

Post-main sequence evolution and planets

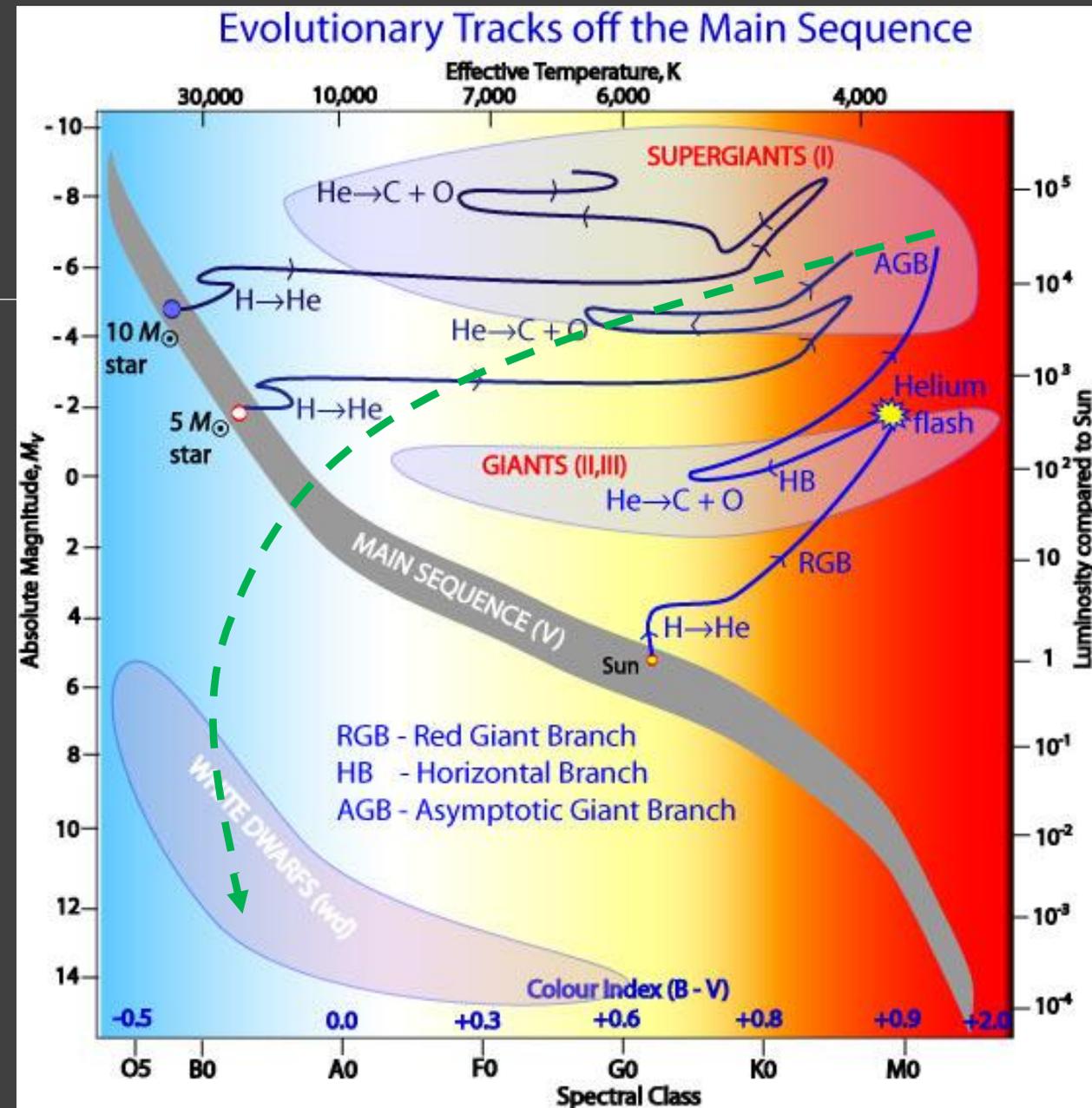
SERGEI POPOV

Post-MS evolution

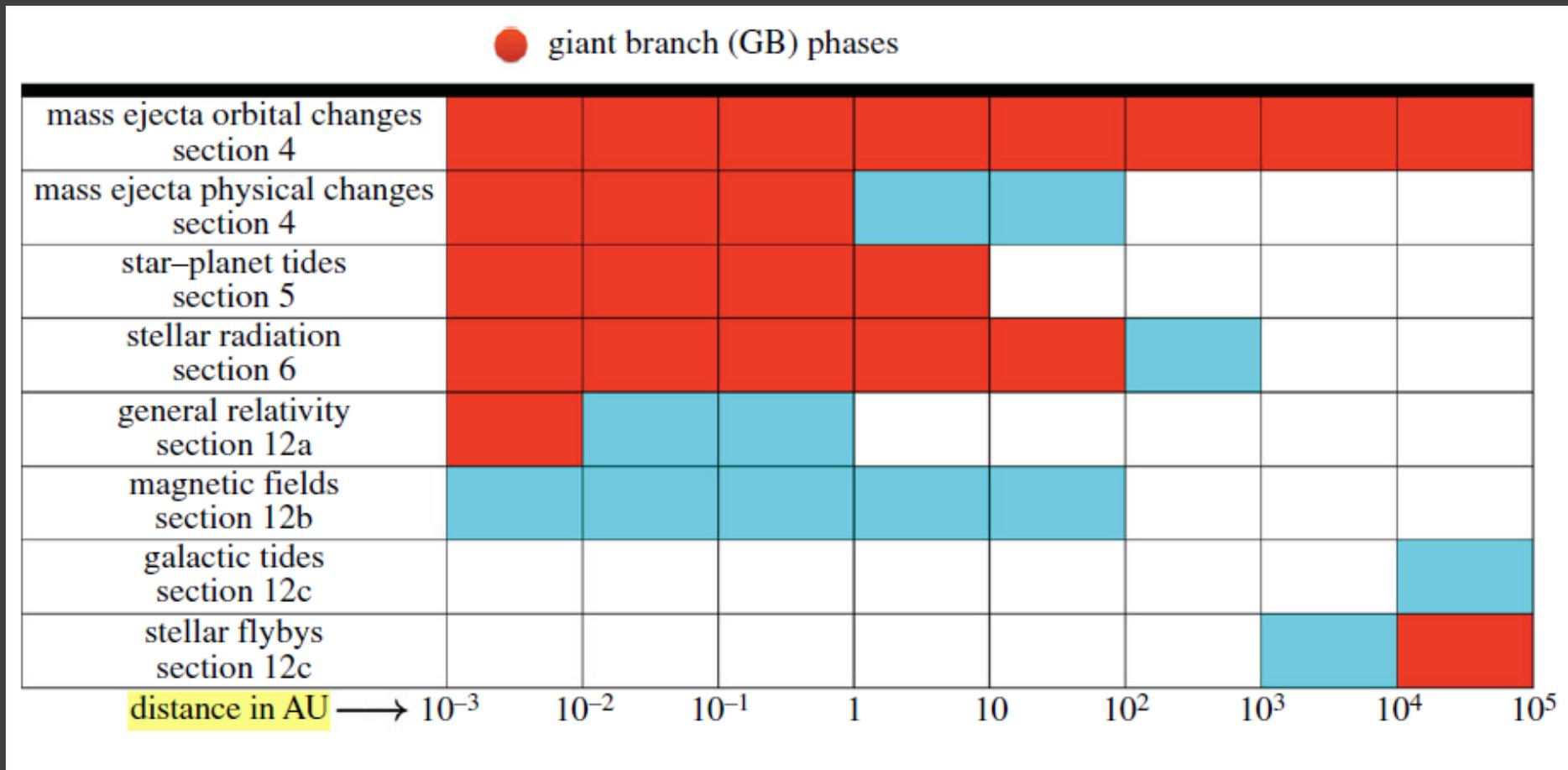
Stellar evolution influences the planetary system.

Expansion of the star, mass loss, tides –
all modifies planetary orbits.

Planets are observed around red giants,
in evolved binary systems,
and even around white dwarfs and neutron stars.

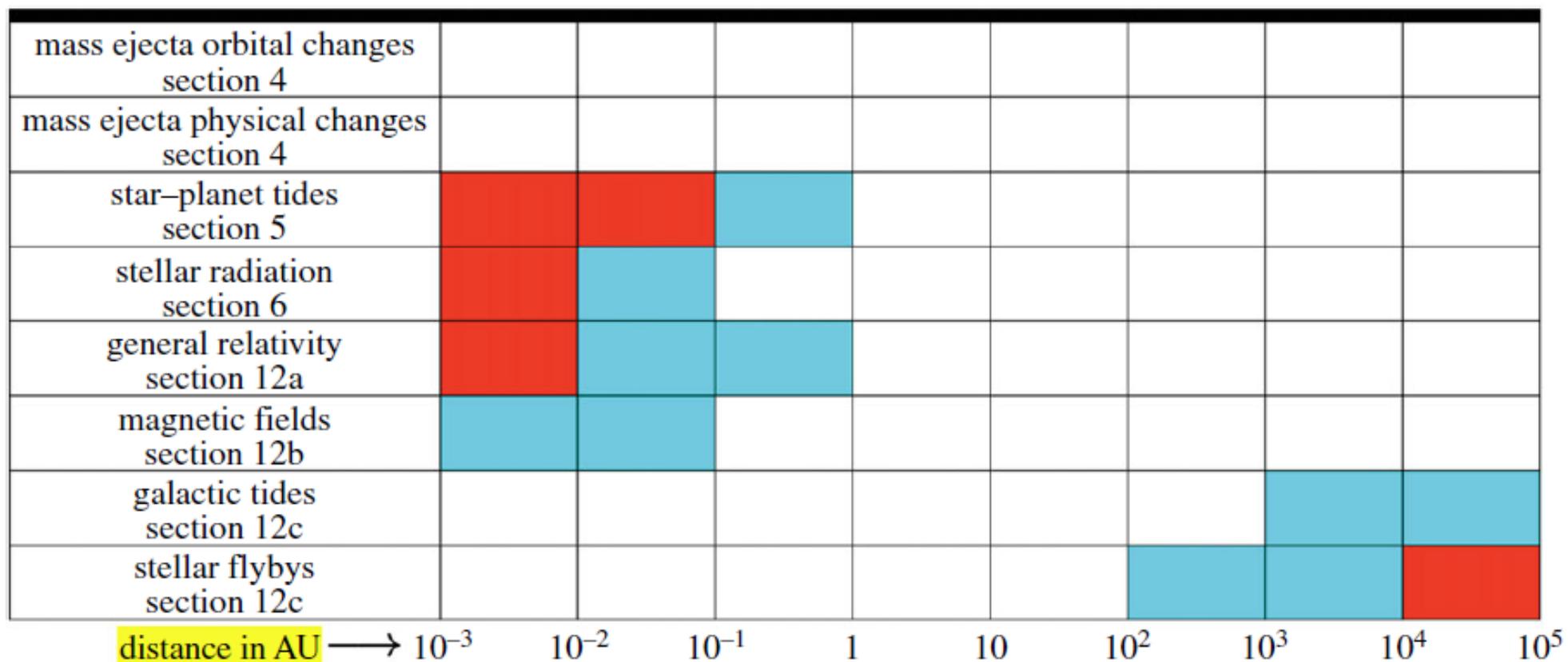


Physical effects and processes: Giant stars



Physical effects and processes: WDs and NSs

☀ white dwarf (WD) and 🌀 neutron star (NS) phases

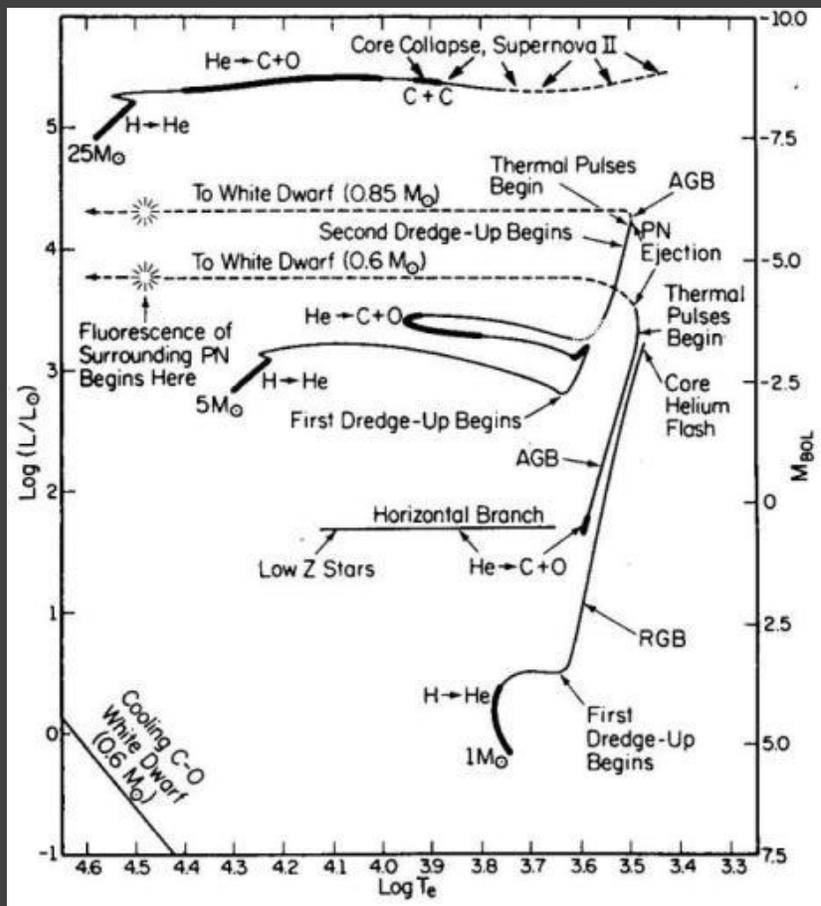


Specific post-MS systems

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

Some peculiar (at first glance) systems can shed light on important issues of stellar and planetary evolution.

Stellar evolution

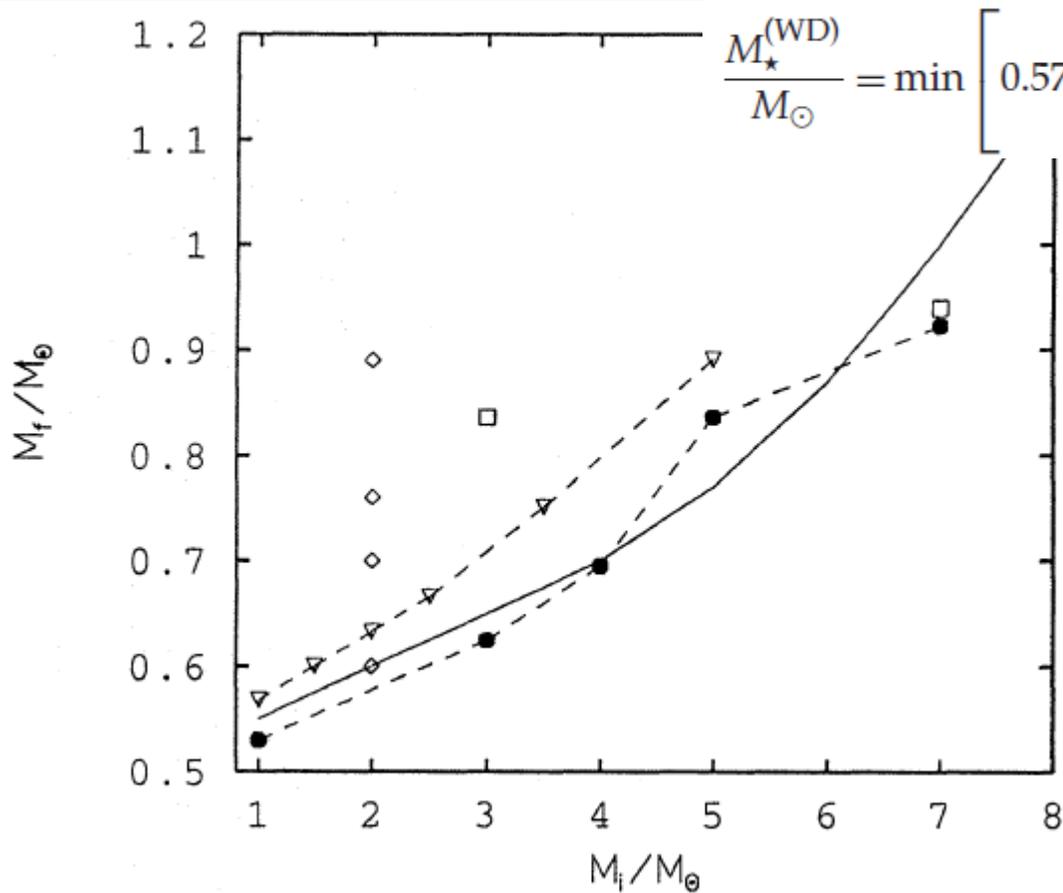


Iben (1991)

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)

Stars and white dwarfs



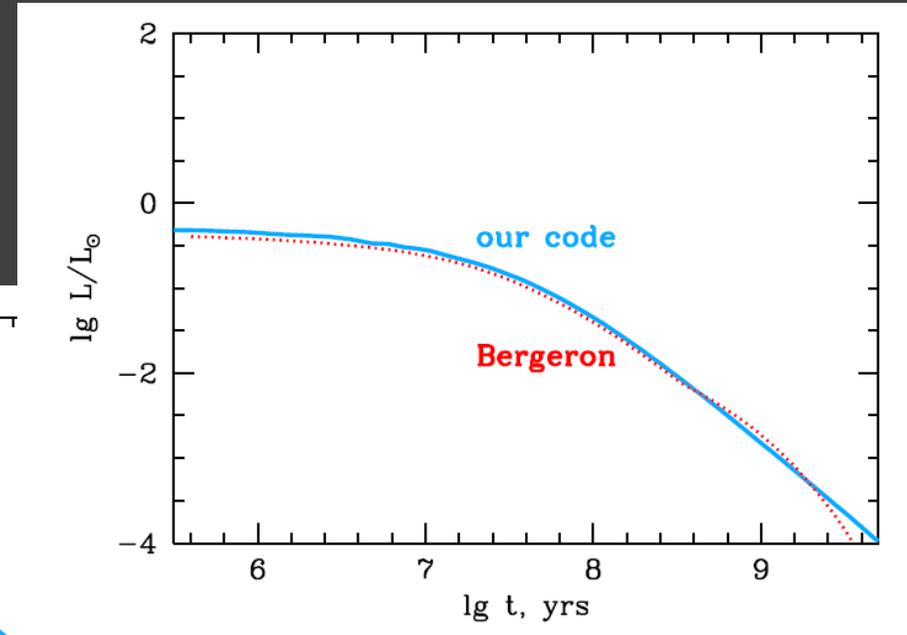
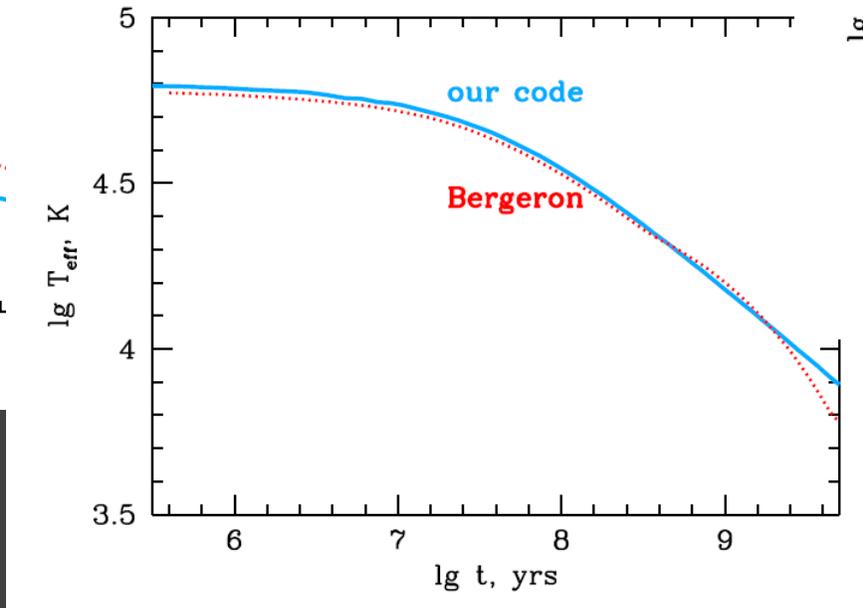
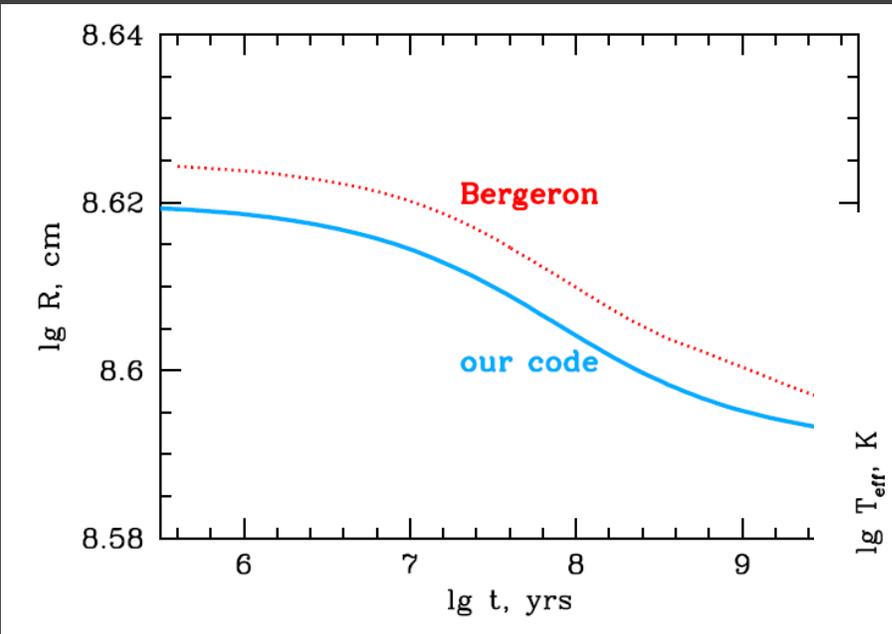
$$R_{\star}^{(WD)} / R_{\odot} \sim 10^{-2} (M_{\star}^{(WD)} / M_{\odot})^{-1/3}$$

$$\frac{R_{\star}^{(WD)}}{R_{\odot}} \approx 0.0127 \left(\frac{M_{\star}^{(WD)}}{M_{\odot}} \right)^{-1/3} \sqrt{1 - 0.607 \left(\frac{M_{\star}^{(WD)}}{M_{\odot}} \right)^{4/3}}$$

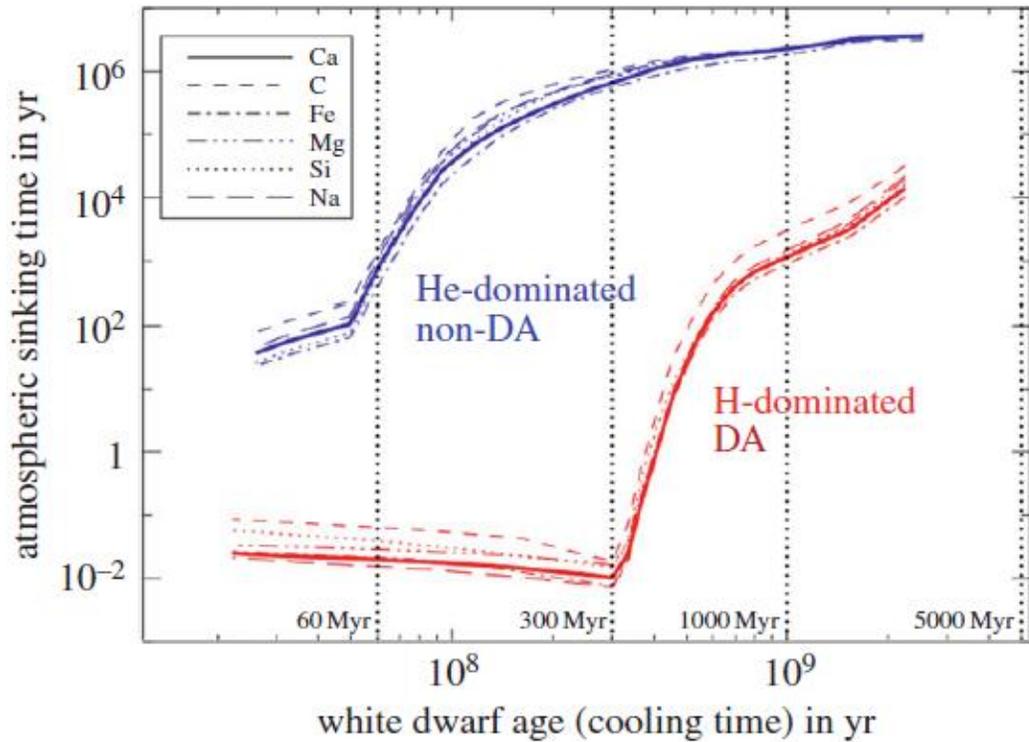
$$L_{\star}^{(WD)} = 3.26 L_{\odot} \left(\frac{M_{\star}^{(WD)}}{0.6 M_{\odot}} \right) \left(\frac{Z_{\star}}{0.02} \right)^{0.4} \left(0.1 + \frac{t_{\text{cool}}}{\text{Myr}} \right)^{-1.18}$$

Thermal evolution of WDs

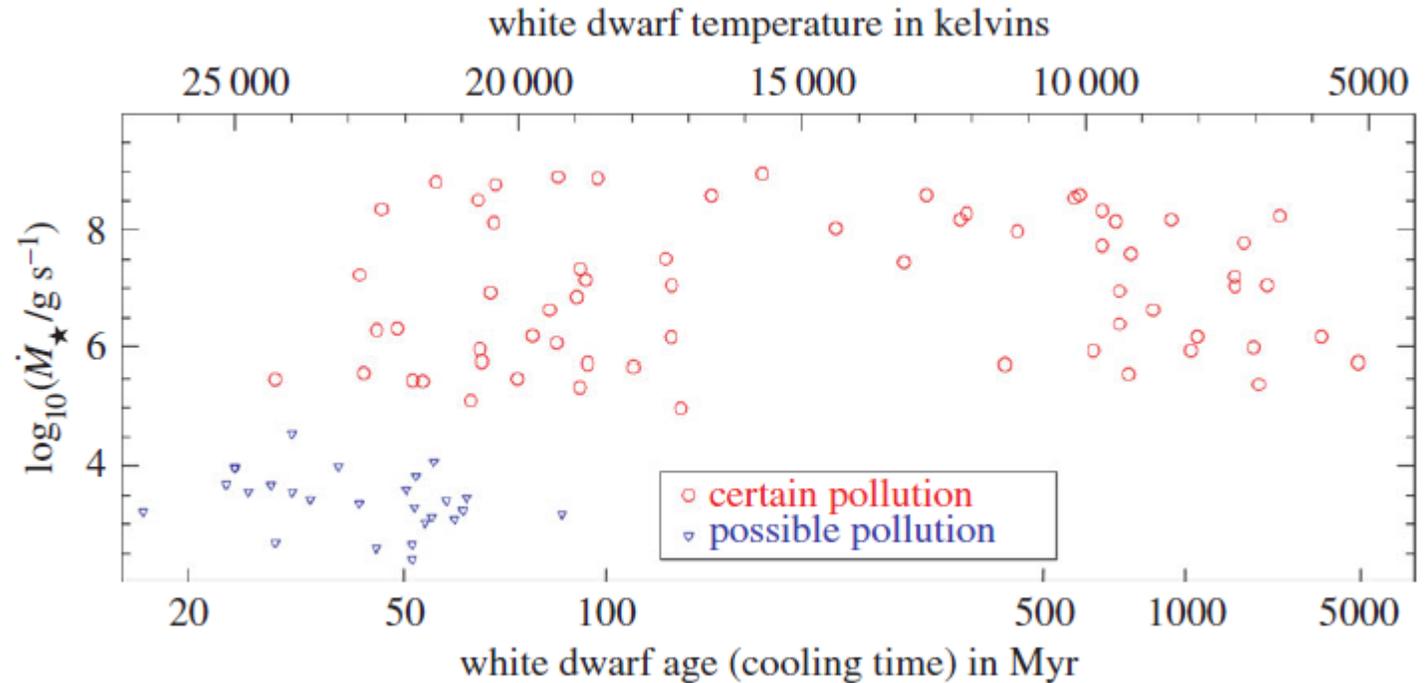
The code by Blinnikov and Dunina-Barkovskaya (1994).



WD pollution and sinking of the accreted matter



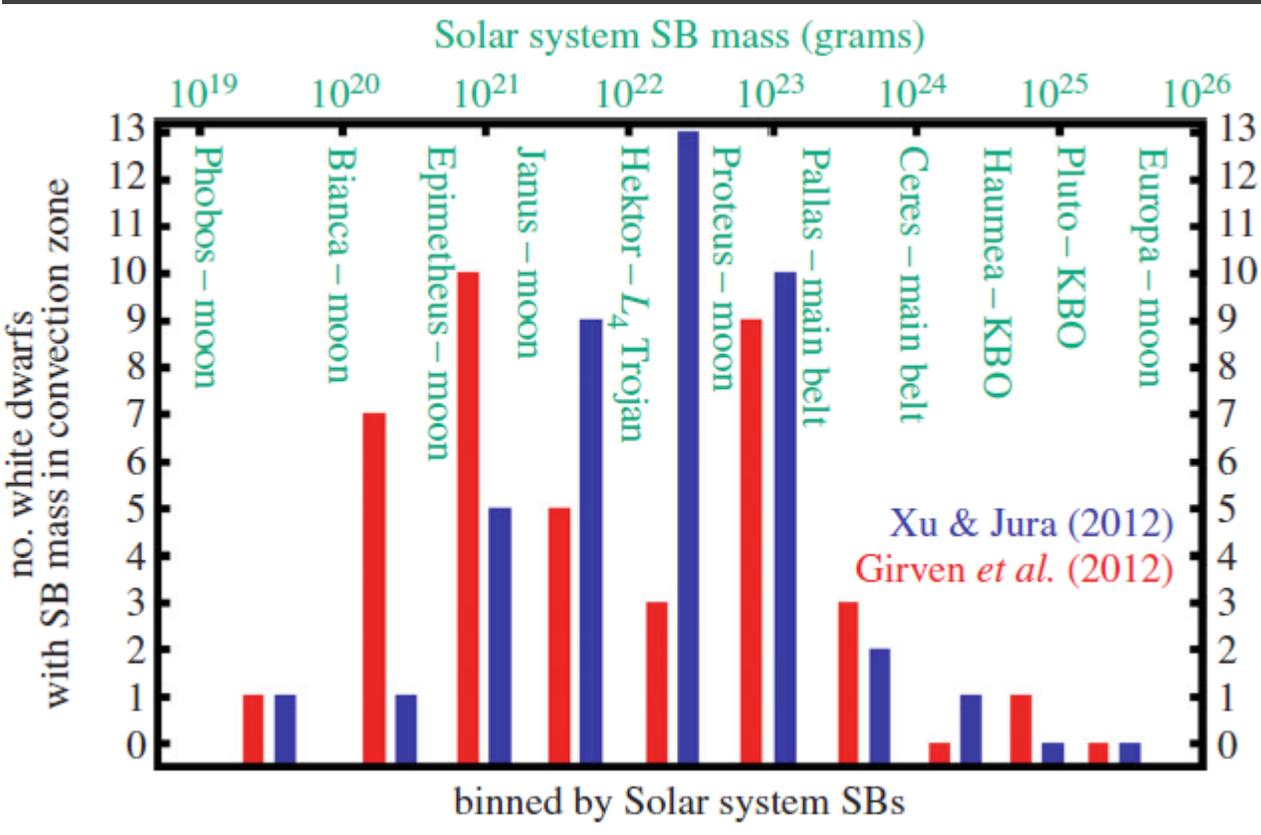
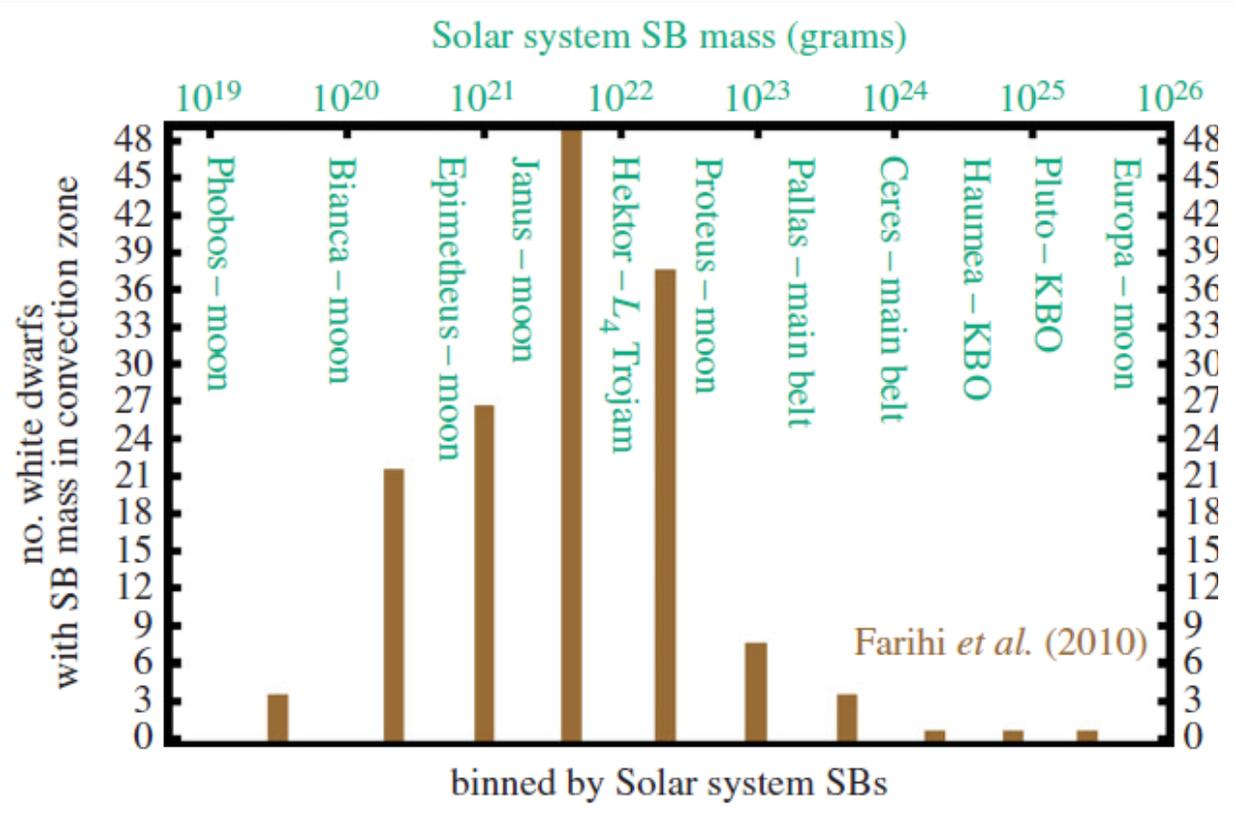
To support significant amount of heavy elements in a WD atmosphere it is necessarily to accrete matter continuously.
The amount of accreted matter can be estimated from spectral data.



Accreted heavy elements rapidly sink down.

How much did these WDs accreted ?

Accretion integrated over ~ Myr period



Ca line. Assumed that calcium represents 1.6% of matter.

Mass loss after the Main sequence

Mass loss at the red giant branch (modified Reimers formula)

$$\frac{dM_{\star}^{(\text{RGB})}}{dt} = 8 \times 10^{-14} M_{\odot} \text{yr}^{-1} \left(\frac{L_{\star}^{(\text{RGB})}}{L_{\odot}} \right) \left(\frac{R_{\star}^{(\text{RGB})}}{R_{\odot}} \right) \left(\frac{M_{\star}^{(\text{RGB})}}{M_{\odot}} \right)^{-1} \\ \times \left(\frac{T_{\star}^{(\text{RGB})}}{4000 \text{ K}} \right)^{7/2} \left[1 + 2.3 \times 10^{-4} \left(\frac{g_{\star}^{(\text{RGB})}}{g_{\odot}} \right)^{-1} \right],$$

Mass loss after the RGB is uncertain.
It is not constant due to pulsation.

At the tip of the AGB \dot{M} can reach
0.0001 solar mass per year.

$$\dot{M}_{\text{R}} = 4 \cdot 10^{-13} \eta_{\text{R}} \frac{LR}{M} \quad [M_{\odot}/\text{yr}].$$

RGB and AGB for $P < 100$ days

$$\log(P_0/\text{d}) = -1.92 - 0.73 \log M + 1.86 \log R.$$

AGB for $P > 100$ days

$$\dot{M}_{\text{BI}} = 4.83 \cdot 10^{-9} M_{\text{ZAMS}}^{-2.1} \cdot L^{2.7} \cdot \dot{M}_{\text{R}} \quad [M_{\odot}/\text{yr}]$$

At the AGB M_{ZAMS} can be modified to M_{CURRENT}

Blöcker (1995)

Orbital evolution with mass loss

General formula

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{G(M_\star + M_{\text{SB}})}{r^3} r.$$

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{G(M_\star(t=0) + M_{\text{SB}}(t=0))}{r^3} r - \frac{1}{2(M_\star(t) + M_{\text{SB}}(t))} \frac{d(M_\star(t) + M_{\text{SB}}(t))}{dt} r,$$

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} &= -\frac{a(1+e^2+2e\cos f)}{1-e^2} \frac{\dot{M}_\star + \dot{M}_{\text{SB}}}{M_\star + M_{\text{SB}}} = -a \left(\frac{1+e\cos E}{1-e\cos E} \right) \frac{\dot{M}_\star + \dot{M}_{\text{SB}}}{M_\star + M_{\text{SB}}}, \\ \frac{de}{dt} &= -(e + \cos f) \frac{\dot{M}_\star + \dot{M}_{\text{SB}}}{M_\star + M_{\text{SB}}} = -\left[\frac{(1-e^2)\cos E}{1-e\cos E} \right] \frac{\dot{M}_\star + \dot{M}_{\text{SB}}}{M_\star + M_{\text{SB}}}, \\ \frac{di}{dt} &= 0, \\ \frac{d\Omega}{dt} &= 0, \\ \frac{d\omega}{dt} &= -\left(\frac{\sin f}{e} \right) \frac{\dot{M}_\star + \dot{M}_{\text{SB}}}{M_\star + M_{\text{SB}}} = -\left[\frac{\sqrt{1-e^2}\sin E}{e(1-e\cos E)} \right] \frac{\dot{M}_\star + \dot{M}_{\text{SB}}}{M_\star + M_{\text{SB}}}. \end{aligned}$$

true anomaly f

eccentric anomaly E :

$$\frac{df}{dt} = -\frac{d\omega}{dt} + \frac{n(1+e\cos f)^2}{(1-e^2)^{3/2}}$$

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{\sqrt{1-e^2}} \frac{d\omega}{dt} + \frac{n}{1-e\cos E}.$$

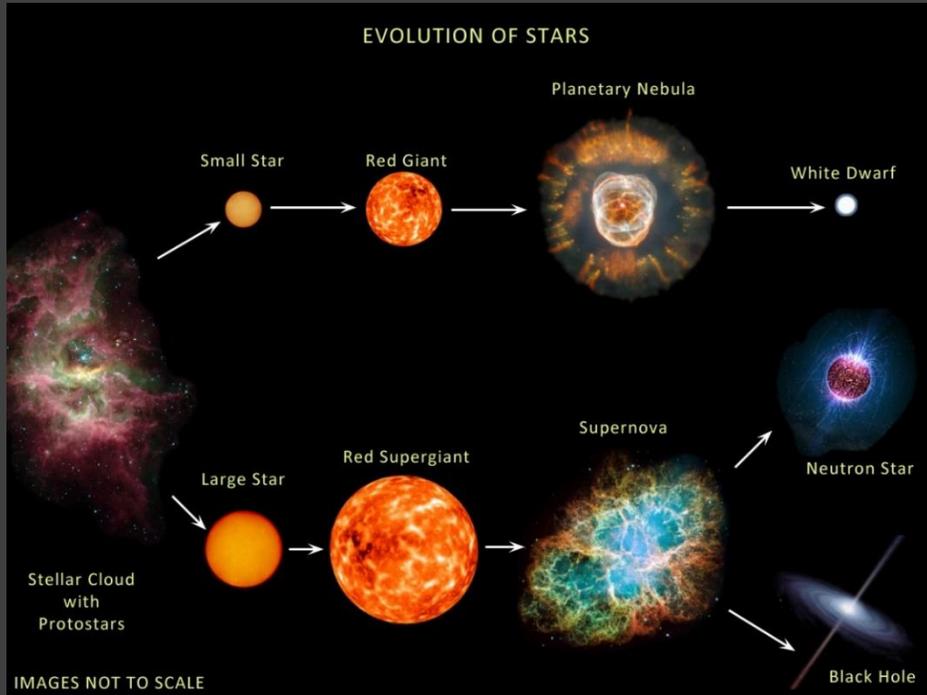
$$n = G^{1/2} (M_\star + M_{\text{SB}})^{1/2} a^{-3/2}$$

Выброс планет звездами

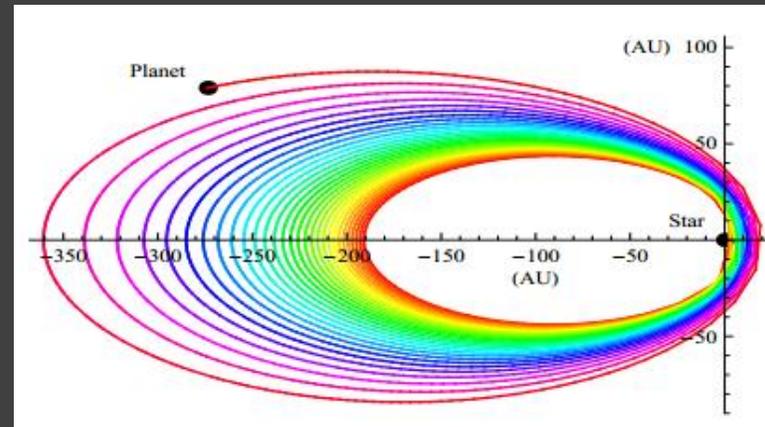
Что происходит с планетами
когда звезда теряет массу?

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

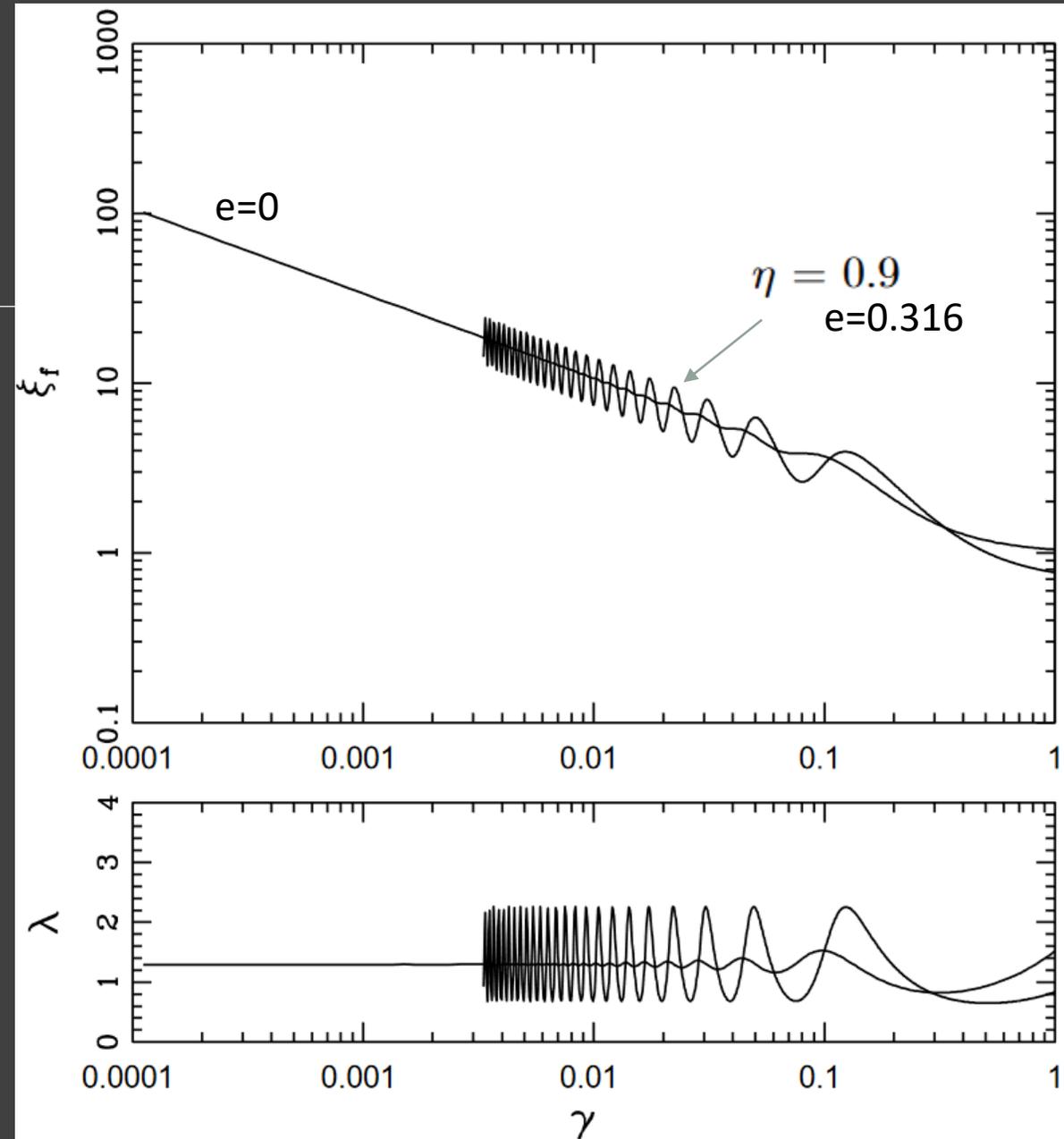
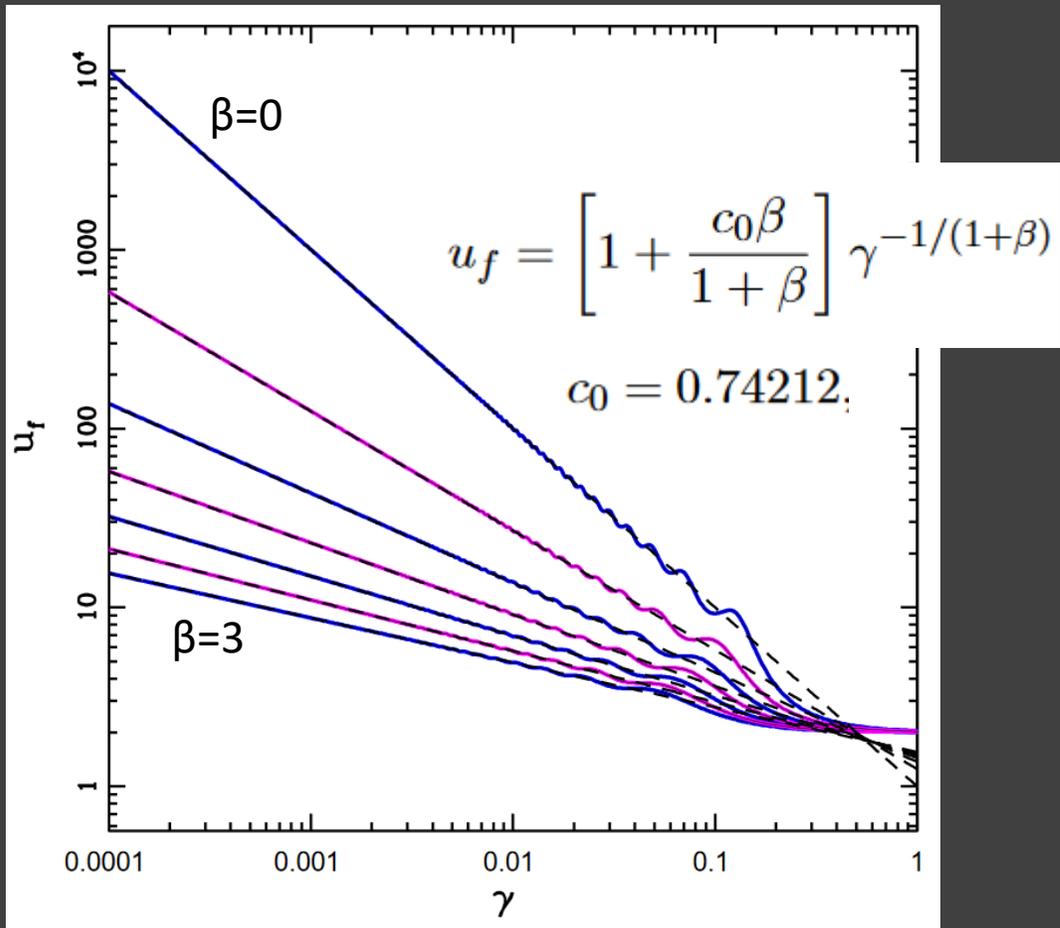
Далекие планеты могут «улетать»



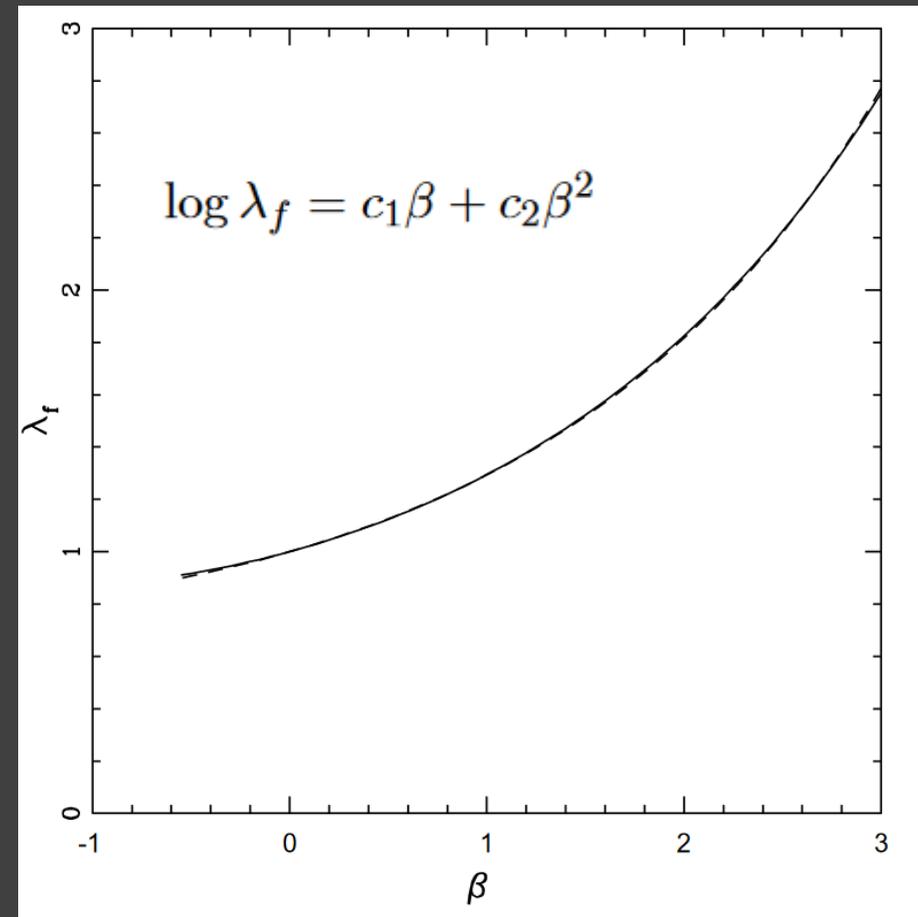
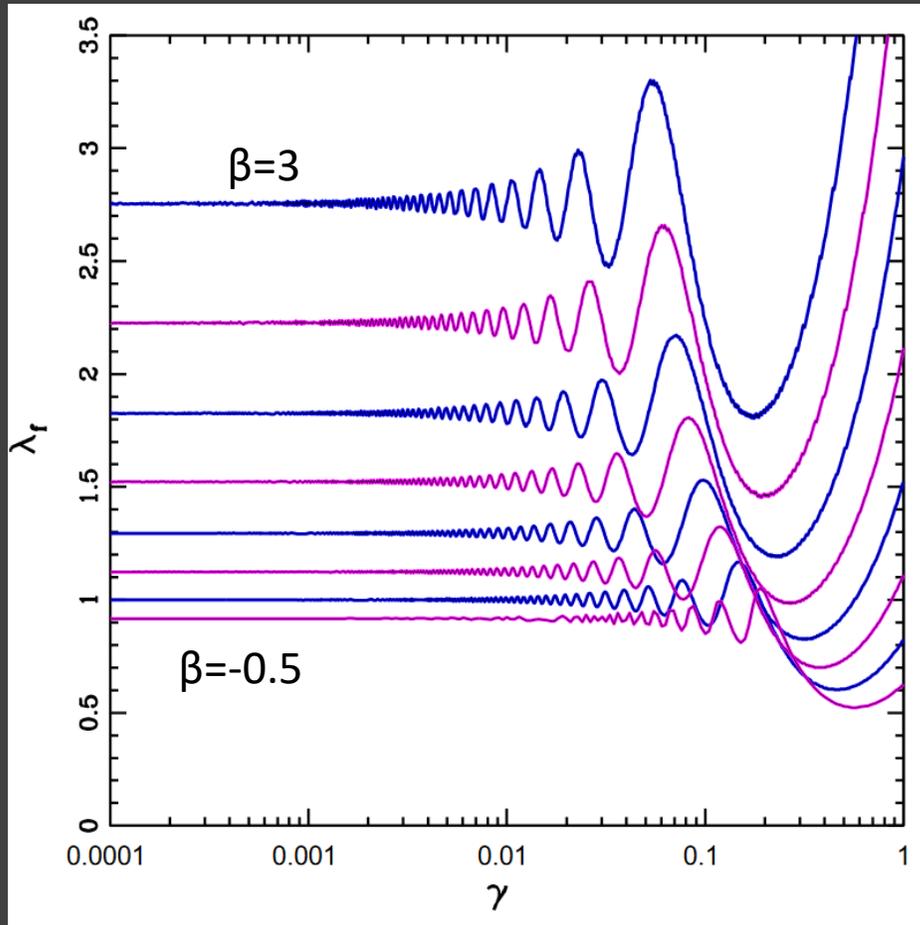
Интересные потери планет могут происходить в двойных системах!



Numerical results



Numerical results



Adiabatic regime: simple solution

$$\Psi \equiv \frac{\dot{M}_\star}{M_\star n} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\dot{M}_\star}{M_\odot \text{ yr}^{-1}} \right) \left(\frac{M_\star}{M_\odot} \right)^{-3/2} \left(\frac{a}{\text{AU}} \right)^{3/2}$$

$\Psi \ll 1$ Adiabatic regime – easy to analyze.
Eccentricity is constant and so:

$$(1/a) \frac{da}{dt} = -(M_\star + M_{\text{SB}})^{-1} (dM_\star/dt)$$

Most of planet are in these regime ($a < 100$ AU).

Gas drag in the wind and atmosphere

Small bodies can be destroyed by the wind or in atmosphere.

$$g_{\text{SB}} \lesssim \frac{2\pi\rho_{\text{SB}}\rho_{\text{wind}}v^2}{R_{\text{SB}}(\rho_{\text{SB}}^2 - \rho_{\text{wind}}^2)}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{SB}} &\lesssim 0.02M_{\oplus} \left(\frac{\rho_{\text{wind}}}{10^{-4} \text{ g cm}^{-3}}\right)^{3/2} \left(\frac{\rho_{\text{SB}}}{2 \text{ g cm}^{-3}}\right)^{-2} \left(\frac{v}{100 \text{ km s}^{-1}}\right)^3 \\ &\sim 100 \text{ kg} \left(\frac{\rho_{\text{wind}}}{10^{-16} \text{ g cm}^{-3}}\right)^{3/2} \left(\frac{\rho_{\text{SB}}}{2 \text{ g cm}^{-3}}\right)^{-2} \left(\frac{v}{10 \text{ km s}^{-1}}\right)^3. \end{aligned}$$

Tides

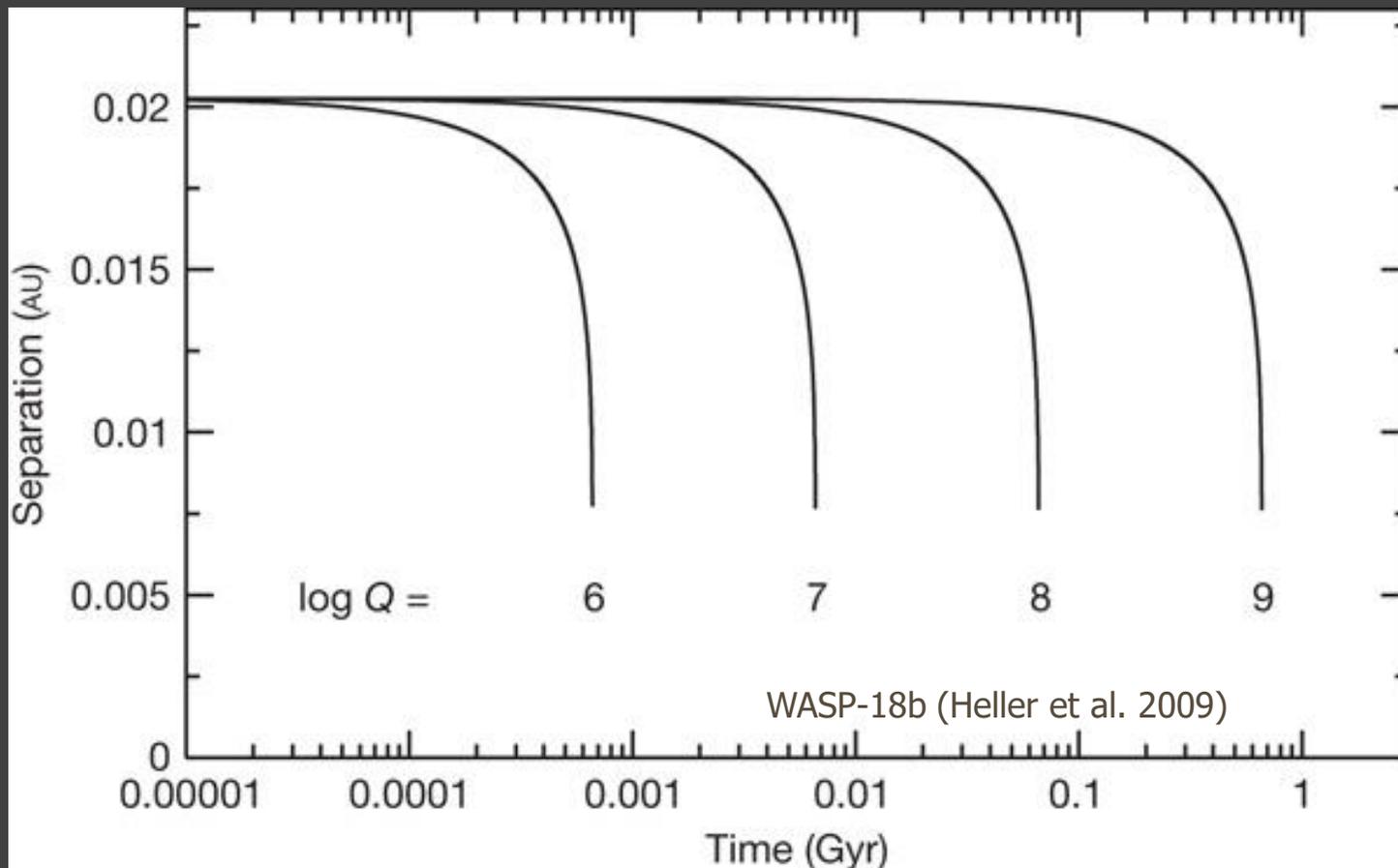
$$\frac{da}{dt} = -\frac{a}{9t_{\text{conv}}} \frac{M_{\star}^{(\text{env})}}{M_{\star}} \frac{M_{\text{SB}}}{M_{\star}} \left(1 + \frac{M_{\text{SB}}}{M_{\star}}\right) \left(\frac{R_{\star}}{a}\right)^8 \left[2p_2 + e^2 \left(\frac{7}{8}p_1 - 10p_2 + \frac{441}{8}p_3\right)\right]$$

$$\frac{de}{dt} = -\frac{e}{36t_{\text{conv}}} \frac{M_{\star}^{(\text{env})}}{M_{\star}} \frac{M_{\text{SB}}}{M_{\star}} \left(1 + \frac{M_{\text{SB}}}{M_{\star}}\right) \left(\frac{R_{\star}}{a}\right)^8 \left[\frac{5}{4}p_1 - 2p_2 + \frac{147}{4}p_3\right],$$

$$t_{\text{conv}} = \left[\frac{M_{\star}^{(\text{env})} (R_{\star} - R_{\star}^{(\text{env})})^2}{3L_{\star}} \right]^{1/3}$$

Actually, many different approaches to calculate tidal effects are used.

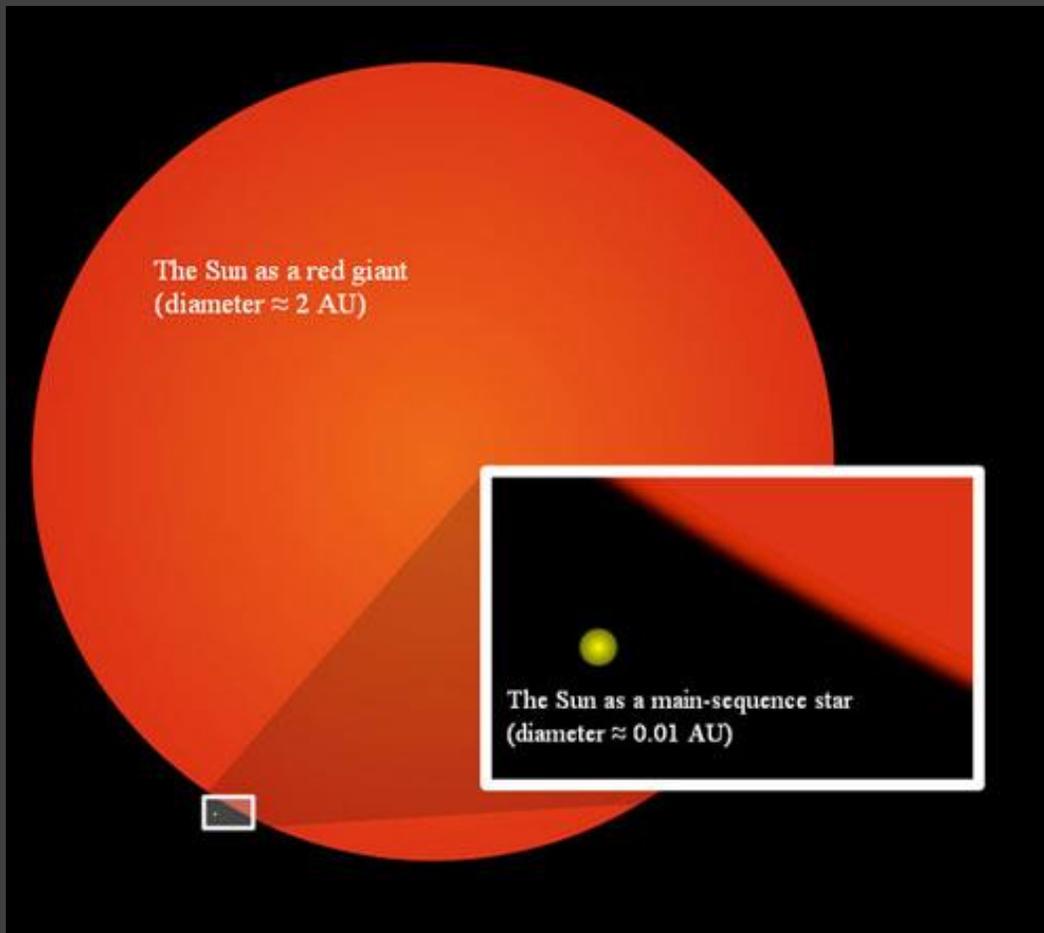
Приливы



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.

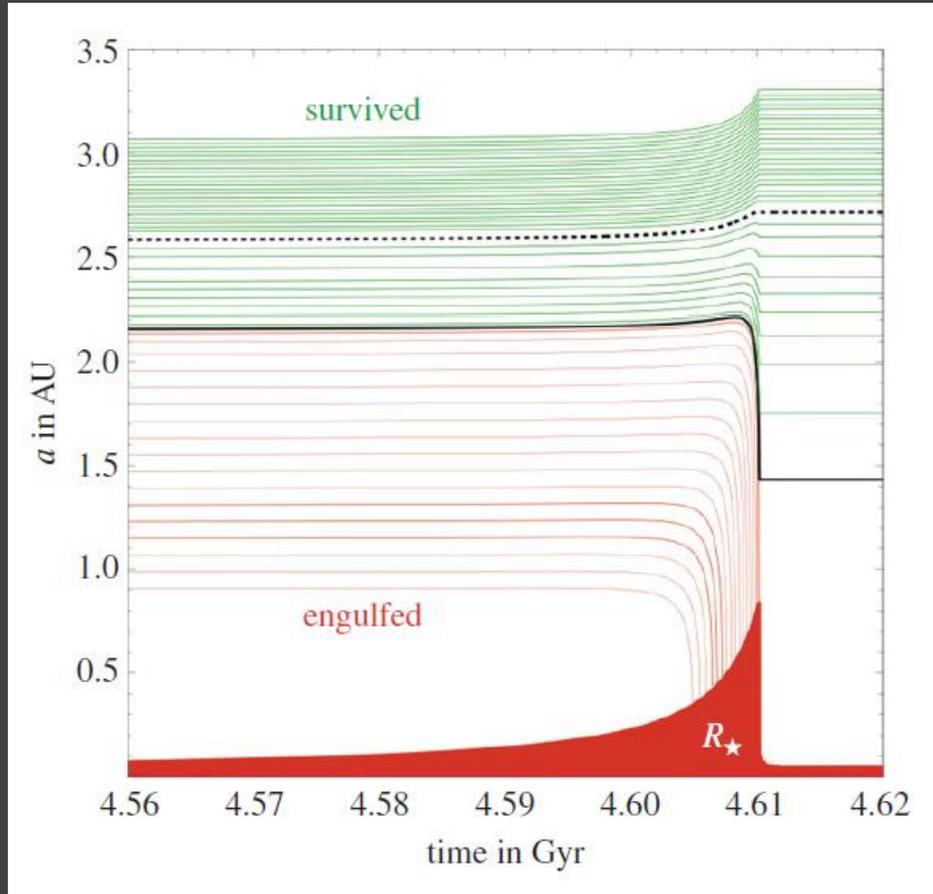
Превращение звезды в красный гигант



Звездная эволюция отражается на планетах.

При превращении звезды в красного гиганта часть планет оказывается поглощенными.

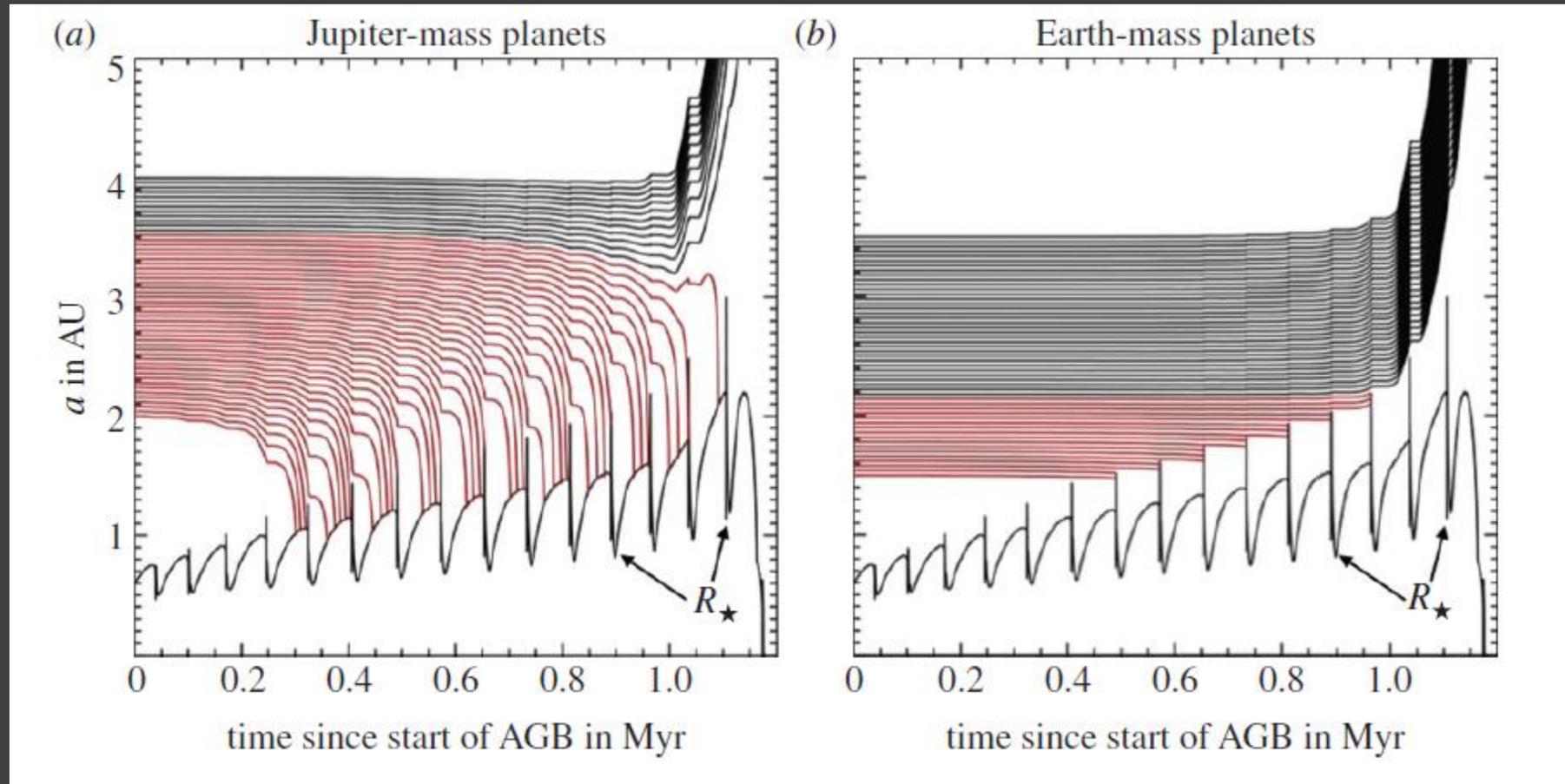
Tidal engulfment: RGB star



1.5 solar mass at the Main sequence.

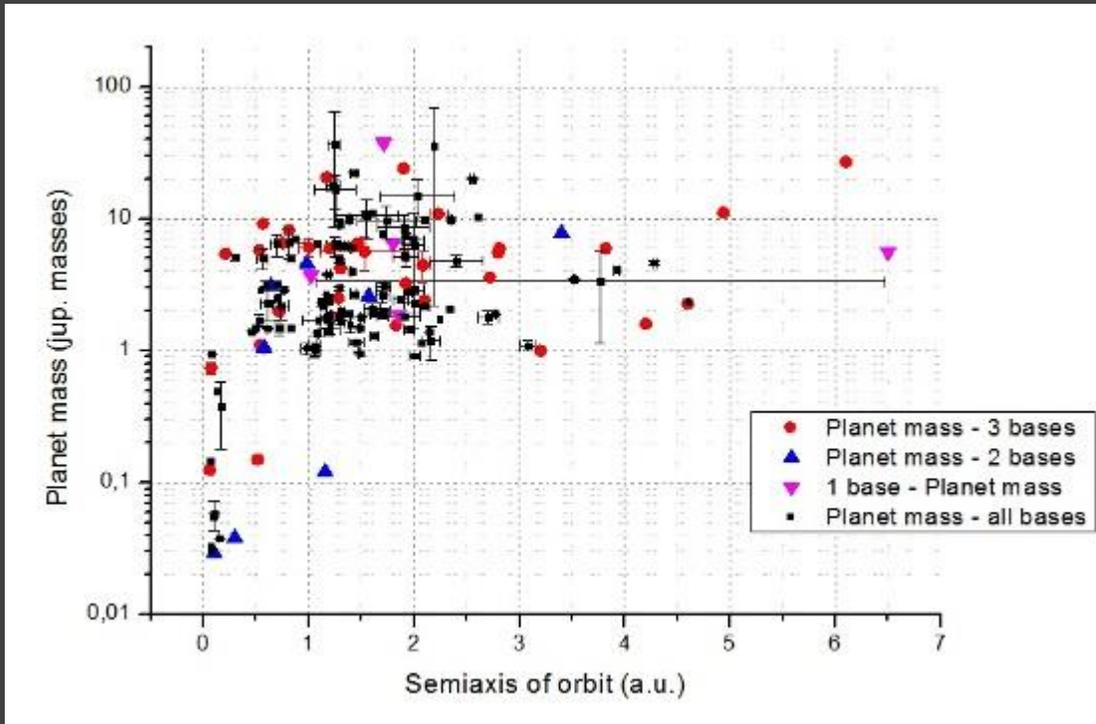
Jupiter mass planet.

Tidal engulfment: AGB star

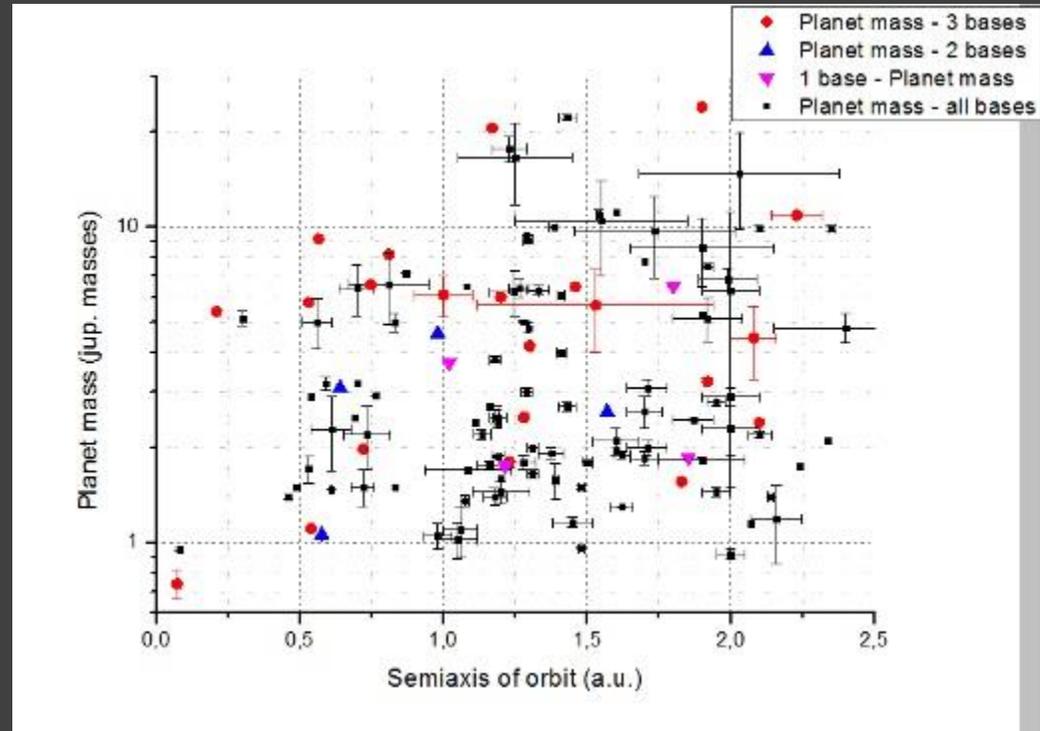


2 solar mass
at the MS.

Planets around red giants



>100 planets



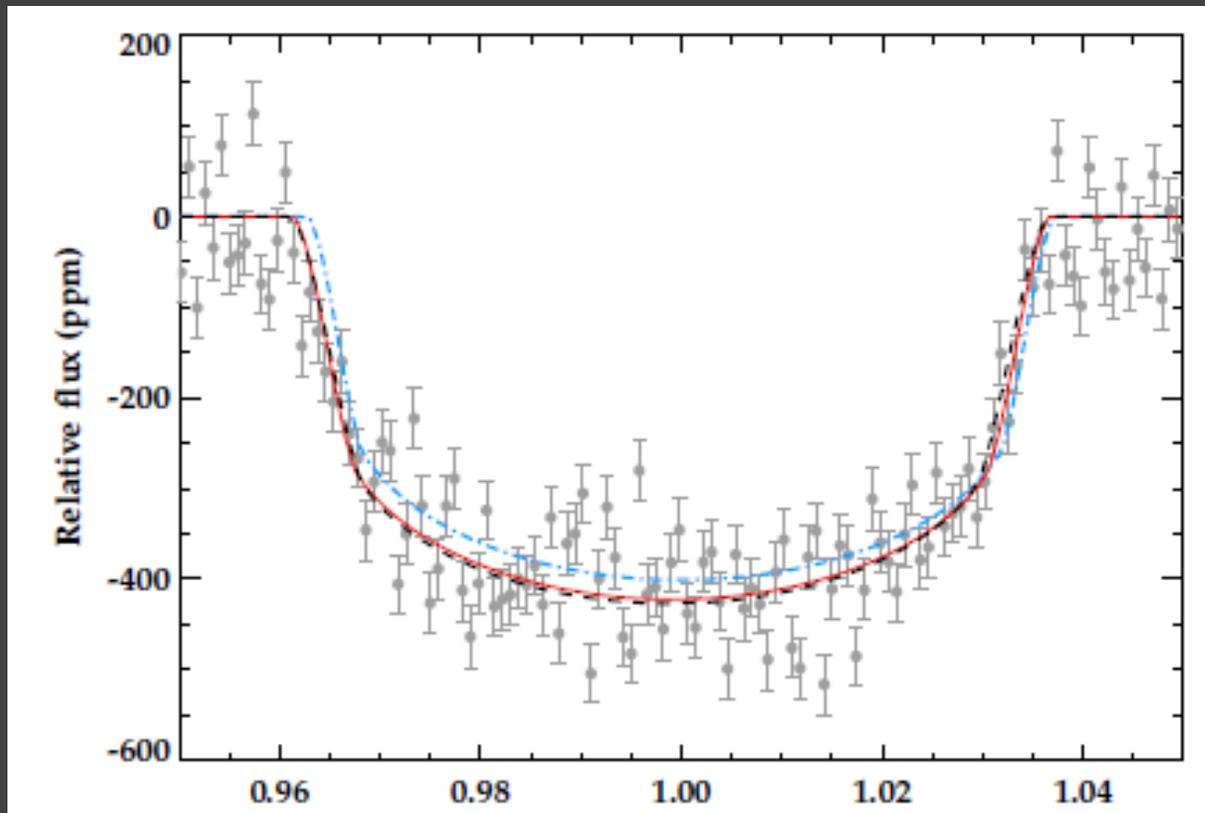
See also

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

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

Планеты вокруг звезд-гигантов

Кеплер-91

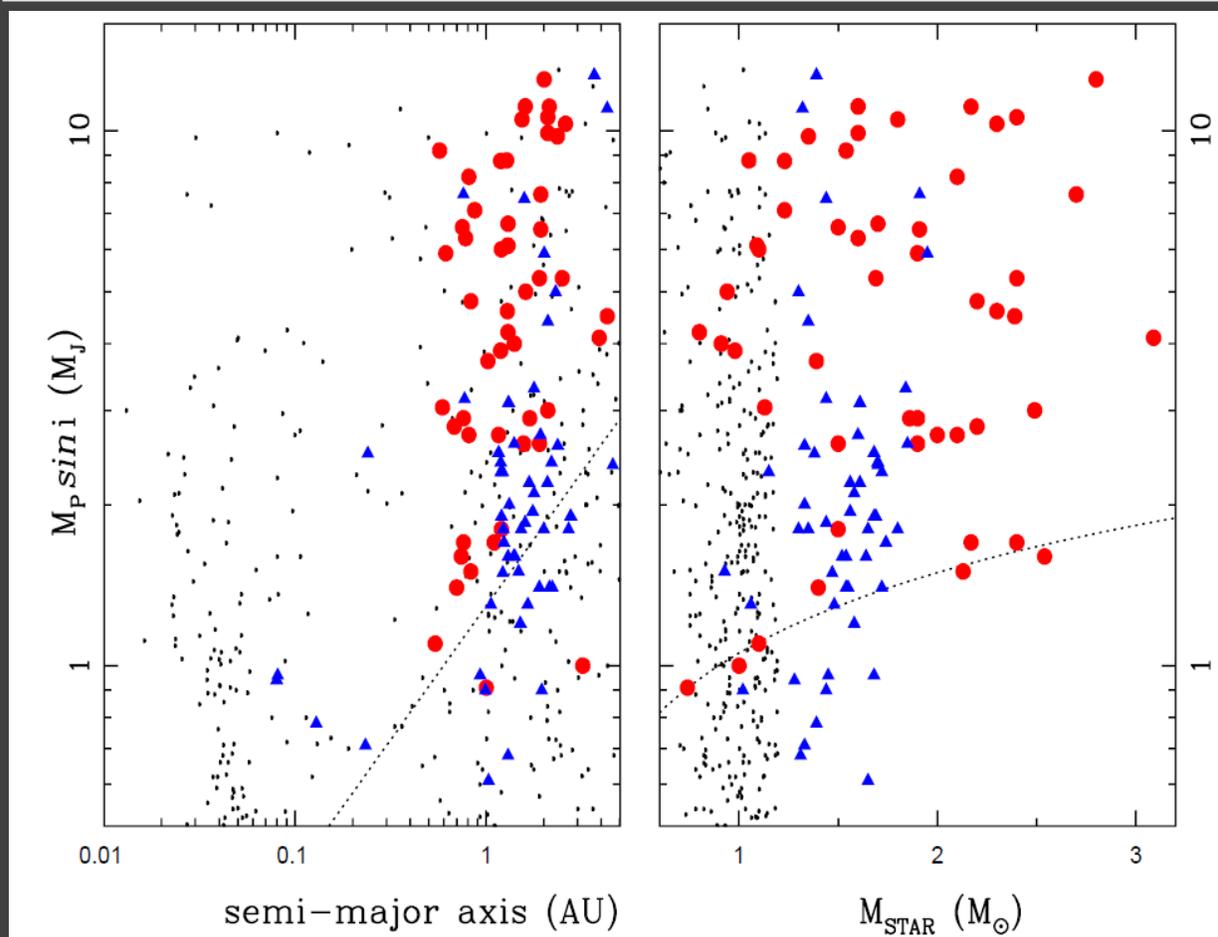


Известно несколько десятков таких планет. Они особенно интересны в связи с пониманием судьбы планетных систем на поздних стадиях эволюции звезд.

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.

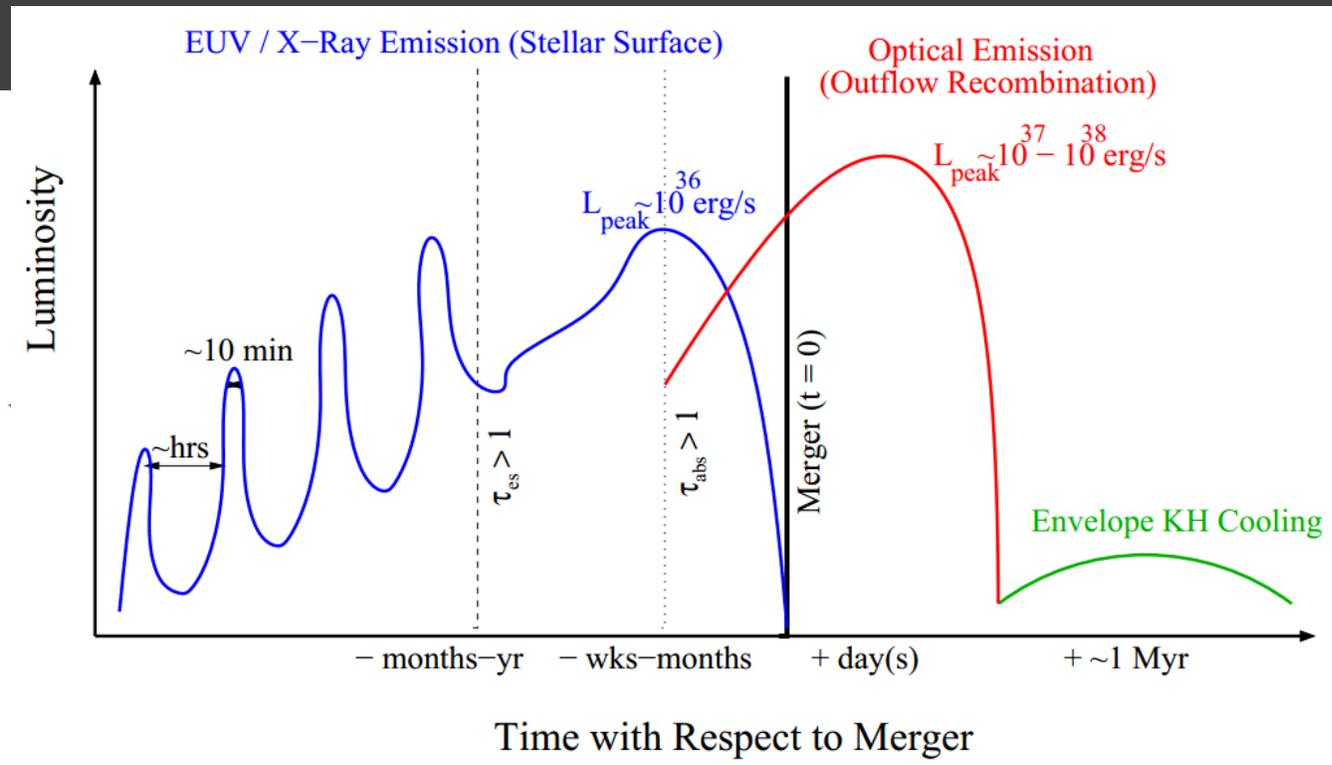
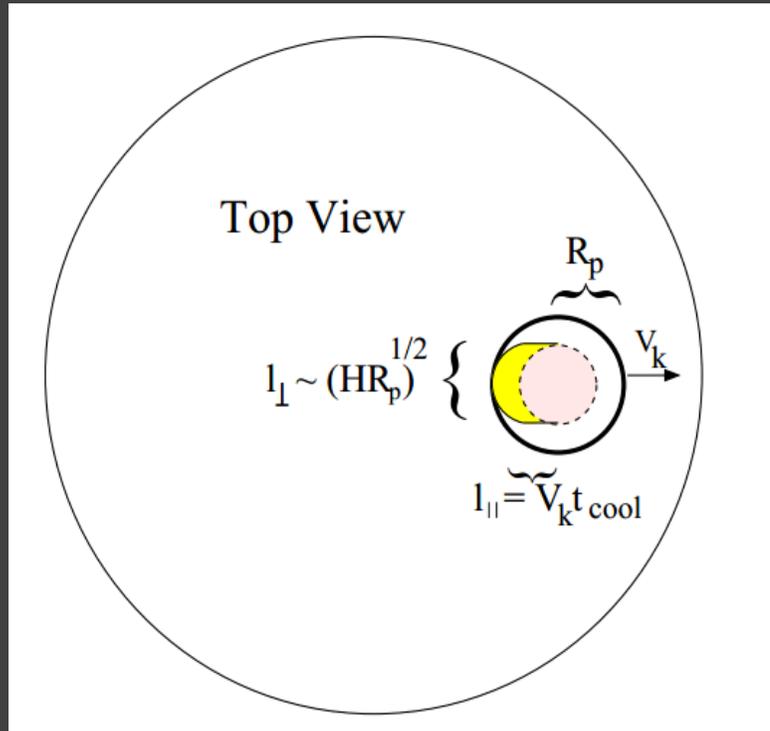
Концентрация планет на орбитах 0.5-0.9 а.е. может быть связана с приливными эффектами.

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.



Stellar radiation

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

- Robertson-Poynting drag
- Radiation pressure
- Yarkovsky effect

Giant formation by itself influences small bodies, as the iceline is significantly shifted outwards.

Yarkovsky effect: how important

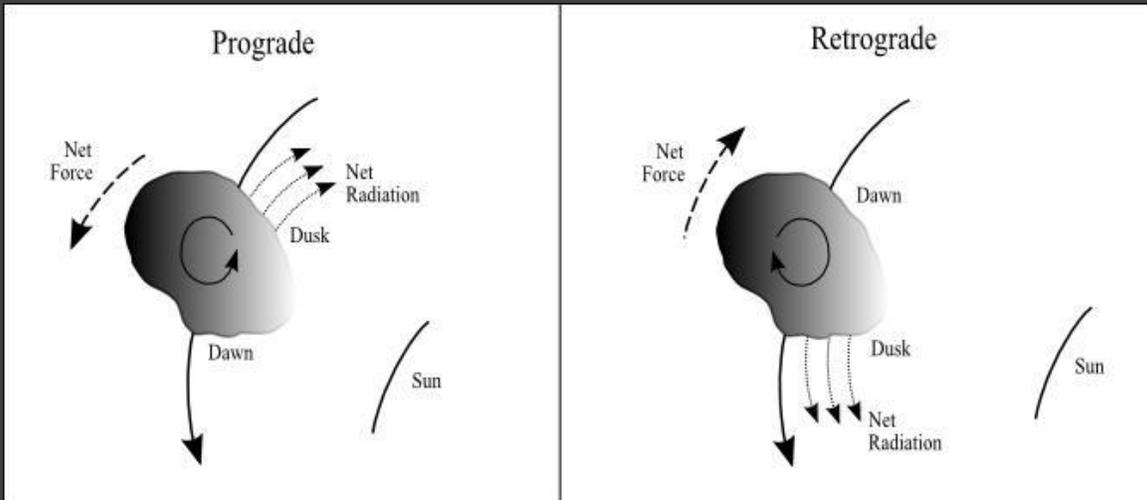
$$\left\langle \frac{de}{dt} \right\rangle^{(\text{Yarkovsky})} = \mathcal{O} \left(\frac{1}{c} \frac{A_{\text{SB}} L_{\star}}{8\pi M_{\text{SB}} n a^3} \right) \sim \frac{0.08}{\text{Myr}} \left(\frac{M_{\star}}{1M_{\odot}} \right)^{-1/2} \left(\frac{\rho_{\text{SB}}}{2 \text{ g cm}^{-3}} \right)^{-1}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

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

But note, that Yarkovsky effect is not working for small bodies!

Эффект Ярковского

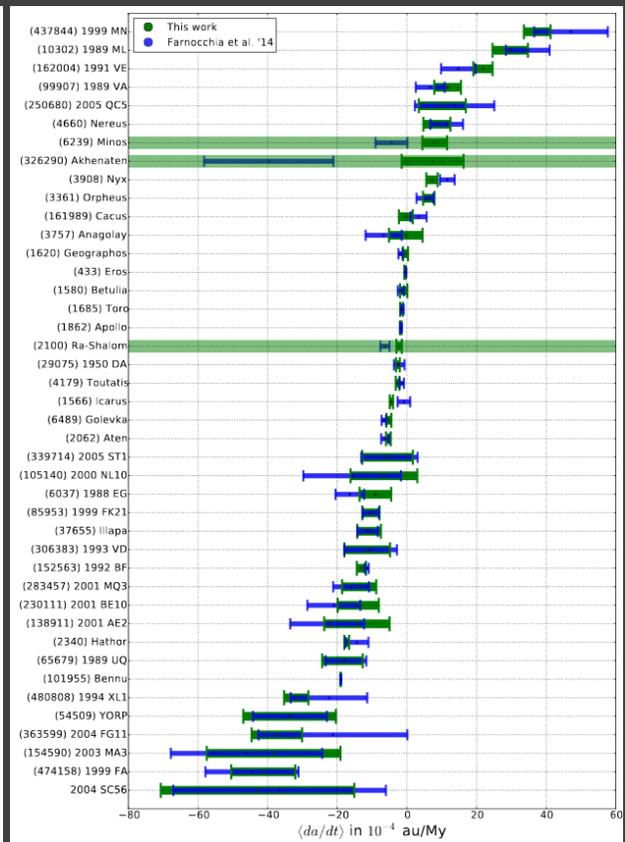
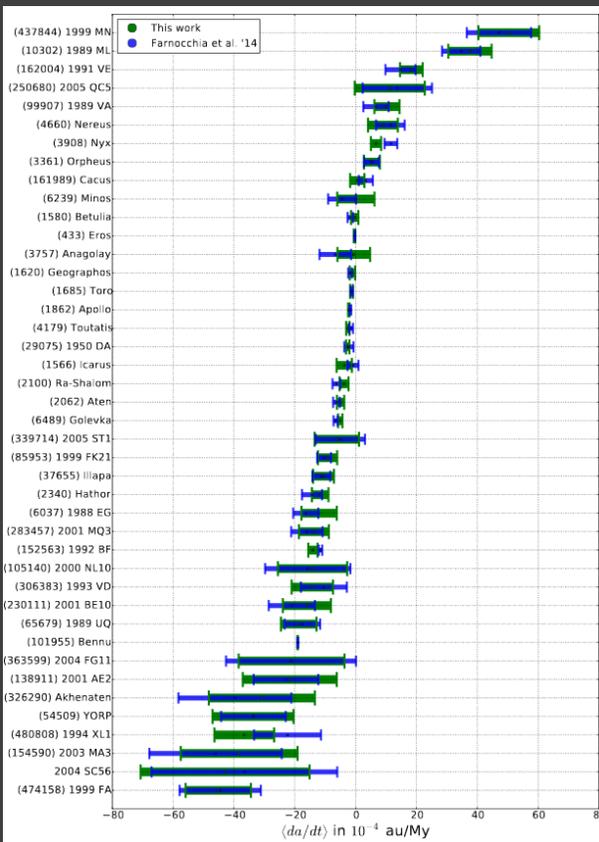
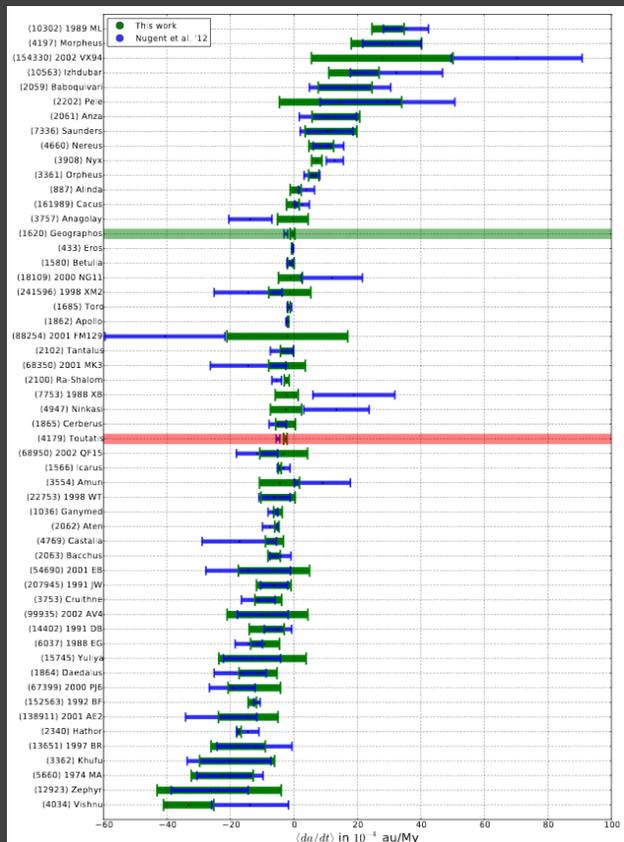
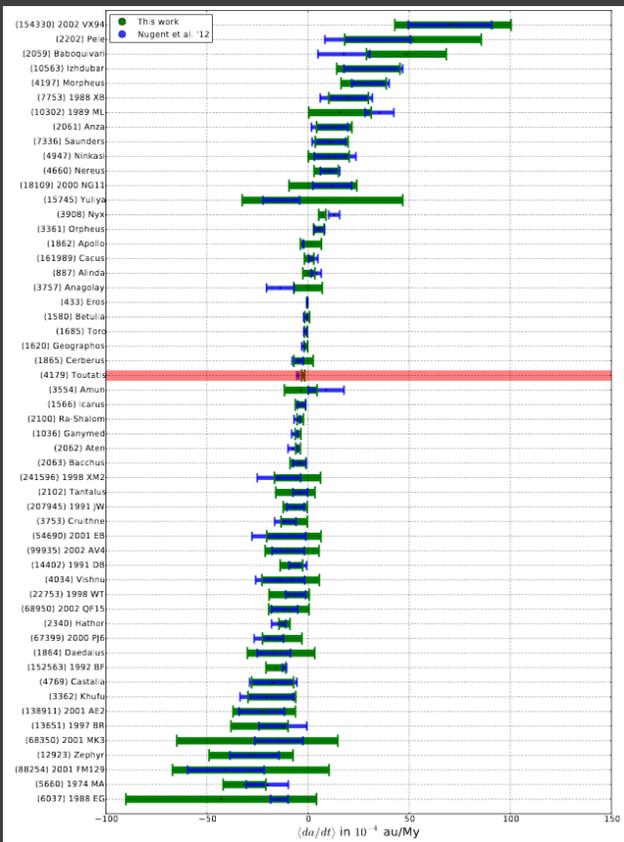
При таком вращении горячая часть будет разгонять объект. Т.е., орбита будет раскручивающейся спиралью.



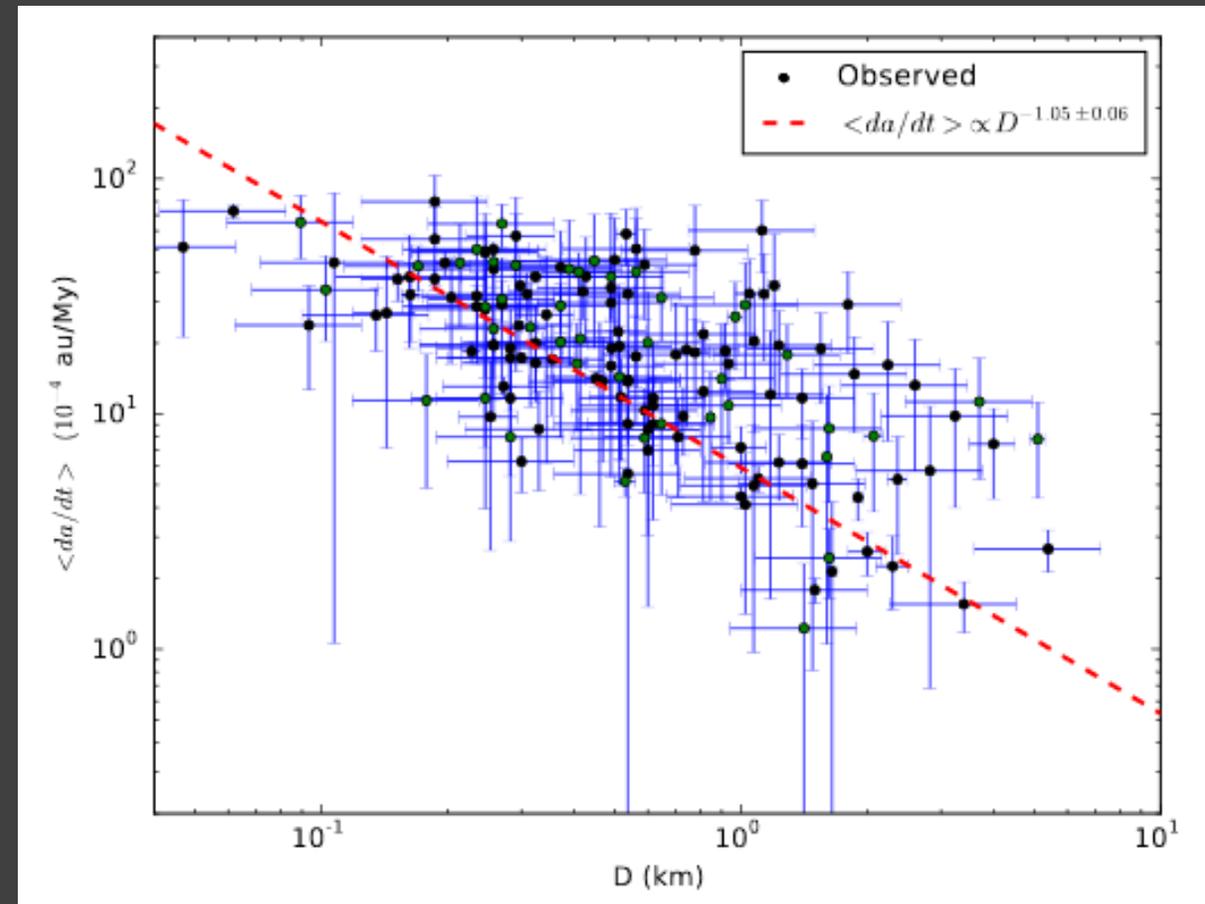
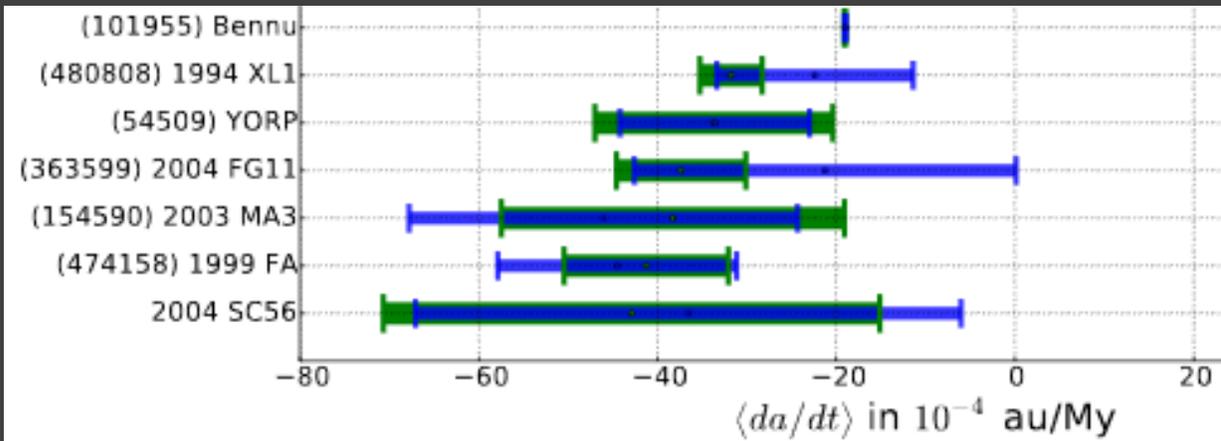
При обратном вращении тело будет тормозиться и приближаться к звезде.

Yarkovsky effect measurements

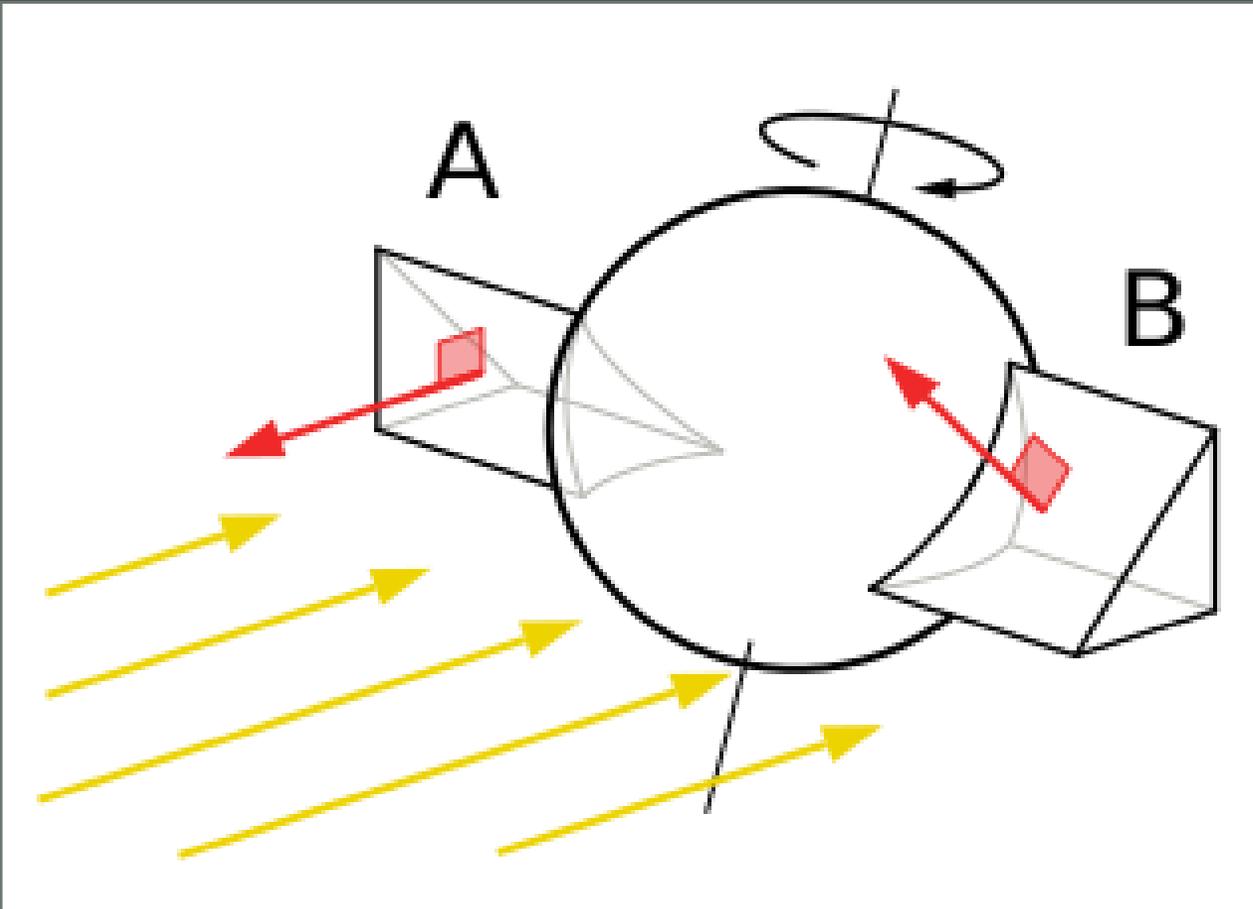
159 asteroids



Average drift and a fitting formula for it



YORP effect

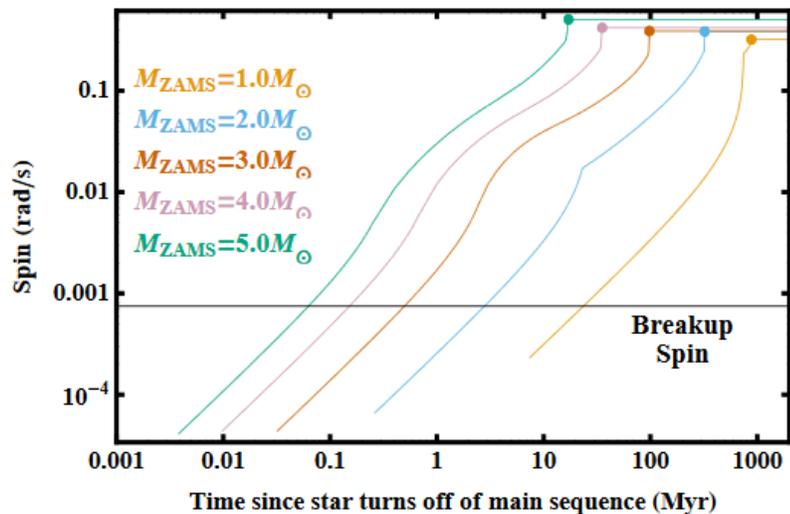


$$\left\langle \frac{ds_{\text{SB}}}{dt} \right\rangle = \frac{j}{2\pi\rho_{\text{SB}}R_{\text{SB}}^2} \left(\frac{1}{a^2\sqrt{1-e^2}} \right) \left(10^{17} \text{ kg m s}^{-2} \frac{L_{\star}}{L_{\odot}} \right),$$

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

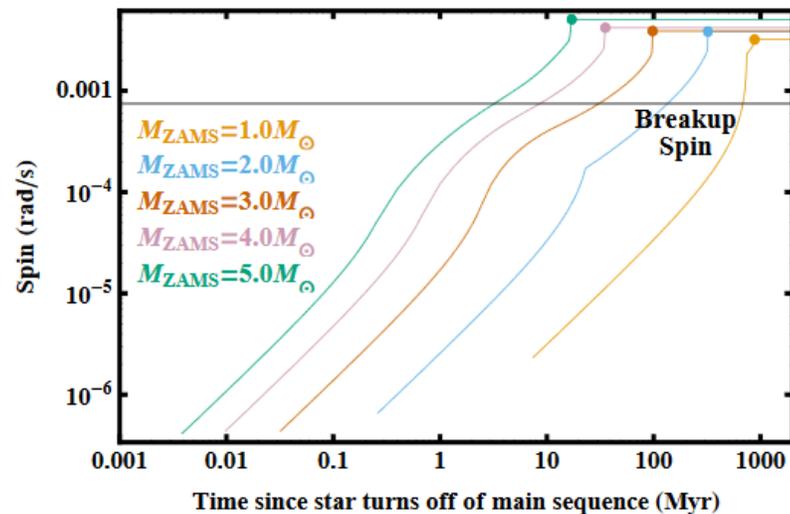
Spin evolution during giant branch phases

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

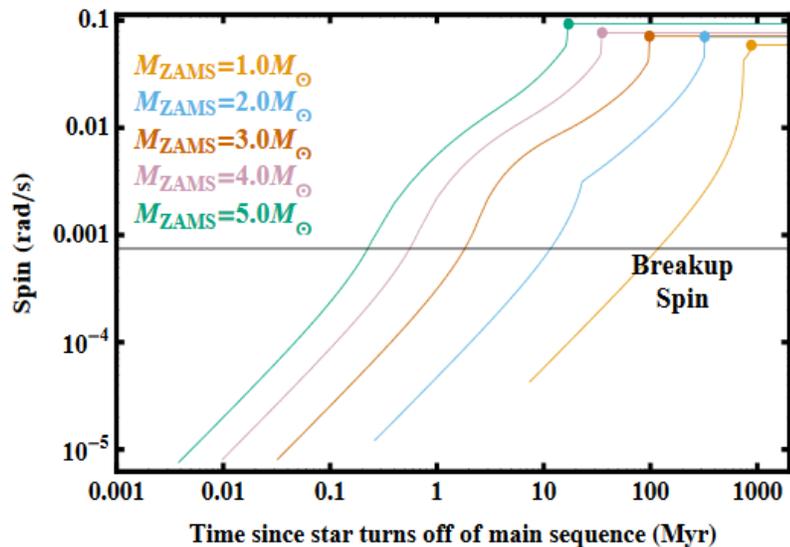


Spin evolution during giant branch phases

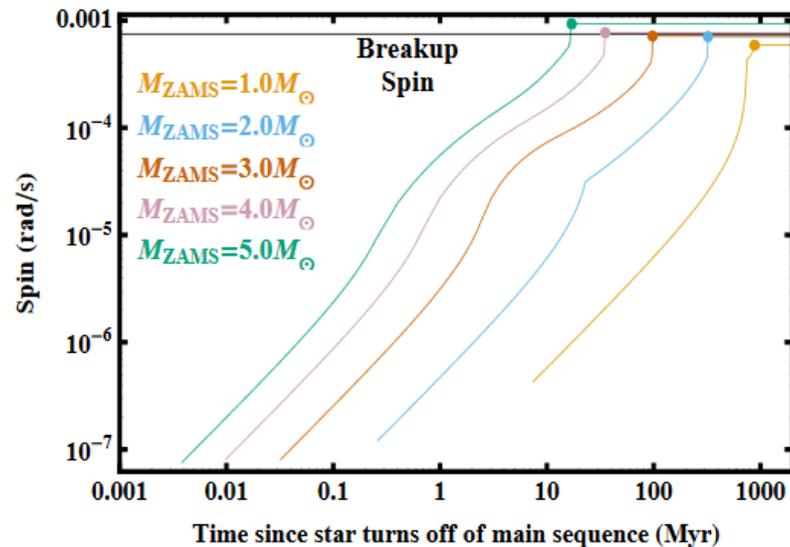
$a_0 = 3.0 \text{ au}, e = 0.00, Y = 0.01, R = 10 \text{ km}, \rho = 2 \text{ g/cm}^3$



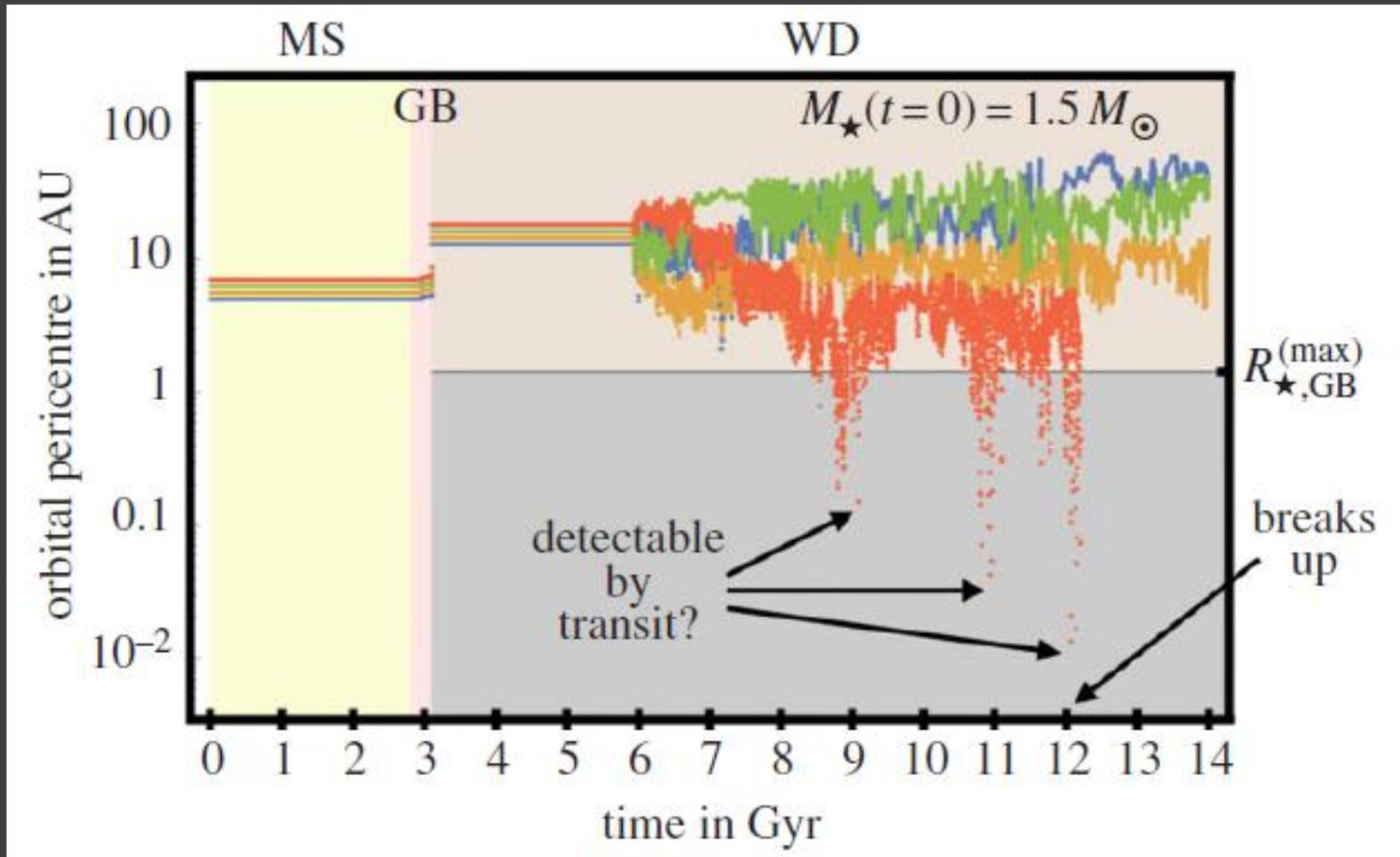
$a_0 = 7.0 \text{ au}, e = 0.00, Y = 0.01, R = 1 \text{ km}, \rho = 2 \text{ g/cm}^3$



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



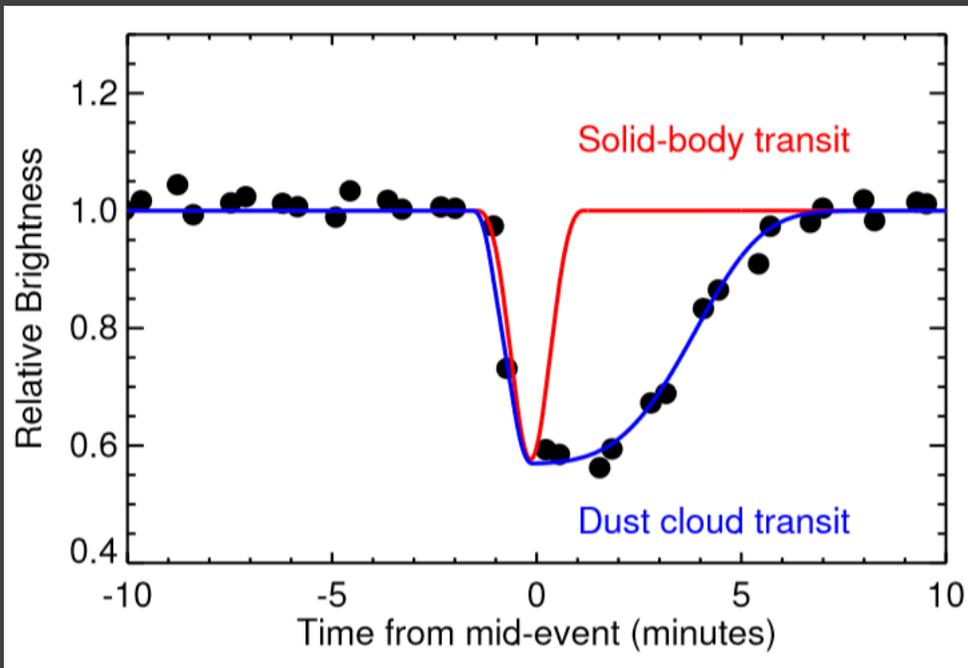
Instability after a WD formation



Four terrestrial mass planets.

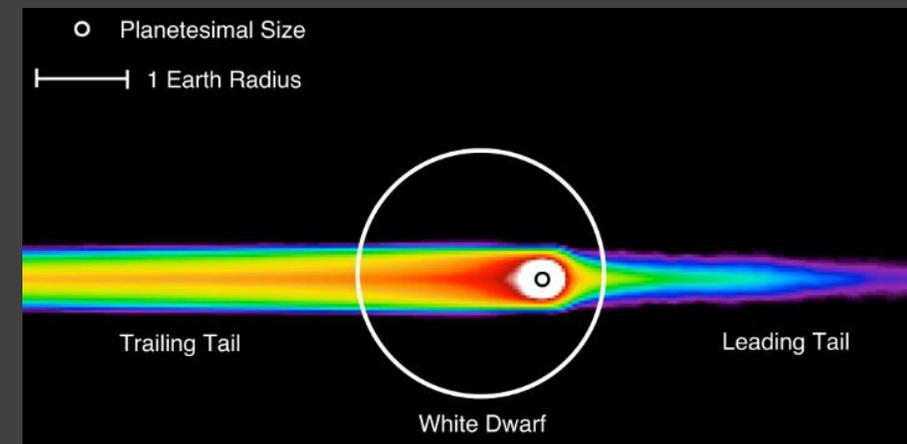
The systems becomes unstable few Gyrs after a WD formation.

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.



Planets around neutron stars

How to form:

- Survived planet
- Fall-back disc
- Evaporation of a companion
- Tidal disruption of a companion

See a detailed discussion about planet formation around NSs in Martin et al. (2016) arXiv: 1609.06409.

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

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

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

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

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

In catalogues

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

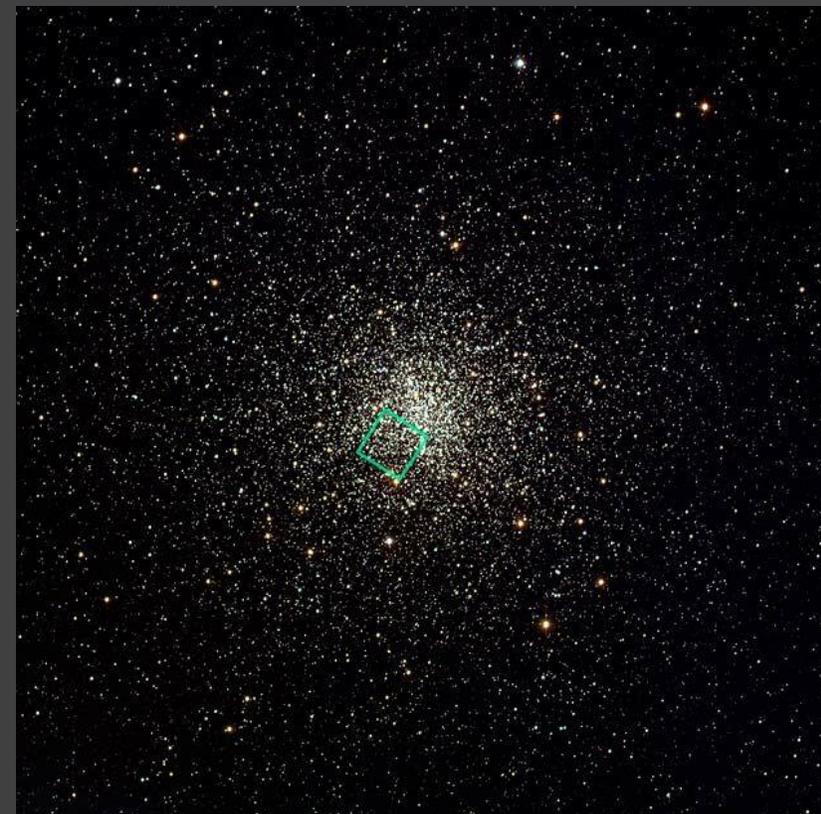
Name	$M \sin(i)$ mjupiter \pm	Semi-Major Axis au \pm	Orbital Period day \pm	Orbital Eccentricity \pm	ω deg \pm	Time of Periastron jd \pm	Velocity Semiamplitude m/s \pm	Orbit Reference	First Reference
PSR B1257+12 B		0.3214	66.54190	0.01860	250.40	2449768.10		Konacki 2003	Wolszczan 1992
PSR B1257+12 C		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.

