \\ \pi R_{pl}^2, & \Lambda_{pl} \leq 1 \end{cases}$$

$$\Lambda_{pl} = \left(\frac{B_{pl}}{B_{wind}} \right)^2$$

c_d – КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ;

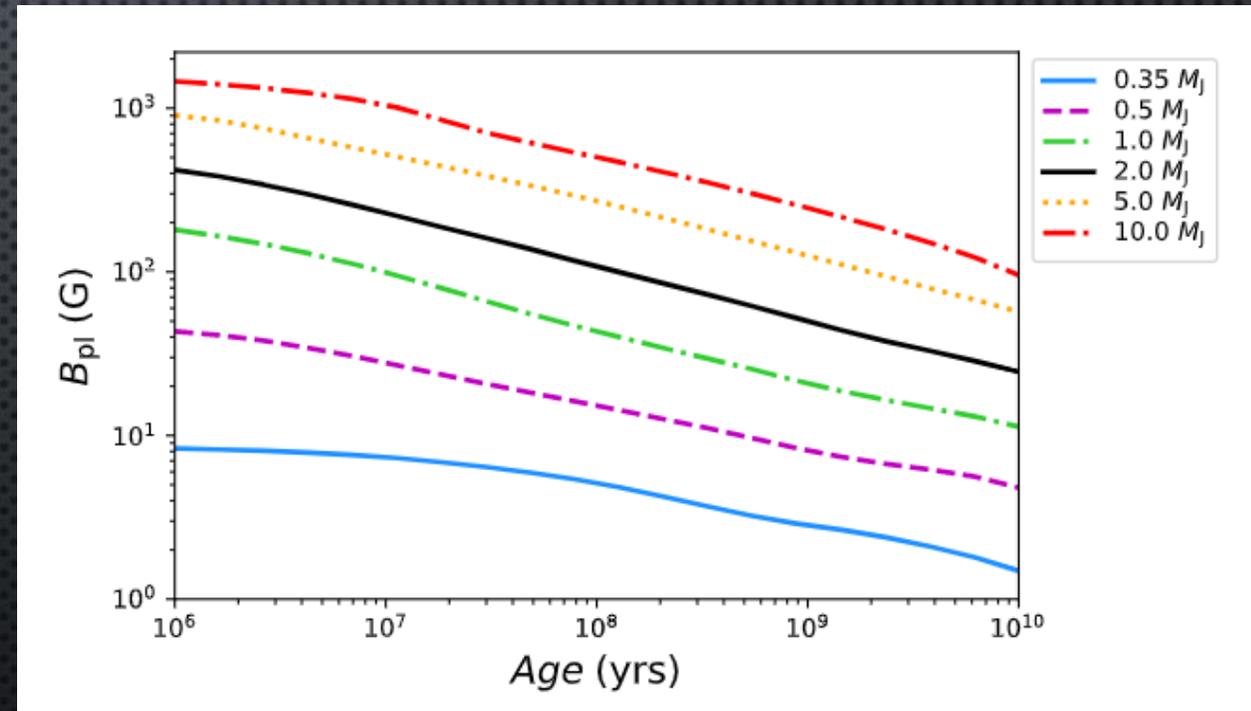
A_{eff} – ЭФФЕКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ;

B_{wind} И ρ_{wind} – ЛОКАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПЛОТНОСТИ ЗВЕЗДНОГО ВЕТРА;

B_{pl} – НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛАНЕТЫ НА ЭКВАТОРЕ

МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

1. НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛАНЕТЫ ВЫЧИСЛЕНА СОГЛАСНО ПОДХОДУ HORI (2021) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ГОРЯЧИХ ЮПИТЕРОВ, ПОСТРОЕННЫХ КОДОМ MESA
2. ЛОКАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЗВЕЗДНОГО ВЕТРА – ИЗ МОДЕЛЕЙ STARAML (REVILLE ET AL. (2015))
3. НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗВЕЗДЫ – ИЗ КАЛИБРОВКИ AUIR ET AL. (2021)



Эволюция экваториальной напряженности магнитного поля планеты

ПОТЕРЯ ВЕЩЕСТВА

$$\frac{1}{a} \left(\frac{da}{dt} \right)_{ML} \approx - \frac{\chi}{M_{pl}} \left(\frac{dM_{pl}}{dt} \right) \quad \chi - \text{ДОЛЯ УГЛОВОГО МОМЕНТА ТЕРЯЕМОГО ВЕЩЕСТВА, ВОЗВРАЩЕННОГО НА ОРБИТУ}$$

1. Фотоиспарение $\left(\frac{dM_{pl}}{dt} \right)_{PE}$

$$\left(\frac{dM_{pl}}{dt} \right)_{PE,1} = - \eta \frac{3F_{XUV}}{4GK\rho_{pl}}$$

$$\left(\frac{dM_{pl}}{dt} \right)_{PE,2} = -4\pi\rho_s c_s r_s^2$$

$$K = 1 - \frac{3}{2\phi} + \frac{1}{2\phi^3}, \quad \phi = \frac{R_{RL}}{R_{pl}}$$

η – эффективность фотоиспарения

ρ_{pl} – средняя плотность планеты;

F_{XUV} – поток XUV излучения;

c_s – скорость звука;

r_s – радиус звуковой поверхности;

ρ_s – плотность атмосферы планеты в области звуковой поверхности

R_{RL} – радиус полости Роша

Эффективность фотоиспарения η вычисляется согласно Caldiroli et al. (2021)

r_s, c_s, ρ_s вычисляются согласно Murray-Clay et al. (2009)

Калибровка L_{XUV} взята из Johnstone et al. (2021)

ПОТЕРЯ ВЕЩЕСТВА

2. Перенос вещества при заполнении полости Роша $\left(\frac{dM_{pl}}{dt}\right)_{RLO}$ $a_R = f_p R_{pl} \left(\frac{M_*}{M_{pl}}\right)^{1/3}$

При достижении планетой предела Роша a_R $\left(\frac{da}{dt}\right)_{tm} = \left(\frac{da}{dt}\right)_t + \left(\frac{da}{dt}\right)_m$

$$\frac{1}{M_{pl}} \left(\frac{dM_{pl}}{dt}\right)_{RLO} = \frac{\frac{1}{a} \left(\frac{da}{dt}\right)_{tm} (2\kappa + 1) - \frac{\kappa}{L} \left(\frac{dL}{dt}\right)}{\xi - \frac{1}{3} + 2\chi(2\kappa + 1)}$$

$$\kappa = \frac{d \ln R_{pl}}{d \ln F} \quad \xi = \frac{d \ln R_{pl}}{d \ln M_{pl}}$$

$$f_p = 3^{1/3}, \quad \chi = 0.5$$

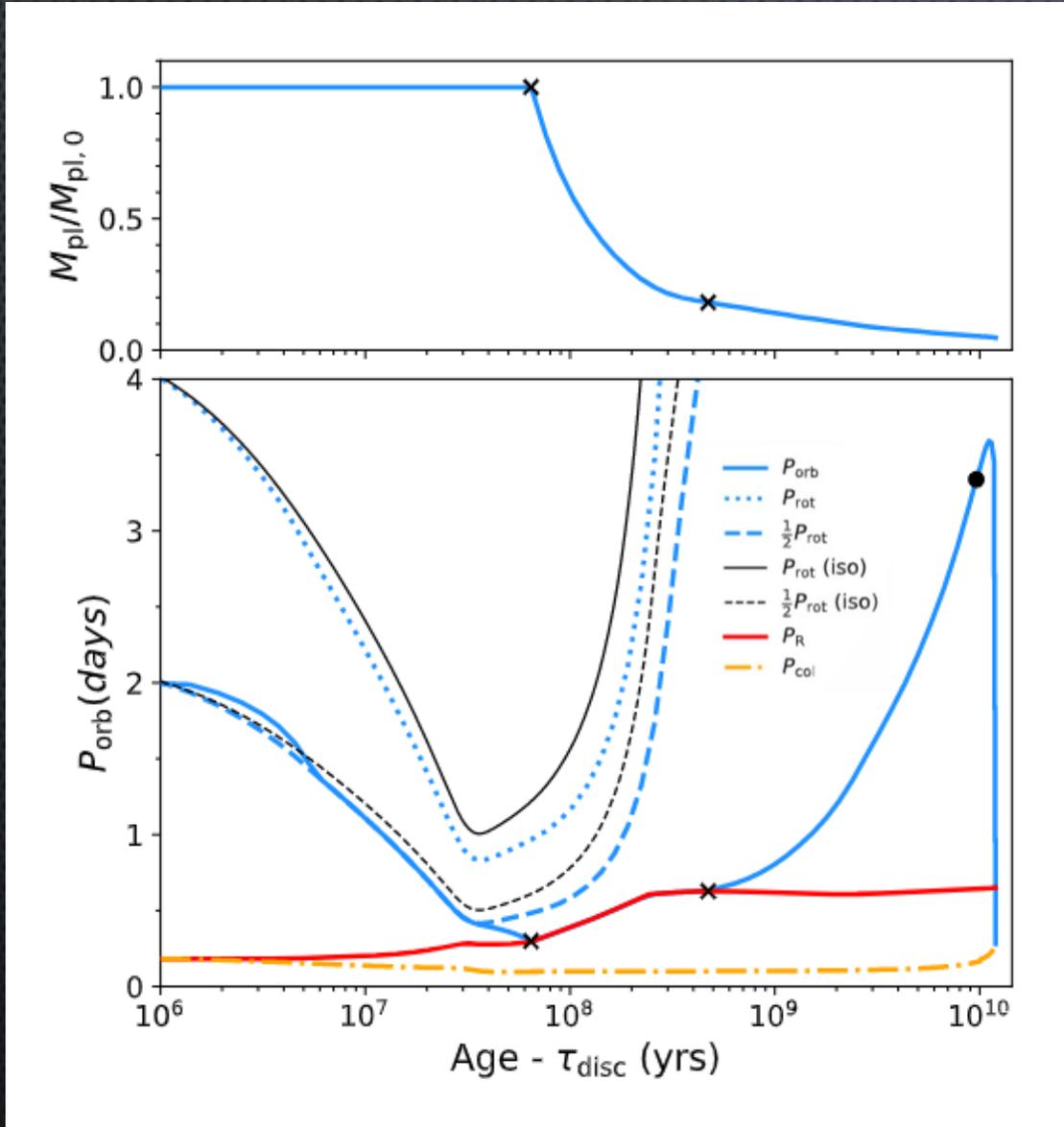
ИТОГОВАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ

$$\left(\frac{da}{dt}\right) = \left(\frac{da}{dt}\right)_t + \left(\frac{da}{dt}\right)_m + \left(\frac{da}{dt}\right)_{ML}$$

$$\left(\frac{d\Omega}{dt}\right) = \frac{1}{I_*} \left(\Gamma_{wind} - \Omega_* \left(\frac{dI_*}{dt}\right) - \frac{1}{2a} \left(\frac{da}{dt}\right)_{tm} I_{pl}^n \right)$$

$$\left|\frac{dM_{pl}}{dt}\right| = \text{MAX} \left(\left|\frac{dM_{pl}}{dt}\right|_{RLO}, \left|\frac{dM_{pl}}{dt}\right|_{PE} \right)$$

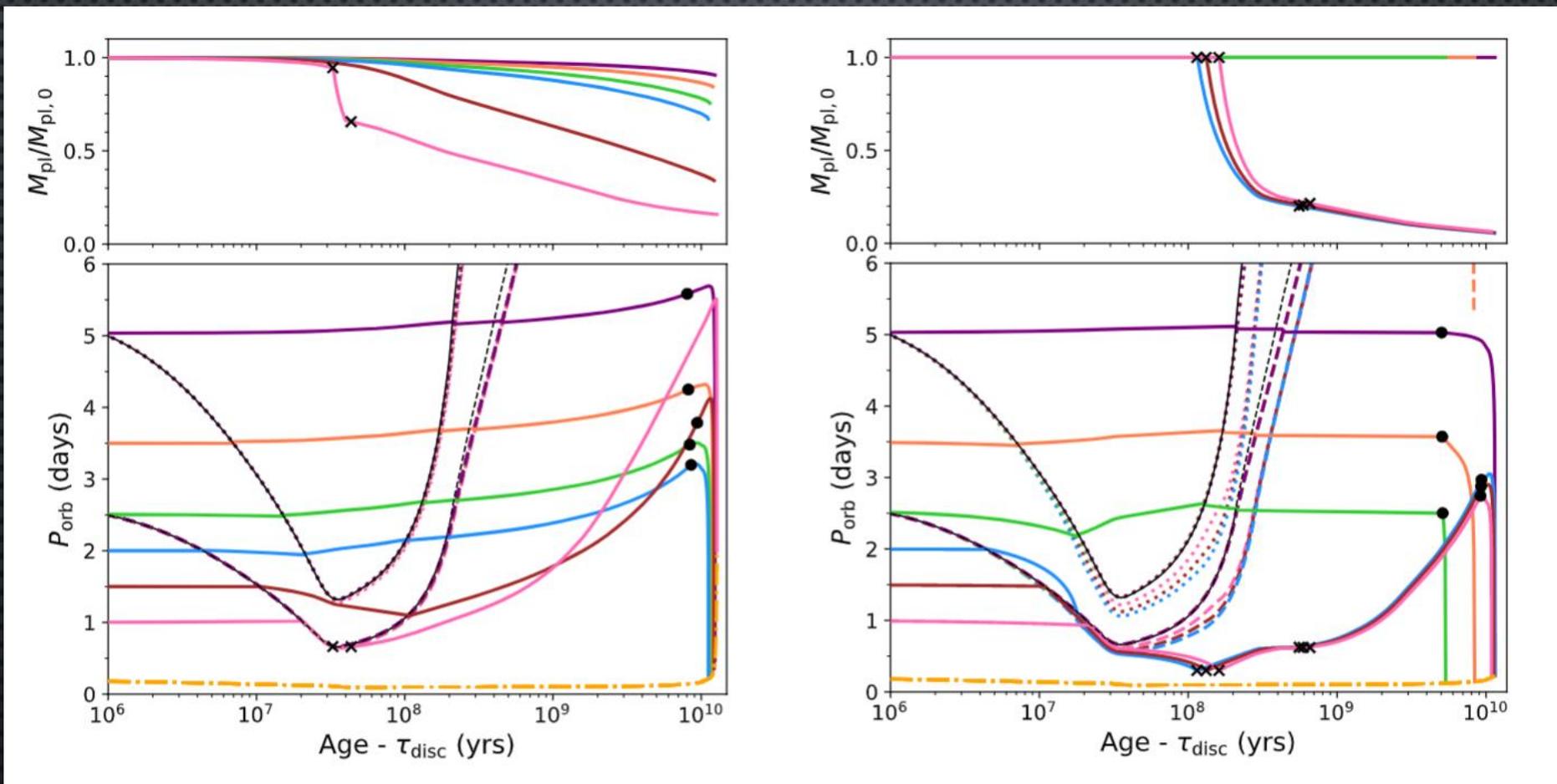
ПРИМЕР ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ СИСТЕМЫ «ЗВЕЗДА-ПЛАНЕТА»



Сплошная синяя линия – перемещение планеты;
Синяя штриховая линия – коротационный радиус;
Синяя пунктирная линия – граница области возбуждения инерциальных волн;
Красная линия – предел Роша;
Желтая штрих-пунктирная линия – поверхность звезды
Черная точка – момент начала диссипации гравитационных волн;
Черные кресты ограничивают фазу заполнения полости Роша.

Эволюция массы и орбитальный трек горячего юпитера с $M_{\text{pl},0} = 2 M_J$, обращающегося вокруг звезды солнечной массы с $P_{\text{rot},0} = 4.5$ сут.

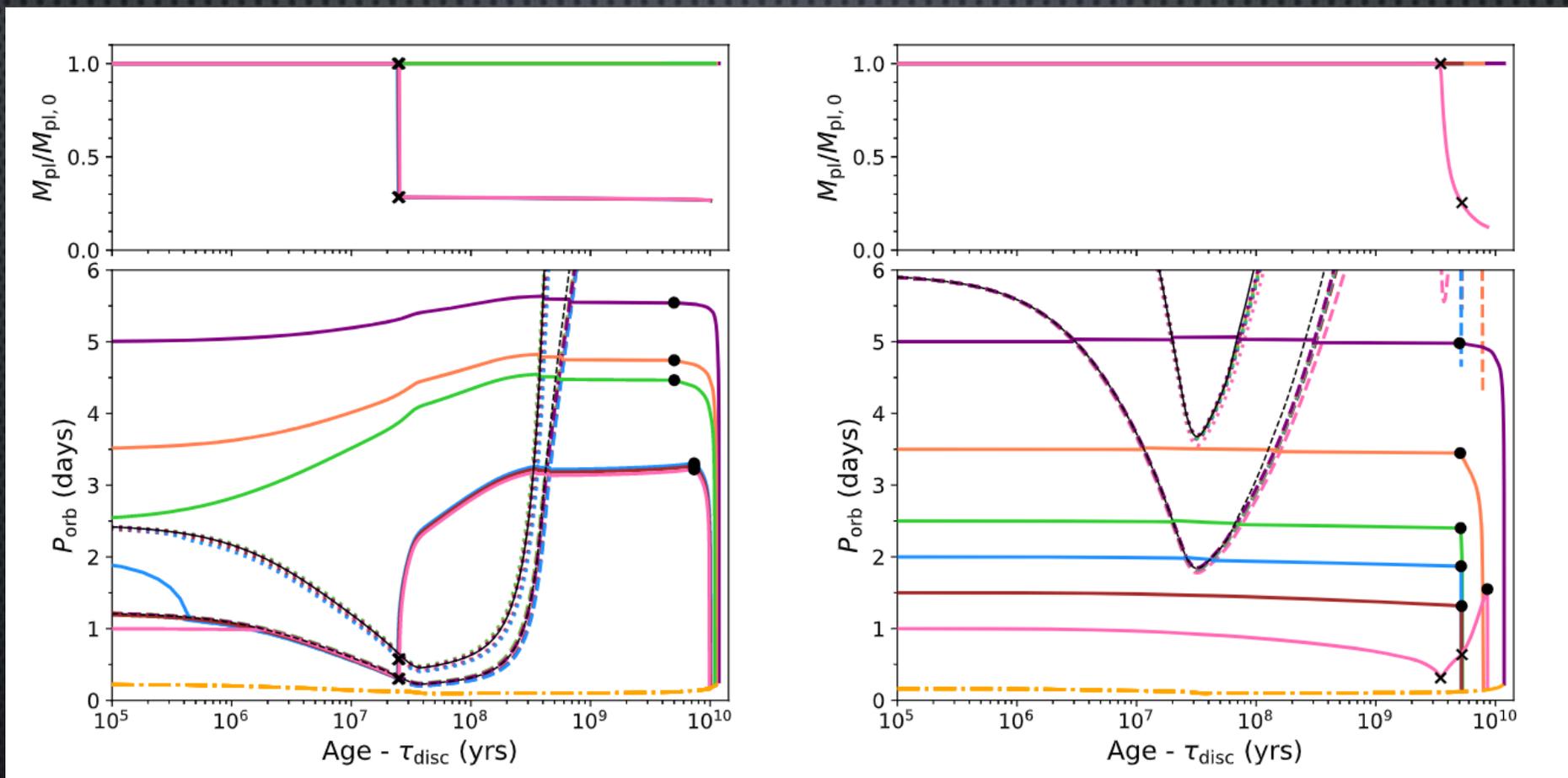
ЗАВИСИМОСТЬ ТРЕКОВ ОТ МАССЫ ПЛАНЕТЫ



$$M_{pl,0} = 0.3 M_J$$

$$M_{pl,0} = 2 M_J$$

ЗАВИСИМОСТЬ ТРЕКОВ ОТ НАЧАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ ЗВЕЗДЫ



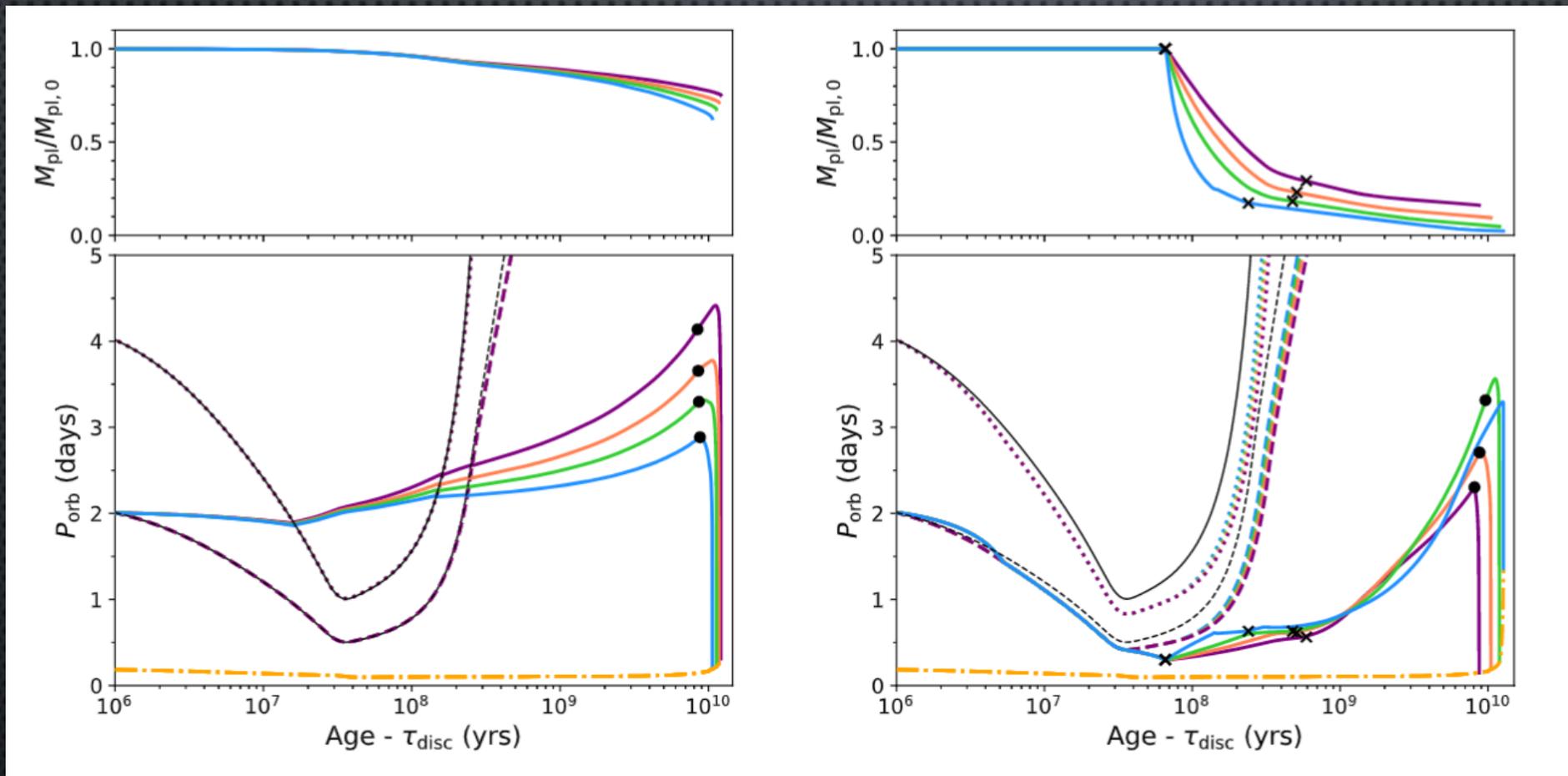
$$P_{rot,0} = 2.5 \text{ сут.}$$

$$M_{pl,0} = 2 M_J$$

$$P_{rot,0} = 12 \text{ сут.}$$

$$M_{pl,0} = 2 M_J$$

ЗАВИСИМОСТЬ ТРЕКОВ ОТ ПАРАМЕТРА χ



Синие, зеленые,
оранжевые,
фиолетовые линии:
 $\chi = 0.3, 0.5, 0.7, 1$,
соответственно

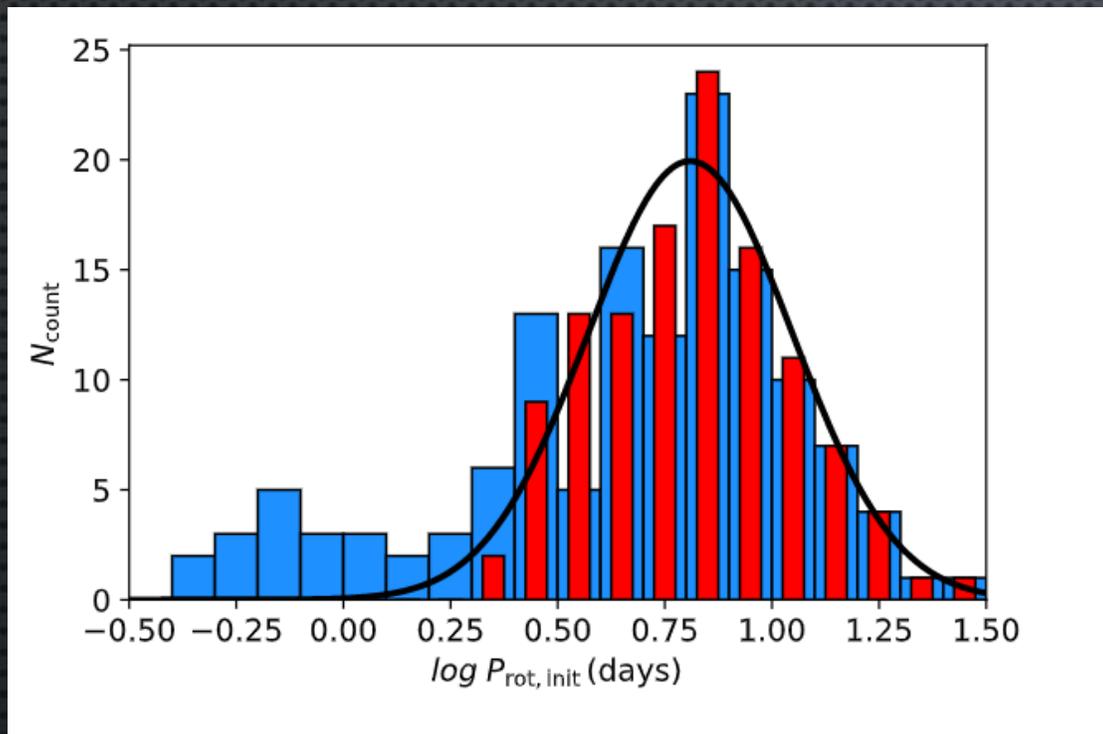
$$M_{pl,0} = 0.3 M_J$$

$$P_{rot,0} = 2.5 \text{ сут.}$$

$$M_{pl,0} = 2 M_J$$

$$P_{rot,0} = 2.5 \text{ сут.}$$

ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ)



Распределение периода вращения звезды. Синяя диаграмма – данные Irwin et al. (2008). Красная диаграмма – начальные периоды, полученные с учетом калибровки времени диссипации протопланетного диска.

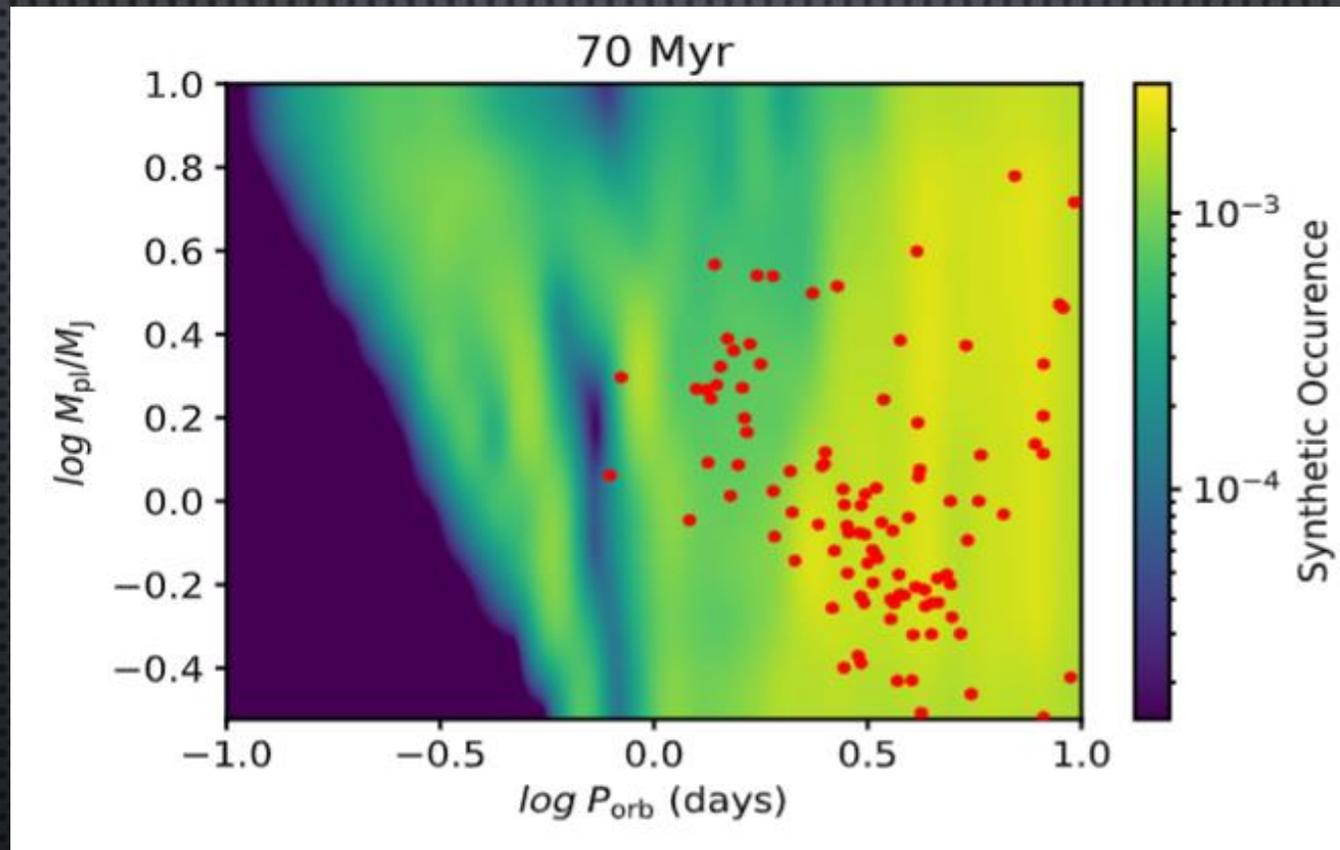
- Системы имеют равный возраст
- Логравномерное распределение начальной массы планеты в диапазоне $[0.3, 10] M_J$
- Логравномерное распределение начального орбитального периода в диапазоне $[1, 10]$ сут.
- Начальный период вращения звезды

$$p(\log P_{rot,0}) \propto \exp\left(-\frac{(\log P_{rot,0} - \zeta_*)^2}{2\sigma_*^2}\right), P_{rot,0} > 2 \text{ сут.}$$

$$\zeta_* = 0.81, \sigma_* = 0.24$$

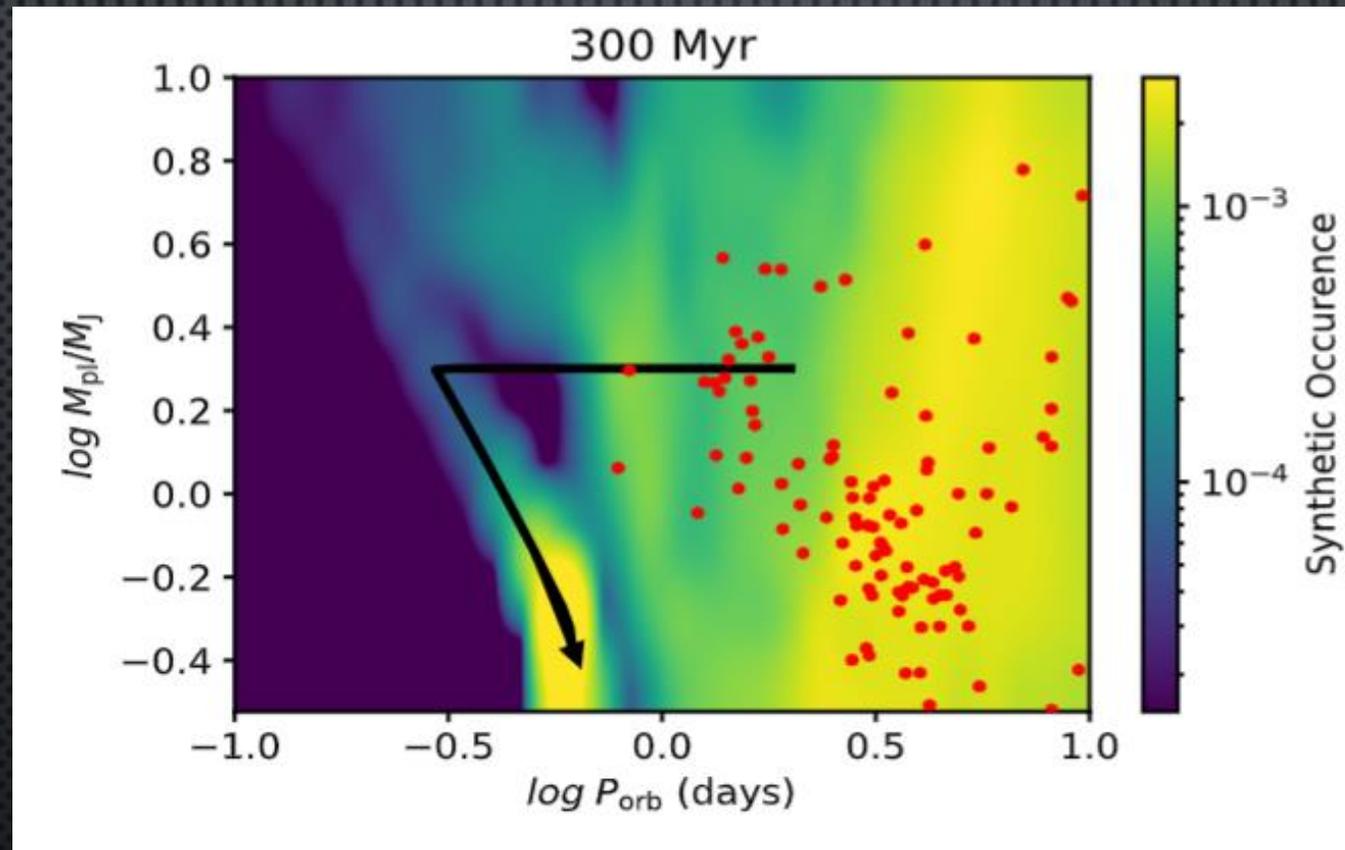
(NGC 2362, Irwin et al. (2008))

ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ)



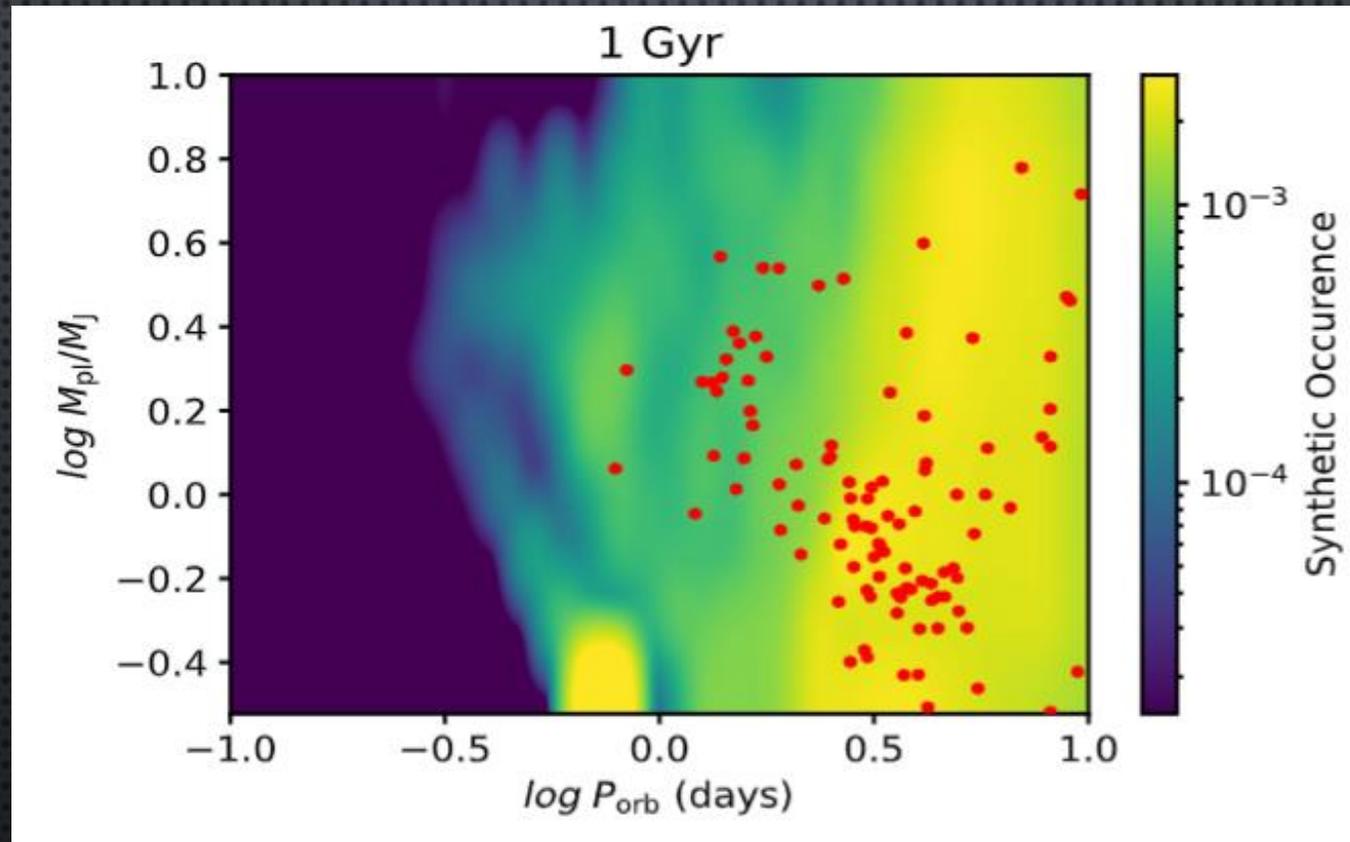
Красные круги – наблюдаемые планеты у звезд с массой в диапазоне $[0.95, 1.05] M_{\odot}$

ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ)



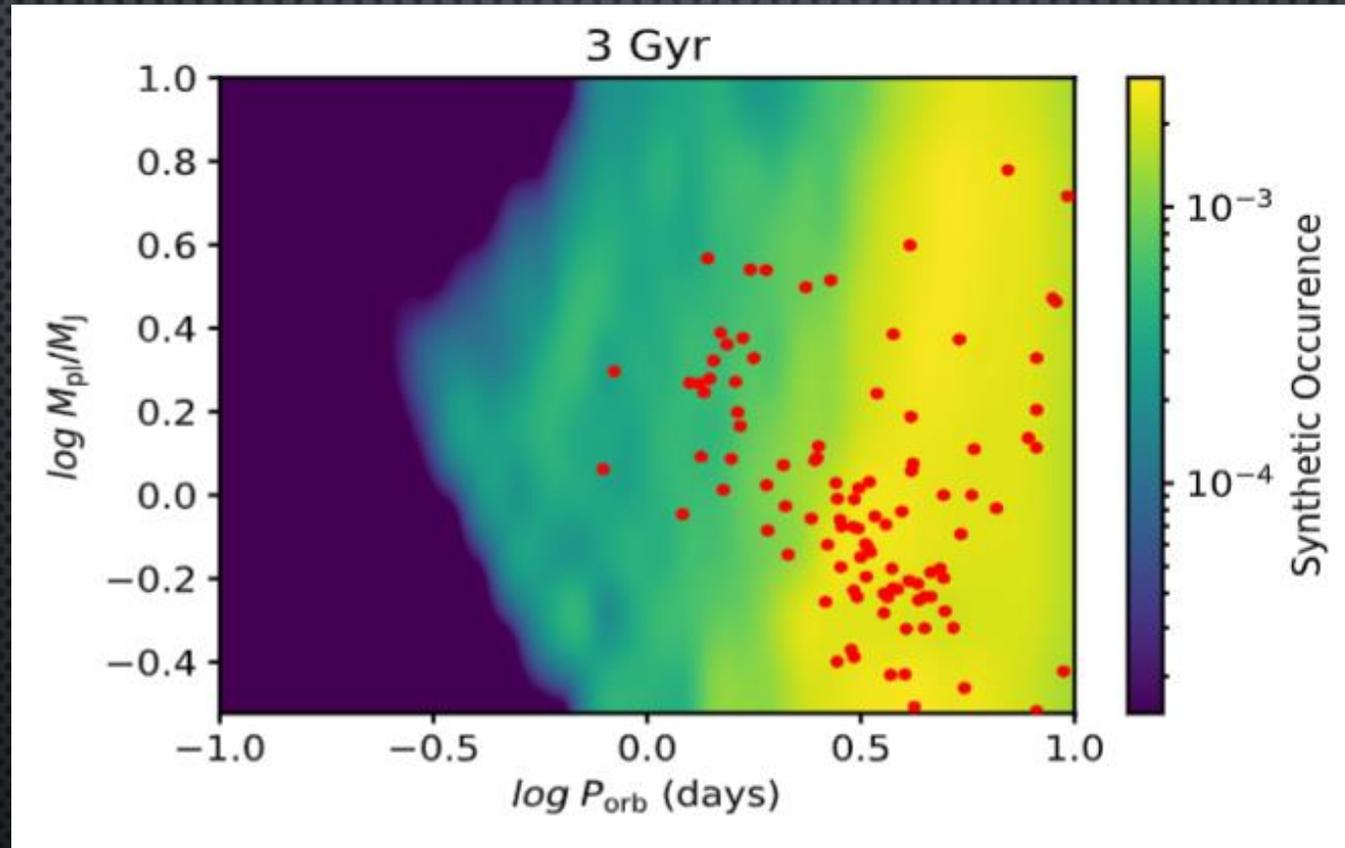
Красные круги – наблюдаемые планеты у звезд с массой в диапазоне $[0.95, 1.05] M_{\odot}$

ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ)



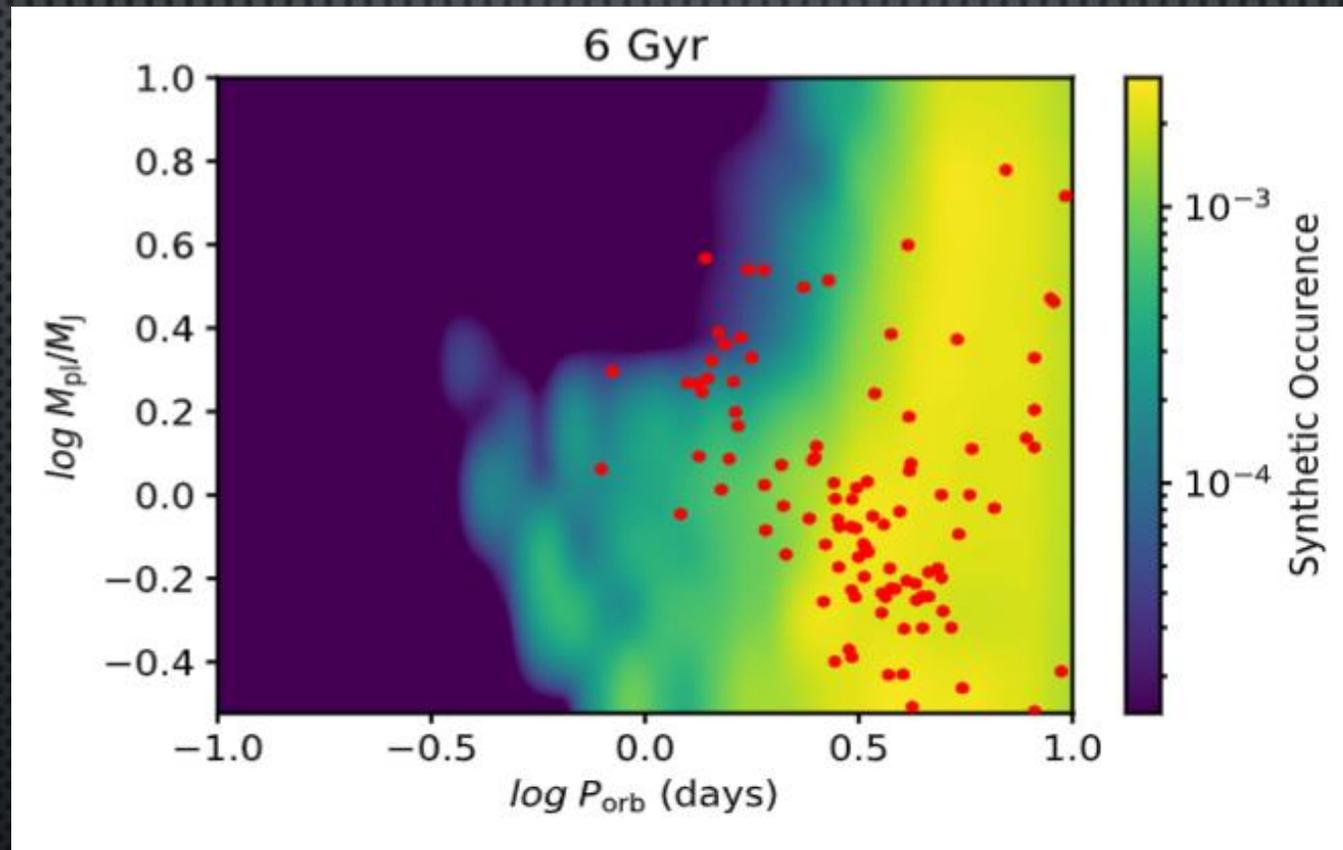
Красные круги – наблюдаемые планеты у звезд с массой в диапазоне $[0.95, 1.05] M_{\odot}$

ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ)



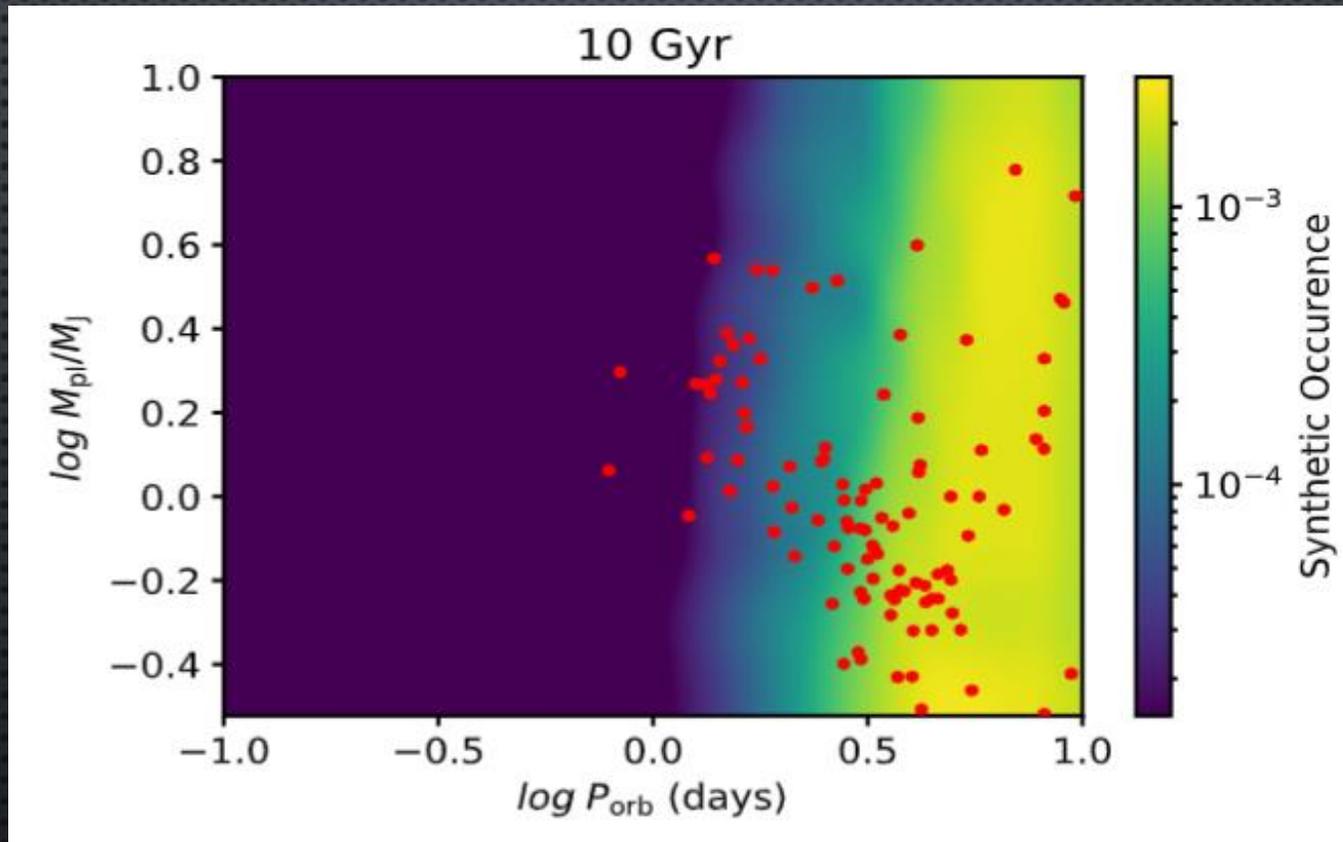
Красные круги – наблюдаемые планеты у звезд с массой в диапазоне $[0.95, 1.05] M_{\odot}$

ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ)



Красные круги – наблюдаемые планеты у звезд с массой в диапазоне $[0.95, 1.05] M_{\odot}$

ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ)



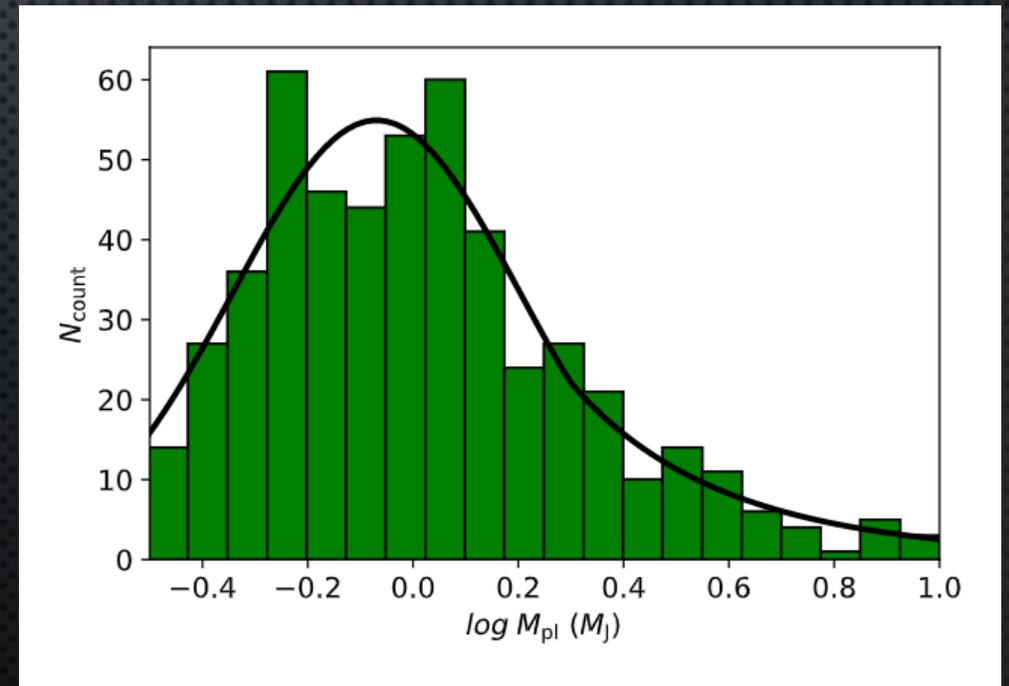
Красные круги – наблюдаемые планеты у звезд с массой в диапазоне $[0.95, 1.05] M_{\odot}$

ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ

- Равномерное распределение возраста системы в диапазоне [0, 7] млрд лет (Haywood et al. (2016))
- Учен эффект селекции. Из всей популяции выбраны системы, дающие полный транзит.
Вероятность транзита: $p_{transit} = 0.7 \frac{R_*}{a}$
- Начальное распределение масс горячих юпитеров:

$$p\left(\log \frac{M_{pl}}{M_J}\right) \propto \begin{cases} \exp\left(-\frac{(\log \frac{M_{pl}}{M_J} - \zeta_{pl})^2}{2\sigma_{pl}^2}\right), & \log \frac{M_{pl}}{M_J} \leq 0.3 \\ \left(\log \frac{M_{pl}}{M_J}\right)^\beta, & \log \frac{M_{pl}}{M_J} > 0.3 \end{cases}$$

Распределение массы горячих юпитеров. Зеленая гистограмма представляет выборку из наблюдаемых планет из <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>.



ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ

- Логравномерное распределение начального орбитального периода в диапазоне $[P_{min}, 10]$ сут.

МОДЕЛЬ 1

$$P_{min} = P_t, \quad P_t = \sqrt{\frac{GM_*}{a_t^3}}, \quad a_t - \text{Радиус внутренней Границы диска}$$
$$a_t = \left(\frac{\mathcal{M}^2 \tau_{ac}}{M_{pl} \sqrt{GM_*}} \right)^{2/7} \quad (\text{Bailey \& Batygin (2018)})$$

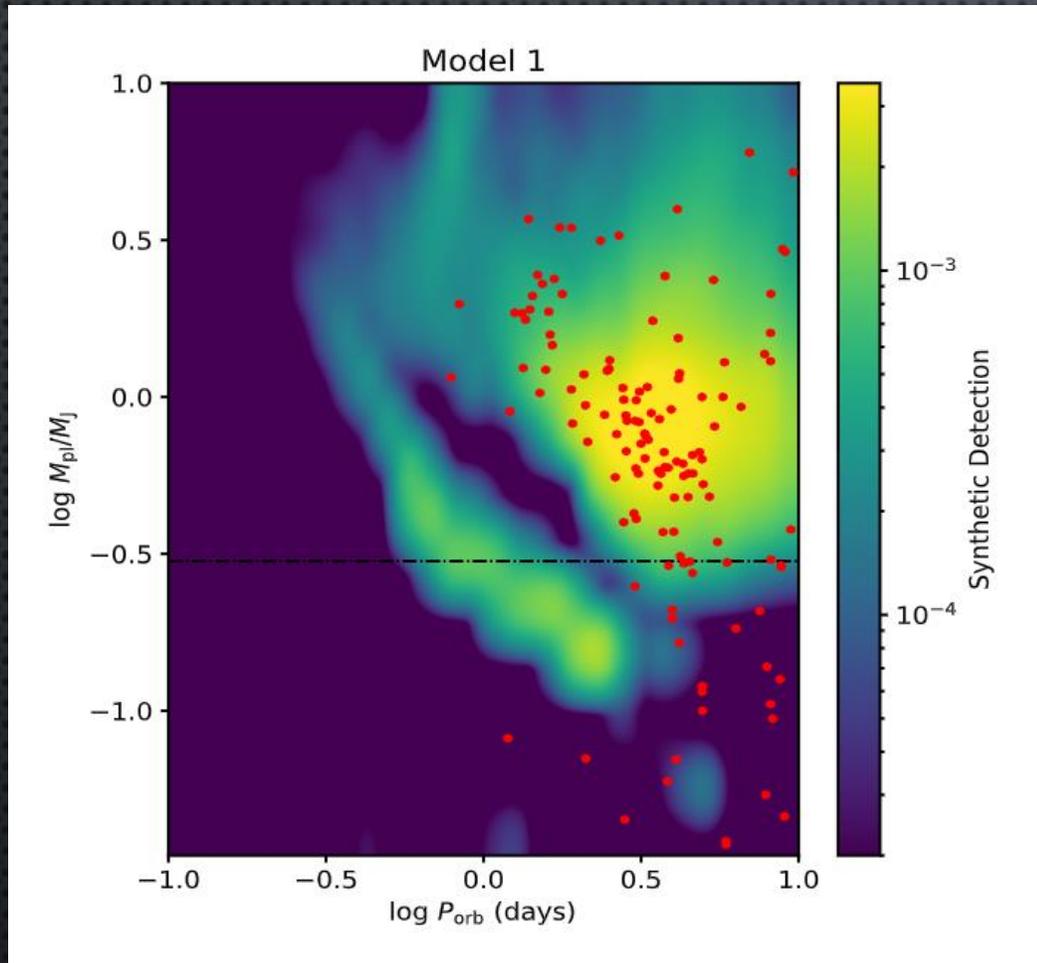
$$f_p = 3^{1/3}, \quad \zeta_{pl} = -0.067, \quad \sigma_{pl} = 0.31, \quad \beta = -1.46$$

МОДЕЛЬ 2

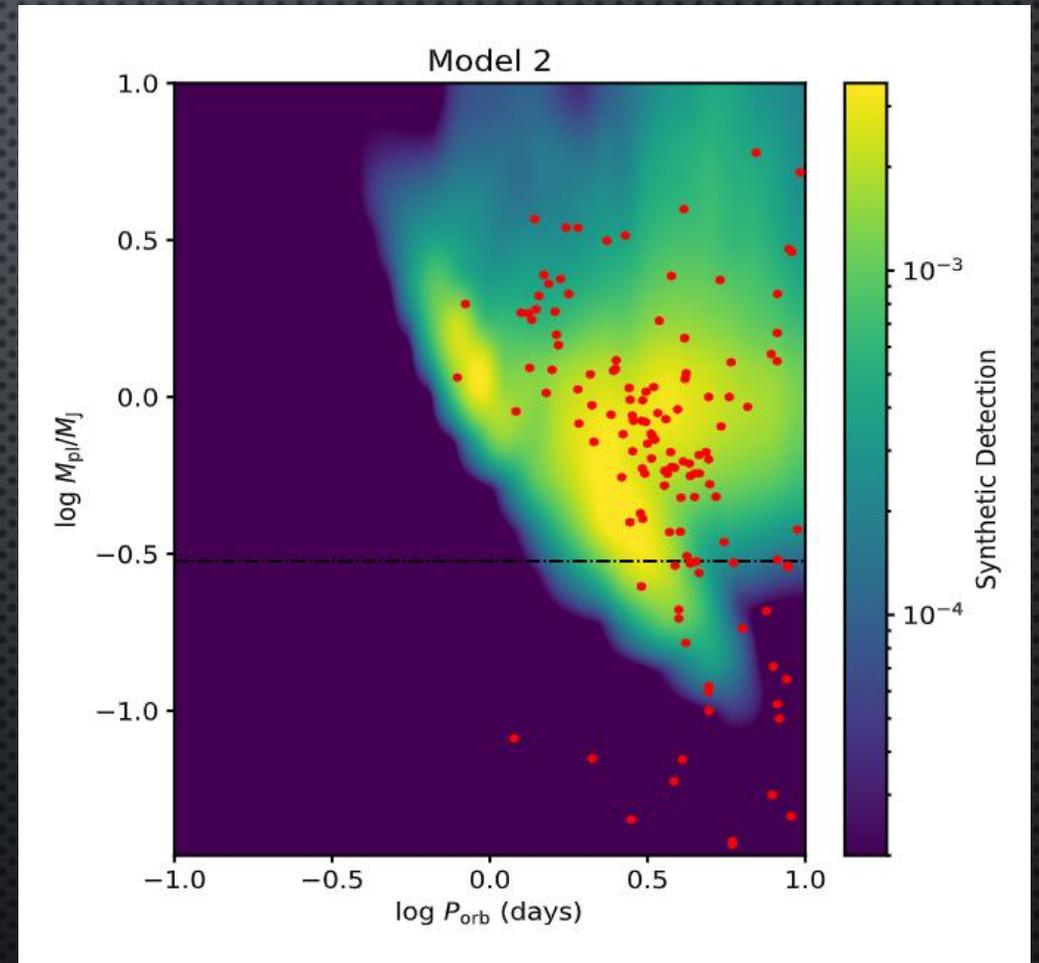
$$P_{min} = P_R$$

$$f_p = 2.7, \quad \zeta_{pl} = -0.044, \quad \sigma_{pl} = 0.29, \quad \beta = -1.02$$

ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ



МОДЕЛЬ 1



МОДЕЛЬ 2

ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ: ИТОГИ

1. 12 – 15% начальной популяции горячих Юпитеров было поглощено или претерпело существенную потерю массы;
2. Для 0.20 – 0.25% транзитных систем можно обнаружить вариацию времени транзита за 10 лет наблюдений;
3. Согласно модели 1 (модели 2), 3.6% (6.7%) транзитных горячих Юпитеров находится на стадии переноса вещества через полость Роша;
4. Модель 2 предполагает, что планеты WASP-19b, HATS-18b, and OGLE-TR-56-b, вероятно, заполняют свои полости Роша. При этом планеты WASP-4b and COROT-1b близки к заполнению своих полостей Роша
5. Модель 2 допускает возможность трансформации горячих Юпитеров в горячие Нептуны. Тем не менее, для образования суперземель требуется время, существенно превышающее возраст тонкого диска;
6. Модели 1 и 2 успешно воспроизводят высокое число обнаруженных Юпитеров с периодом ~ 3 сут и верхнюю границу наблюдаемого распределения, модель 2 качественно воспроизводит левую нижнюю границу распределения.

ССЫЛКИ

1. AMARD L., PALACIOS A., CHARBONNEL C., GALLET F., GEORGY C., LAGARDE N., SIESS L., 2019, A&A, 631, A77
2. BARKER A. J., 2020, MNRAS, 498, 2270
3. GOSSAGE S., DOTTER A., GARRAFFO C., DRAKE J. J., DOUGLAS S., CONROY C., 2021, APJ, 912, 65
4. HAYWOOD R. D., ET AL., 2016, MNRAS, 457, 3637
5. VALSECCHI F., RAPPAPORT S., RASIO F. A., MARCHANT P., ROGERS L. A., 2015, APJ, 813, 101
6. METZGER B. D., GIANNIOS D., SPIEGEL D. S., 2012, MNRAS, 425, 2778
7. IRWIN J., HODGKIN S., AIGRAIN S., BOUVIER J., HEBB L., IRWIN M., MORAUX E., 2008, MNRAS, 384, 675

ССЫЛКИ

10. STRUGAREK A., BRUN A. S., MATT S. P., RÉVILLE V., 2015, APJ, 815, 111
11. RÉVILLE V., BRUN A. S., MATT S. P., STRUGAREK A., PINTO R. F., 2015A, APJ, 798, 116
12. CALDIROLI A., HAARDT F., GALLO E., SPINELLI R., MALSKY I., RAUSCHER E., 2021, ARXIV E-PRINTS, P. ARXIV:2112.00744
13. MURRAY-CLAY R. A., CHIANG E. I., MURRAY N., 2009, APJ, 693, 23
14. BAILEY E., BATYGIN K., 2018, APJ, 866, L2
15. AHUIR J., STRUGAREK A., BRUN A.-S., MATHIS S., 2021, ARXIV E-PRINTS, P. ARXIV:2104.01004
16. LAZOVIK Y. A., 2021, MNRAS, 508, 3408

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!