



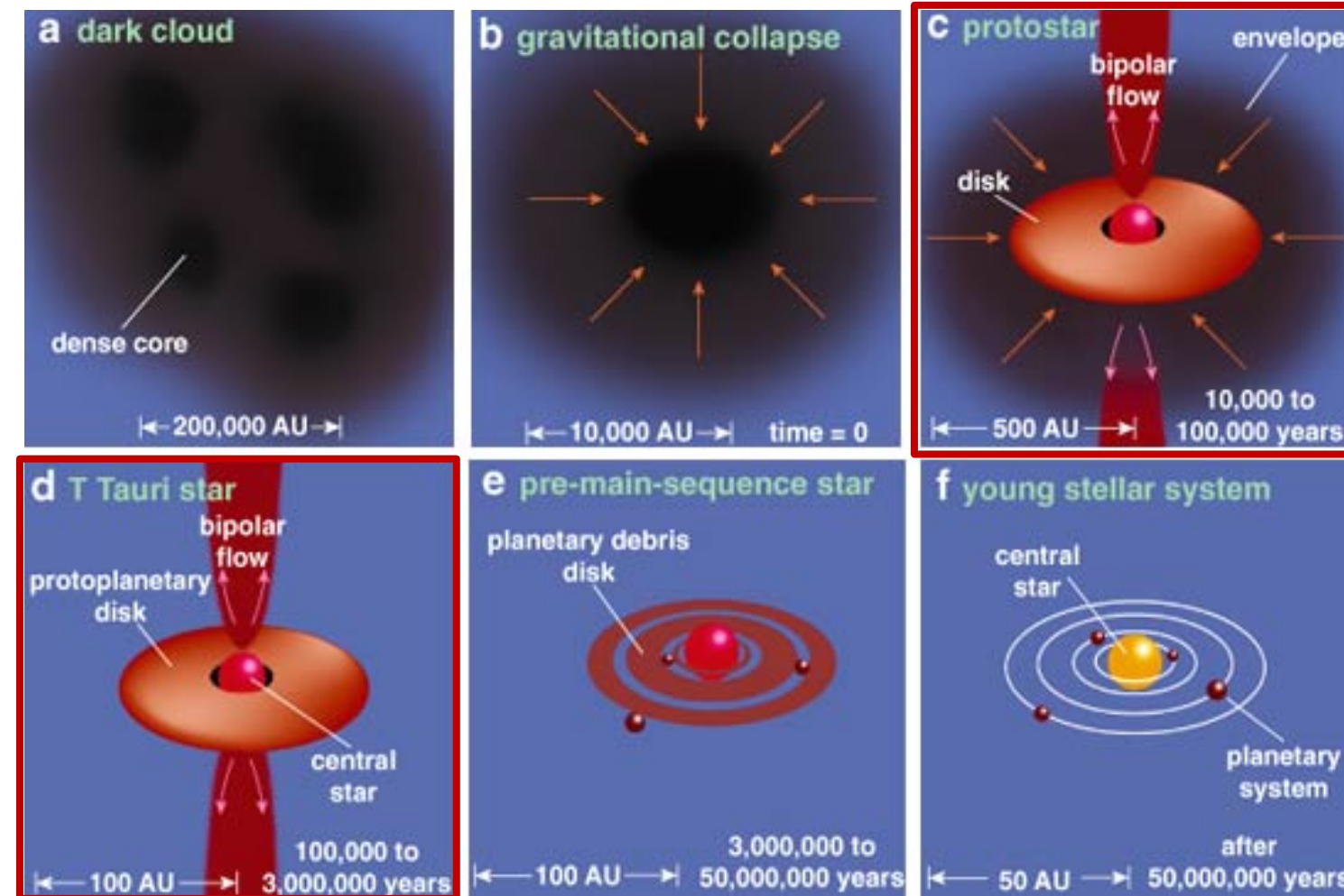
Влияние аккреции на эволюцию маломассивных звезд и коричневых карликов до главной последовательности

Вардан Элбакян

*Научно-исследовательский институт
физики ЮФУ*

Соавторы: Эдуард Воробьев, Takashi Hosokawa,
Yuuya Sakurai, Manuel Guedel, Harold Yorke

Картина формирования маломассивных звезд



Аккреция вещества:

Происходит с **момента образования протозвездного ядра**, в центра облака, до **полной диссипации протозвездного диска**.

Длиться **всего** несколько млн. лет.

Имеет **переменный** характер

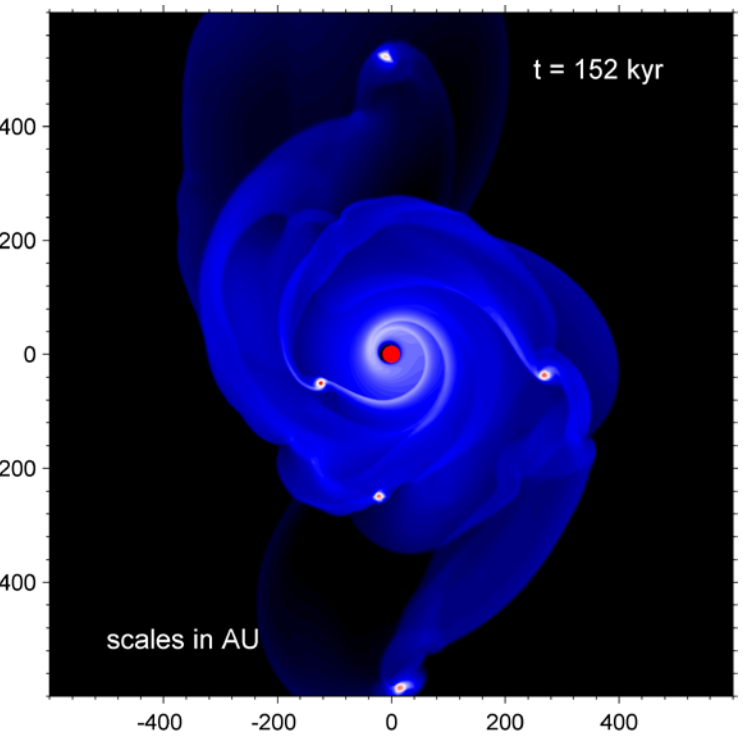
Начальные массы дозвездных облаков: $0.06 - 1.7 M_{\text{sun}}$

Начальное соотношение вращательной энергии к гравитационной: $\beta = 0.28\% - 12\%$

Является ли переменность аккреции в гравитационно неустойчивых дисках реальным эффектом?

- Переменность аккреции решает проблему светимости (*Dunham & Vorobyov 2012*)
- Хорошо согласуется со статистикой вспышек FU Orionis (*Vorobyov & Basu 2015*)
- Переменность аккреции согласуется с расстоянием узлов, наблюдаемых в протозвездных джетах (*Elbakyan et al., 2017, в подг.*)
- Амплитуды переменности аккреции для короткие периодов (≤ 10 лет) НИЖЕ чем наблюдаемые в молодых областях звездообразования (*Elbakyan et al., 2016*)

Модель



Гидродинамический код **FEoSAD**
[Vorobyov & Basu (2015)]

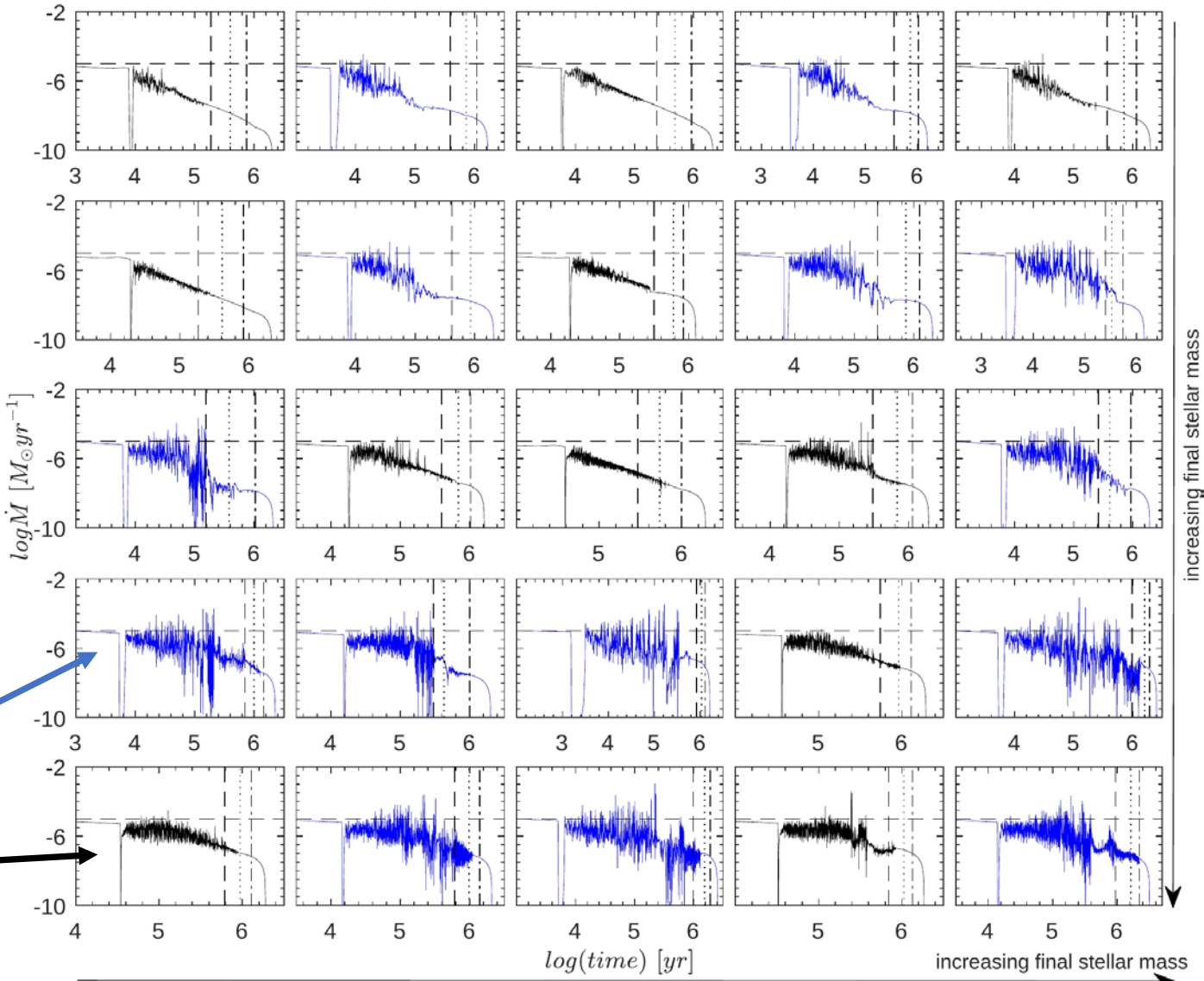
Темпы аккреции вещества
рассчитаны, начиная с
момента формирования
протозвезды до возраста
диска в 2-3 млн. лет.



Массивные коричневые карлики

сильно переменные
и
квазистационарные
темпы аккреции

Массивные коричневые карлики



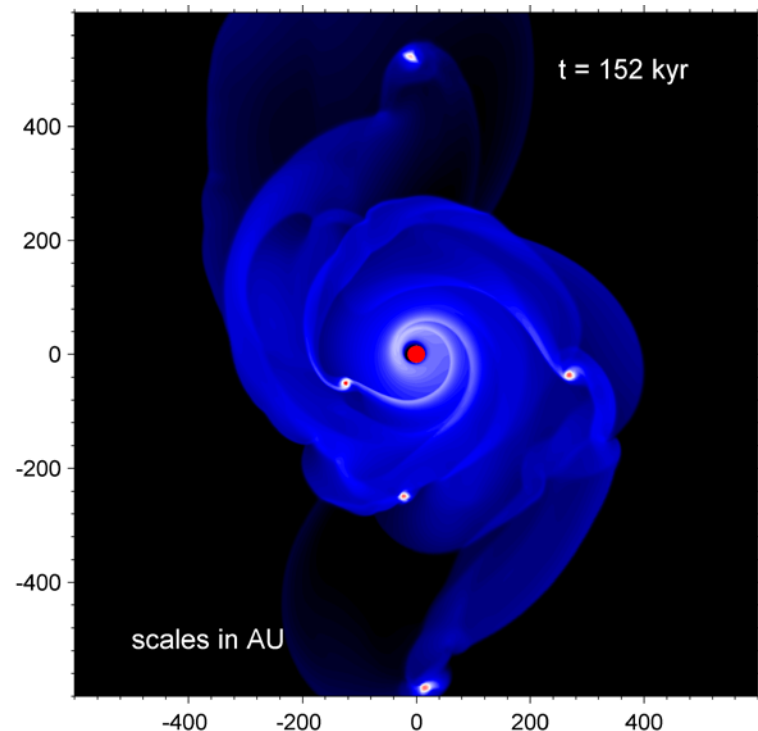
increasing final stellar mass

Звезды солнечной массы

Звезды солнечной массы

Модель

Нет явной корреляции между переменностью аккреции и массой звезды.

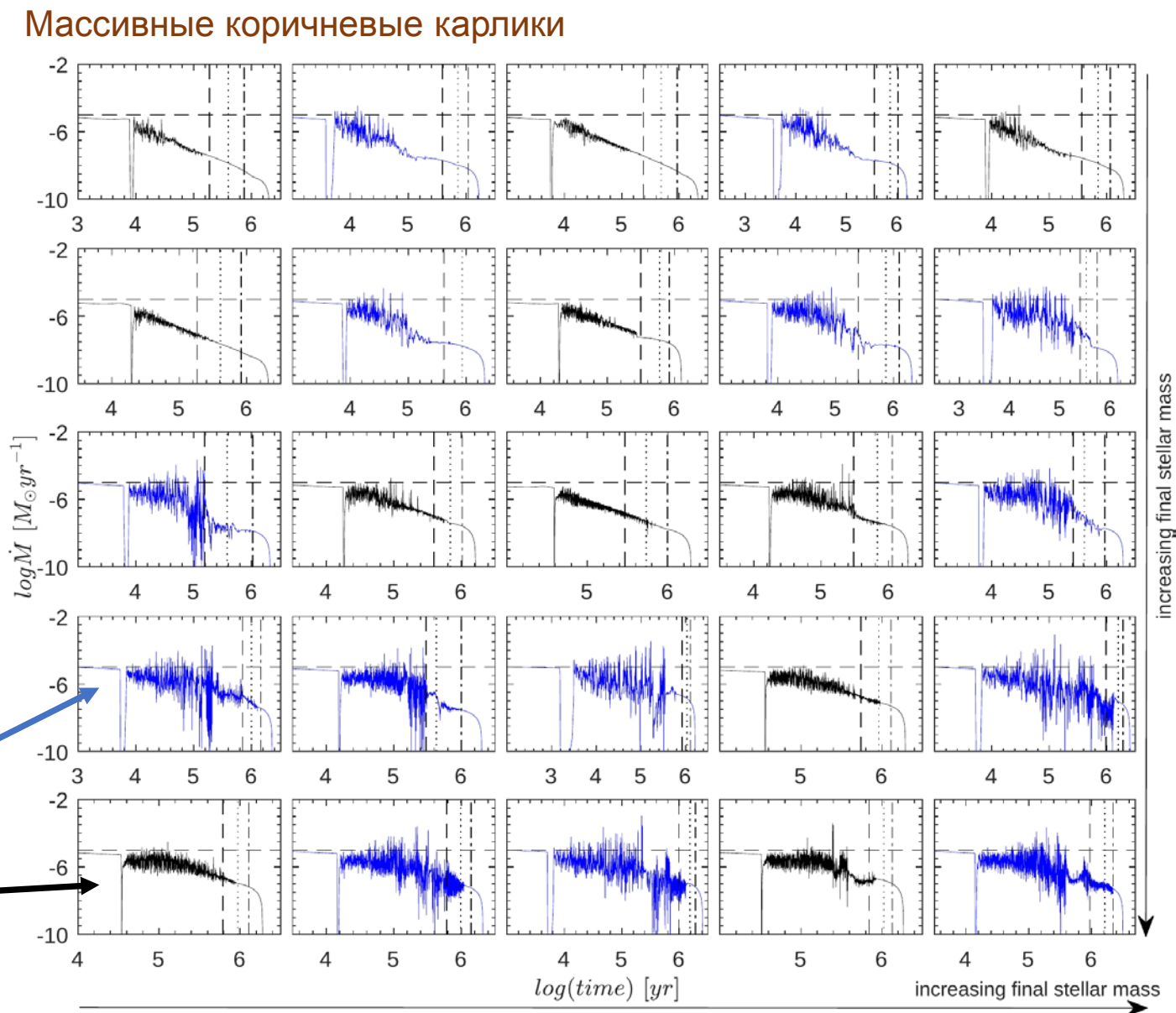


Гидродинамический код **FEoSAD**
[Vorobyov & Basu (2015)]

Темпы аккреции вещества
рассчитаны, начиная с
момента формирования
протозвезды до возраста
диска в 2-3 млн. лет.

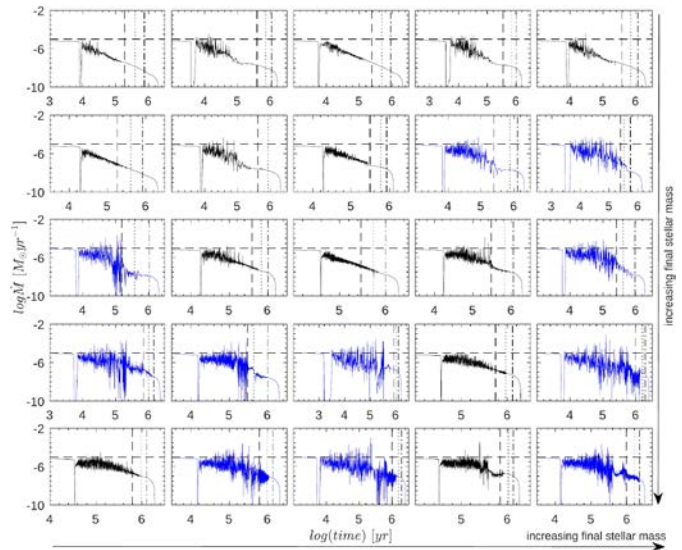
сильно переменные
и
квазистационарные
темпы аккреции

Массивные коричневые карлики

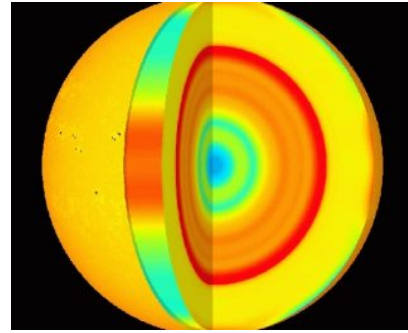


Звезды солнечной массы

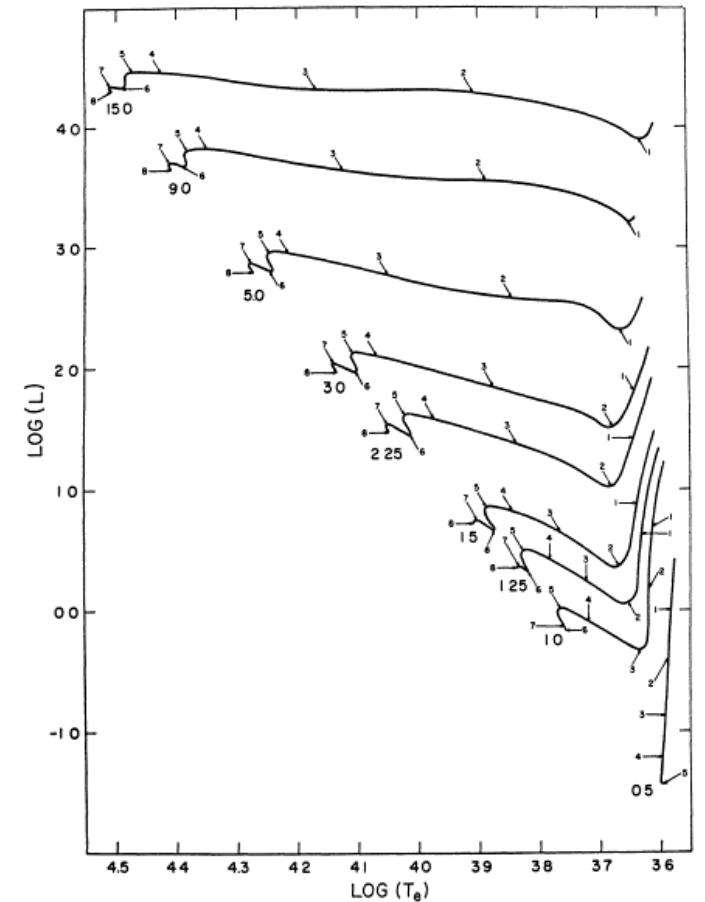
Модель



Темпы аккреции из ГД моделей



Код звездной эволюции **STELLAR**
[Yorke & Bodenheimer (2008), Sakurai (2015)]



Эволюционные треки звезд

Начальные параметры ядра: масса = $5 M_{\text{Jupiter}}$; радиус = $3 R_{\text{Jupiter}}$

Конечные звездные массы: от $0.04 M_{\text{sun}}$ до $1.3 M_{\text{sun}}$

Звездные возраста: до 25 млн. лет
(в том числе, аккреция происходит, всего, на протяжении 2-3 млн. лет.)

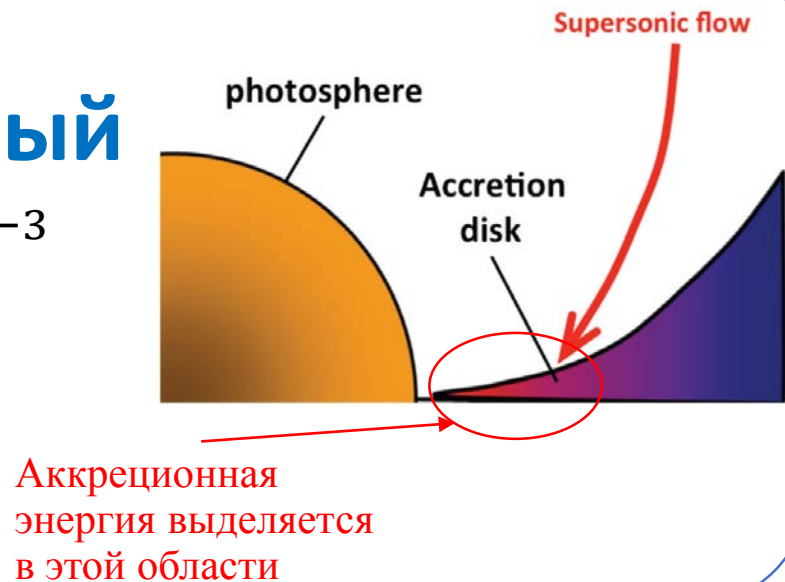
Модель

$E_{acc} = \alpha G M_* \dot{M} / 2 R_*$ - аккреционная энергия, поглощаемая звездой в единицу времени

α - тепловая эффективность аккреции

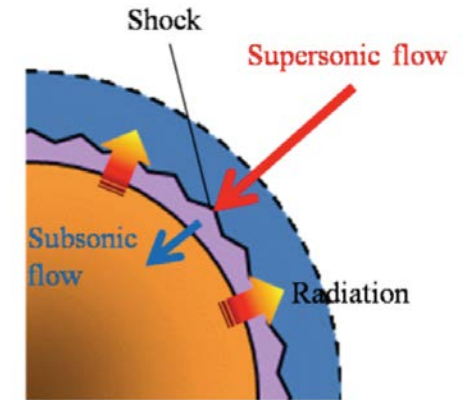
Холодный

$$\alpha = 10^{-3}$$



Горячий

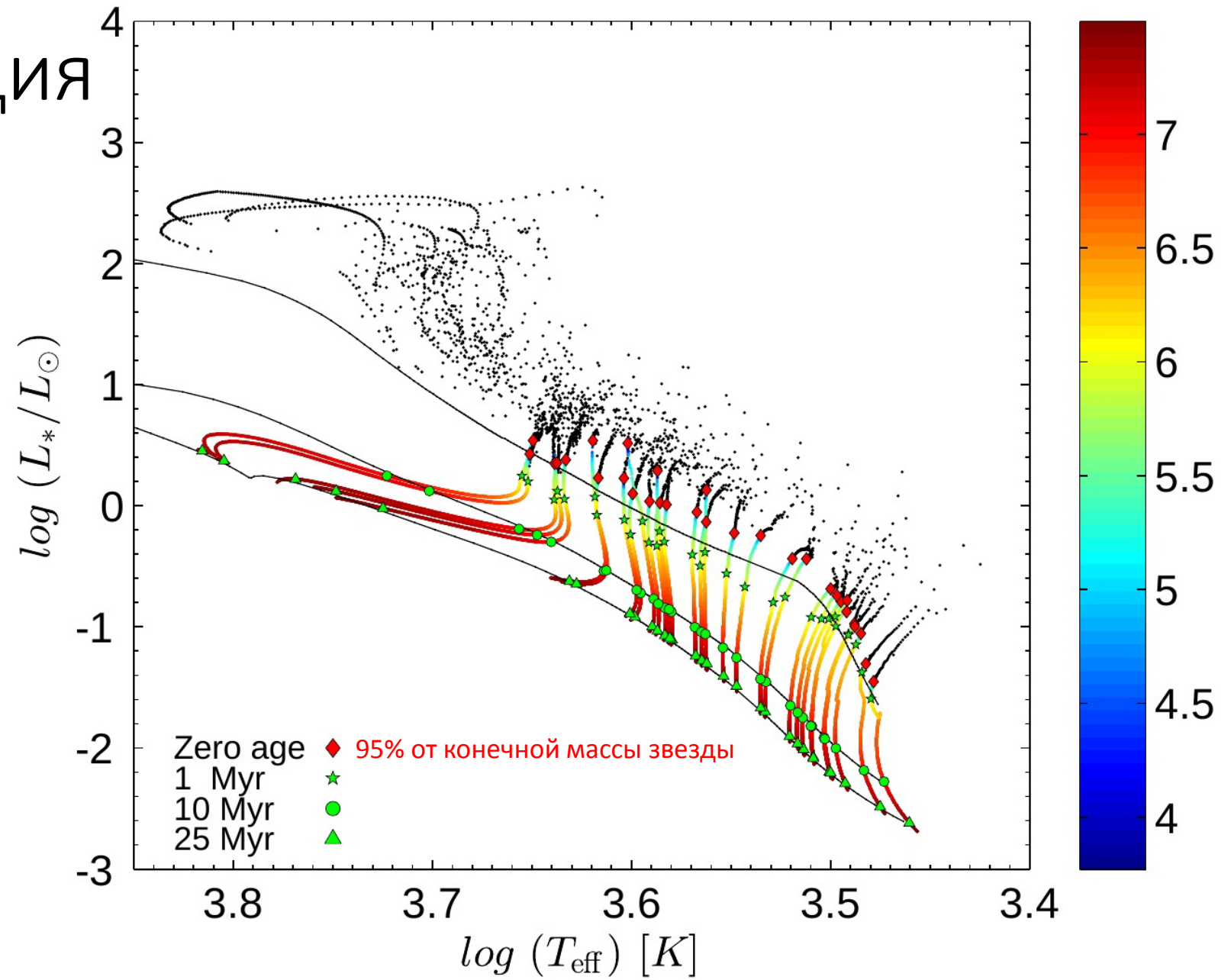
$$\alpha = 0.1$$



Гибридный

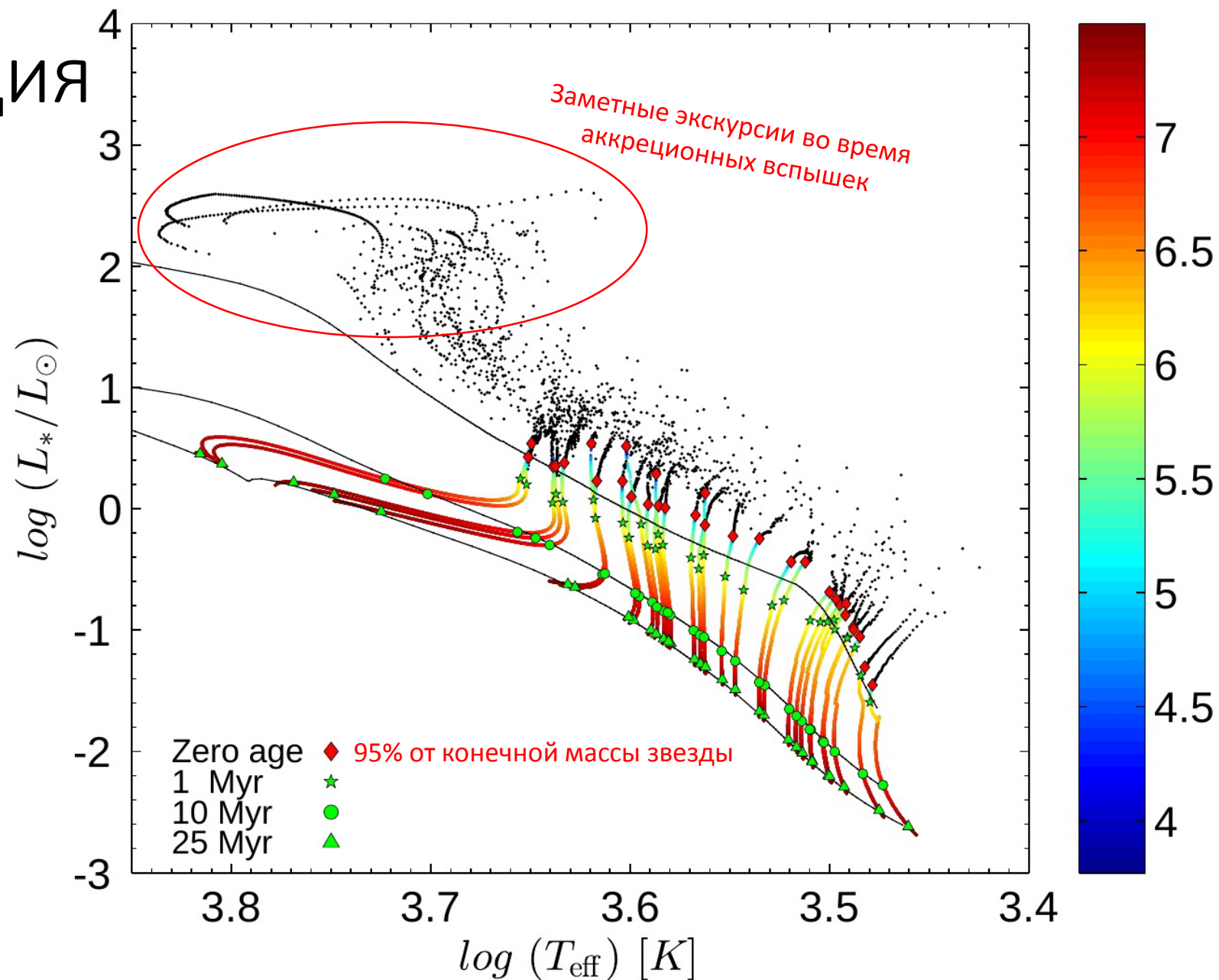
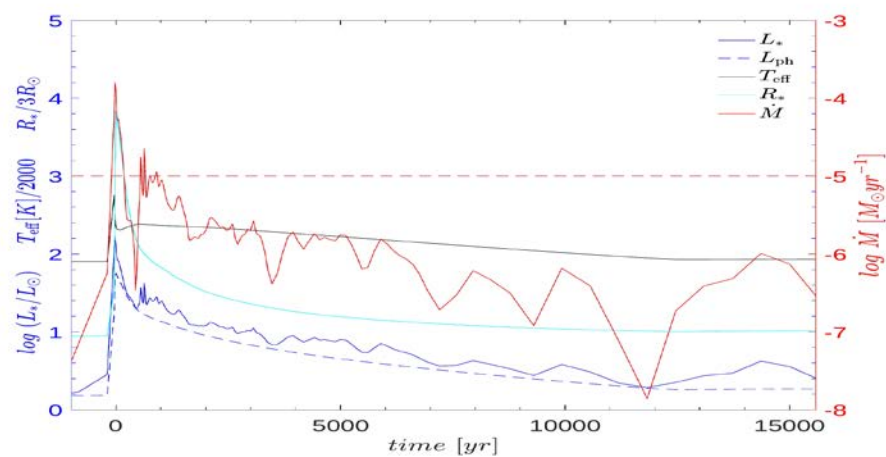
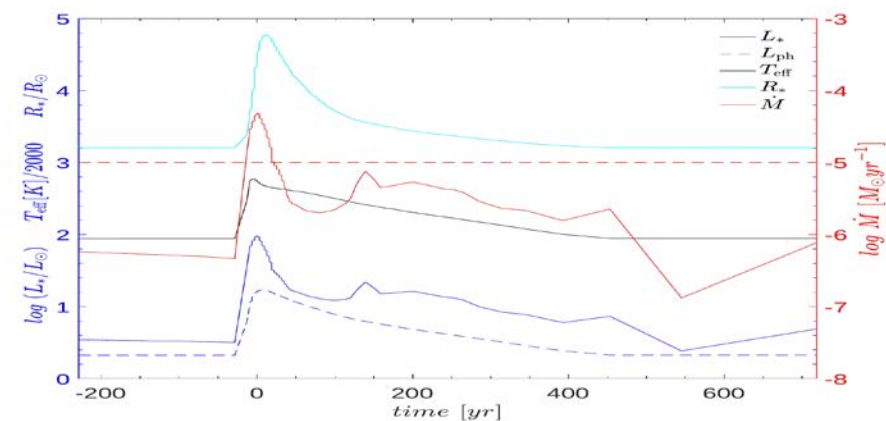
$$\alpha = \begin{cases} 10^{-3}, & \text{if } \dot{M} < 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}, \\ \dot{M} \times 10^4 \left[\frac{\text{yr}}{M_{\odot}} \right], & \text{if } 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \leq \dot{M} \leq 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}, \\ 0.1, & \text{if } \dot{M} > 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}. \end{cases}$$

Гибридная аккреция

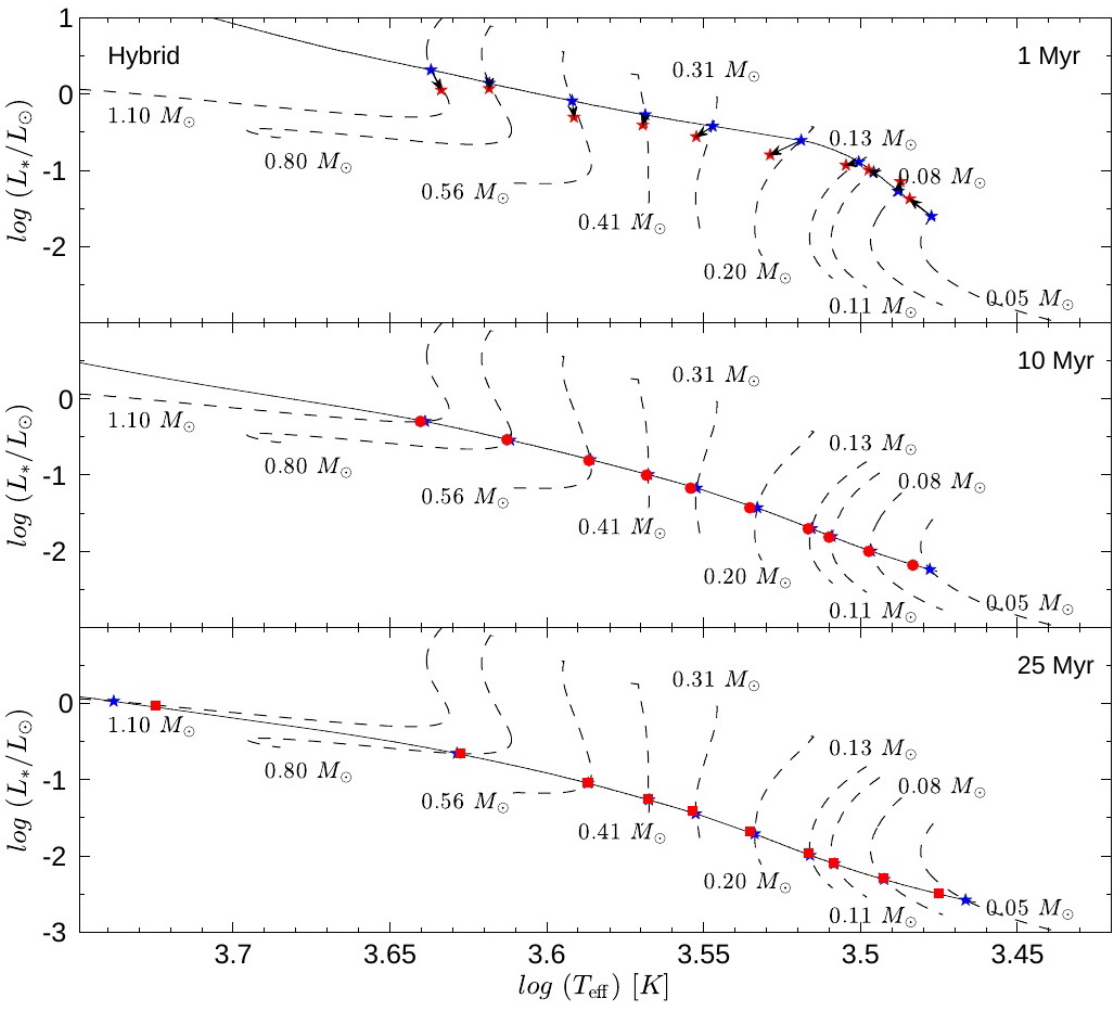


Гибридная аккреция

$$t_{\text{therm}} = \frac{1}{\langle L_{\text{ph}} \rangle} \sum_i \alpha_i \frac{GM_{*,i} \dot{M}_i}{R_{*,i}} \Delta t_i,$$



Гибридная аккреция

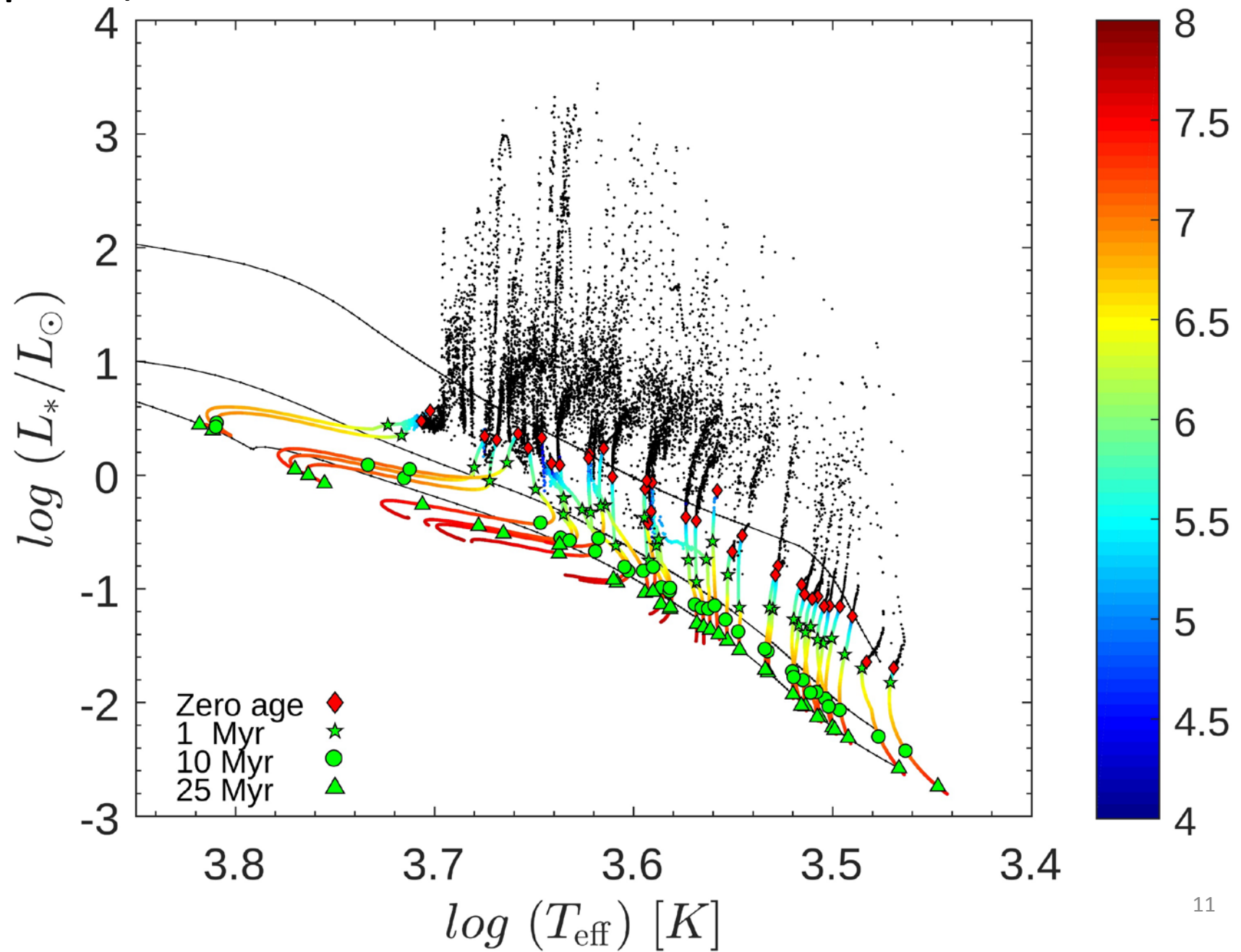


$$\Delta X = 100 \frac{X_{\text{accr}} - X_{\text{non-accr}}}{X_{\text{non-accr}}},$$

	1 Myr			10 Myr			25 Myr		
M_* [$M_\odot$]	ΔL_* [%]	ΔT_{eff} [%]	ΔR_* [%]	ΔL_* [%]	ΔT_{eff} [%]	ΔR_* [%]	ΔL_* [%]	ΔT_{eff} [%]	ΔR_* [%]
0.05	69.17	1.60	23.98	14.03	1.26	4.22	24.34	1.99	7.20
0.08	34.11	-0.17	15.35	-0.27	0.16	-0.46	4.07	0.07	1.88
0.11	6.91	0.36	2.67	-1.69	0.19	-1.22	4.67	0.10	2.10
0.13	-9.31	0.94	-6.54	-0.60	0.24	-0.77	6.50	0.15	2.86
0.20	-35.62	2.31	-25.45	-0.09	0.56	-0.55	9.31	0.33	4.44
0.31	-27.09	1.20	-20.31	0.25	0.43	-0.76	9.45	0.28	3.99
0.41	-26.42	0.17	-18.04	-1.53	0.13	-1.00	6.25	0.08	2.92
0.56	-39.30	-0.14	-21.86	-2.65	0.12	-1.52	3.66	0.04	1.74
0.80	-14.47	0.02	-11.78	-3.05	0.13	-1.80	0.11	-0.34	0.77
1.10	-45.25	-0.74	-24.90	4.00	1.41	-0.81	1.43	-1.27	3.39

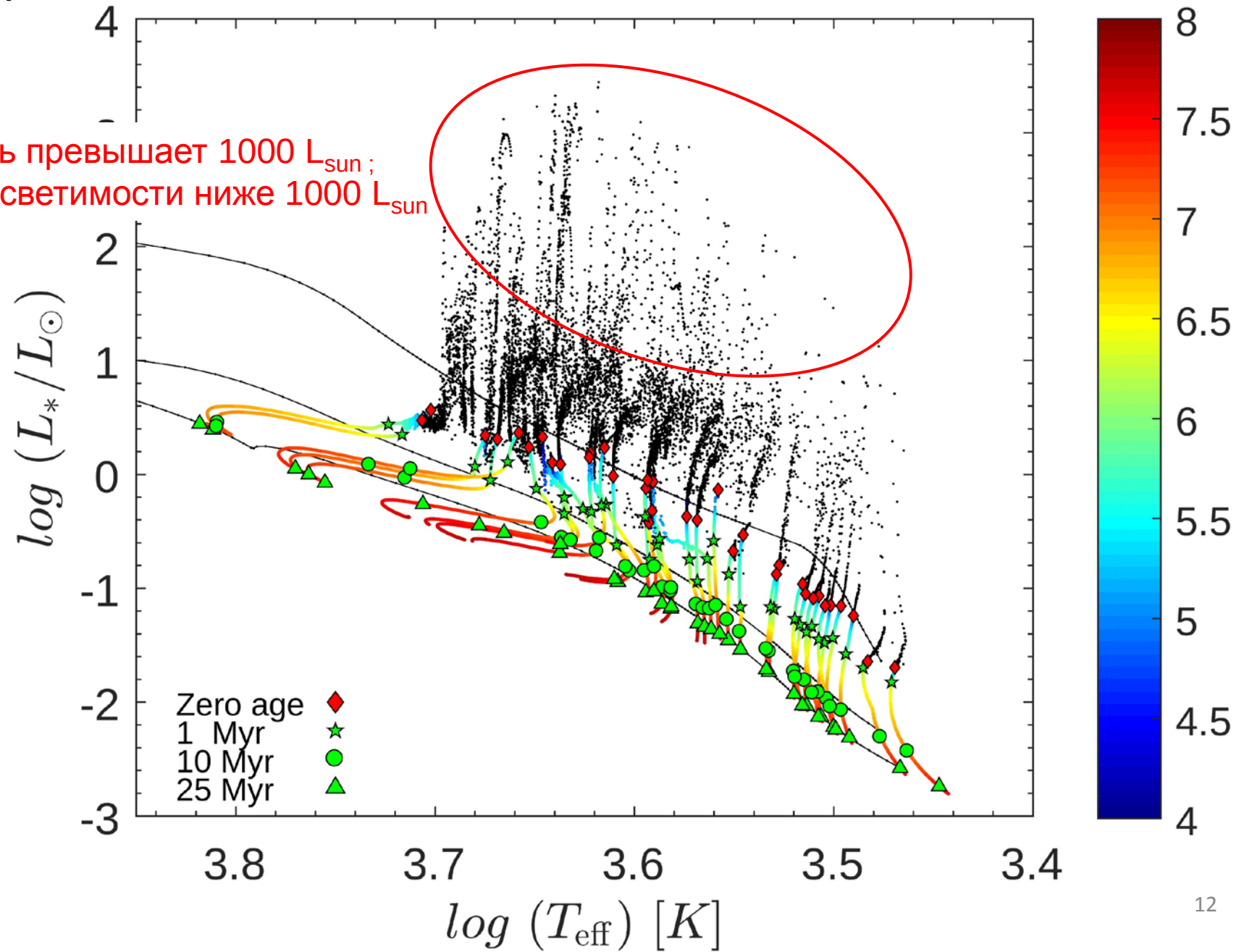
Сравнение аккрецирующих моделей (красные символы) с неаккрецирующими (синие символы)

Холодная аккреция

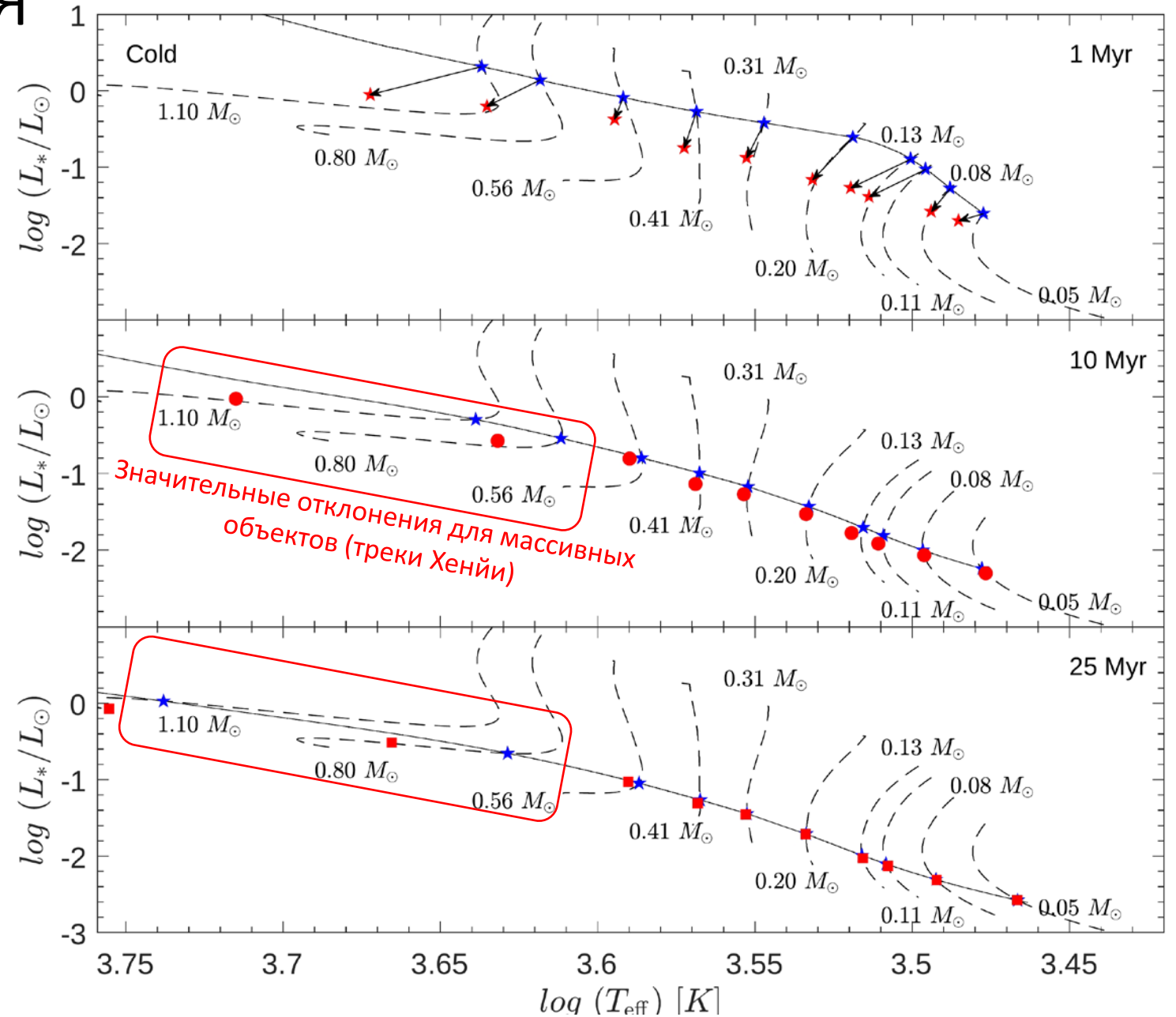


Холодная аккреция

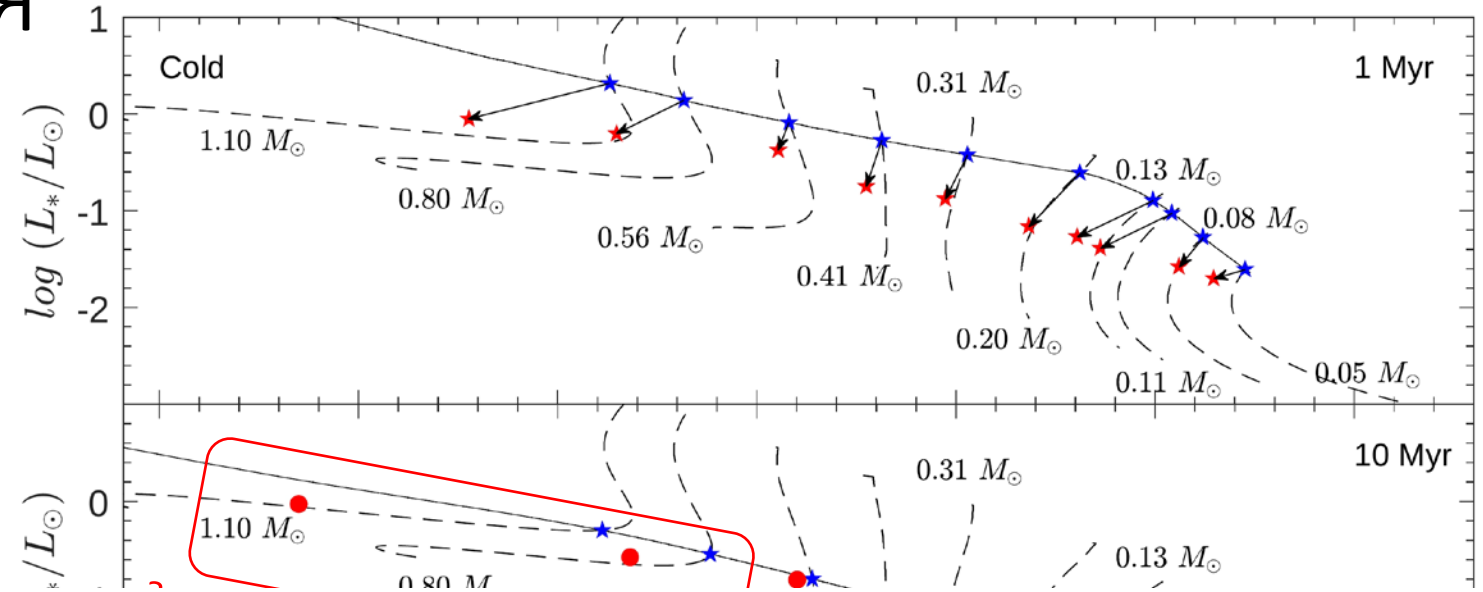
Во время вспышек светимость превышает $1000 L_{\text{sun}}$;
Все известные Flog-ы имеют светимости ниже $1000 L_{\text{sun}}$



Холодная аккреция



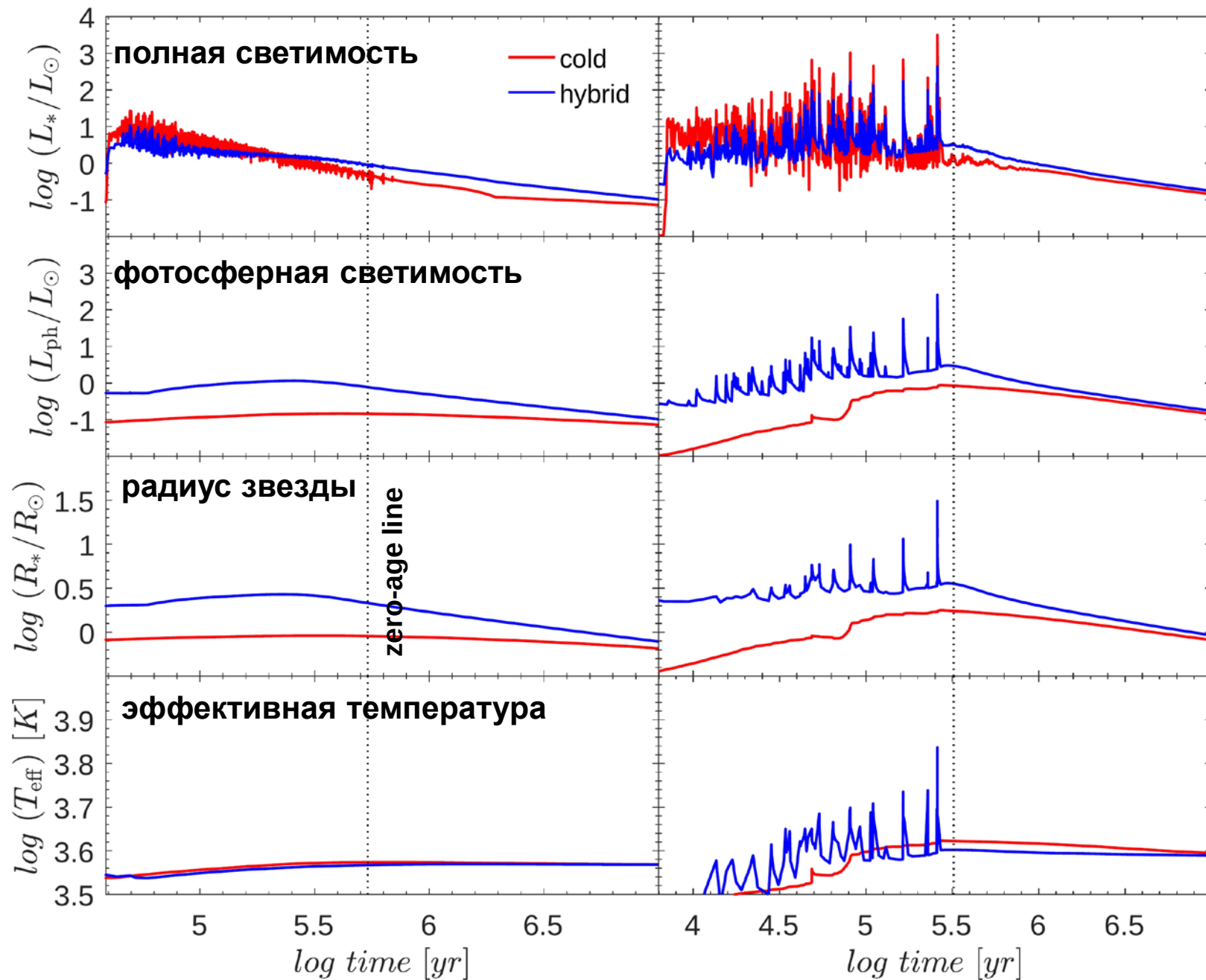
Холодная аккреция



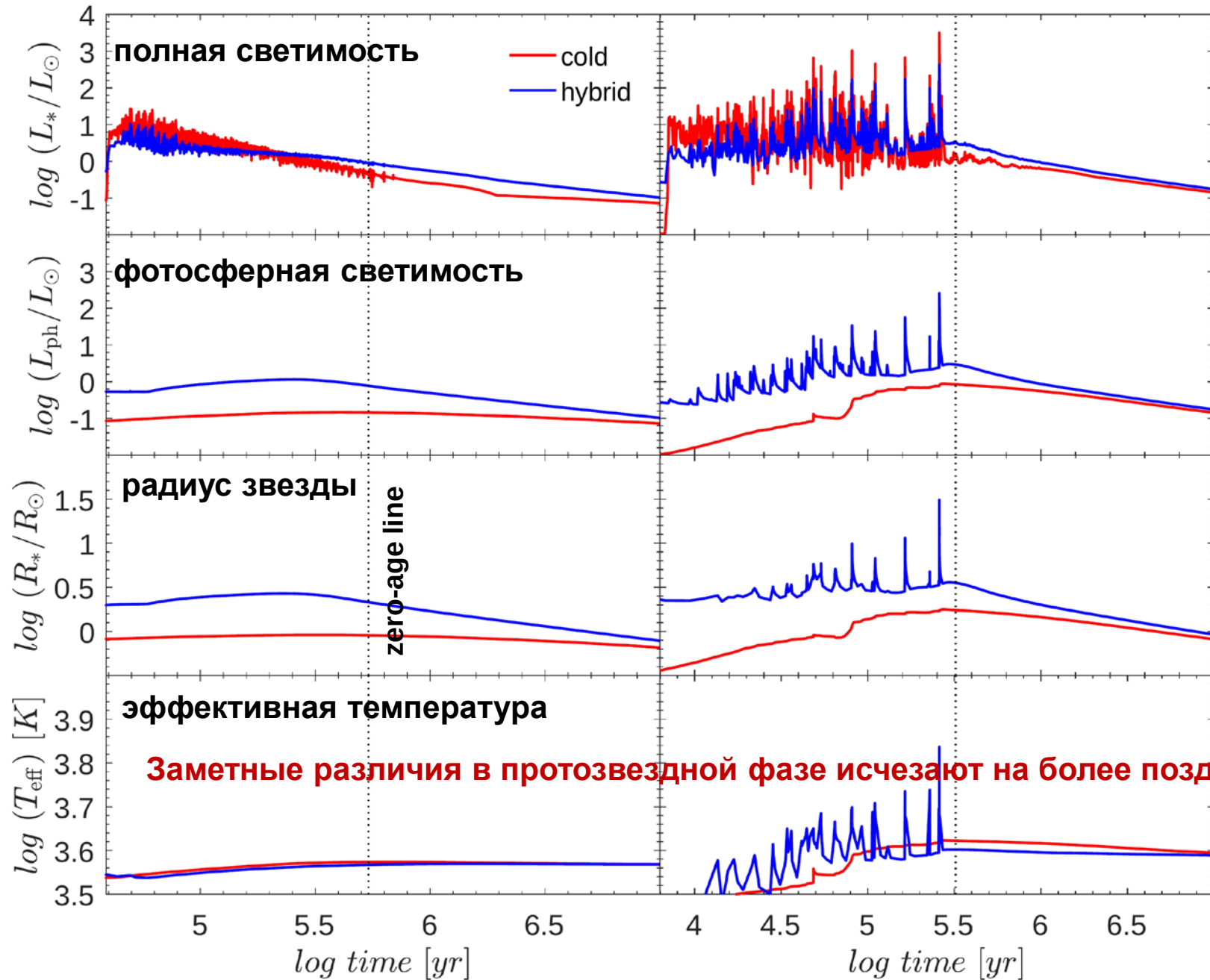
Относительные отклонения между аккрецирующими моделями и неаккрецирующими изохронами

	1 Myr			10 Myr			25 Myr		
M_* [$M_\odot$]	ΔL [%]	ΔT_{eff} [%]	ΔR [%]	ΔL [%]	ΔT_{eff} [%]	ΔR [%]	ΔL [%]	ΔT_{eff} [%]	ΔR [%]
0.05	-19.61	1.83	-17.09	-14.93	-0.34	-7.11	-0.17	0.05	-0.12
0.08	-50.27	1.40	-33.67	-16.08	-0.16	-8.11	-0.65	-0.06	-0.19
0.11	-56.38	4.22	-39.16	-23.14	0.31	-12.89	-6.05	-0.15	-2.78
0.13	-57.92	4.48	-40.58	-17.41	0.79	-10.47	-8.31	-0.06	-4.13
0.20	-72.21	3.00	-55.93	-22.29	0.15	-11.58	-1.24	0.04	-0.11
0.31	-64.93	1.29	-51.12	-22.05	0.24	-12.13	-2.03	0.09	-1.20
0.41	-66.43	0.90	-52.68	-29.63	0.24	-16.47	-9.15	0.18	-5.03
0.56	-48.06	0.62	-28.81	-4.29	0.82	-3.69	4.62	0.79	0.66
0.80	-54.67	3.97	-47.06	-9.39	4.68	-13.13	38.56	8.83	-0.57
1.10	-43.74	5.14	-33.12	77.83	15.18	0.56	-31.20	-0.97	-15.38

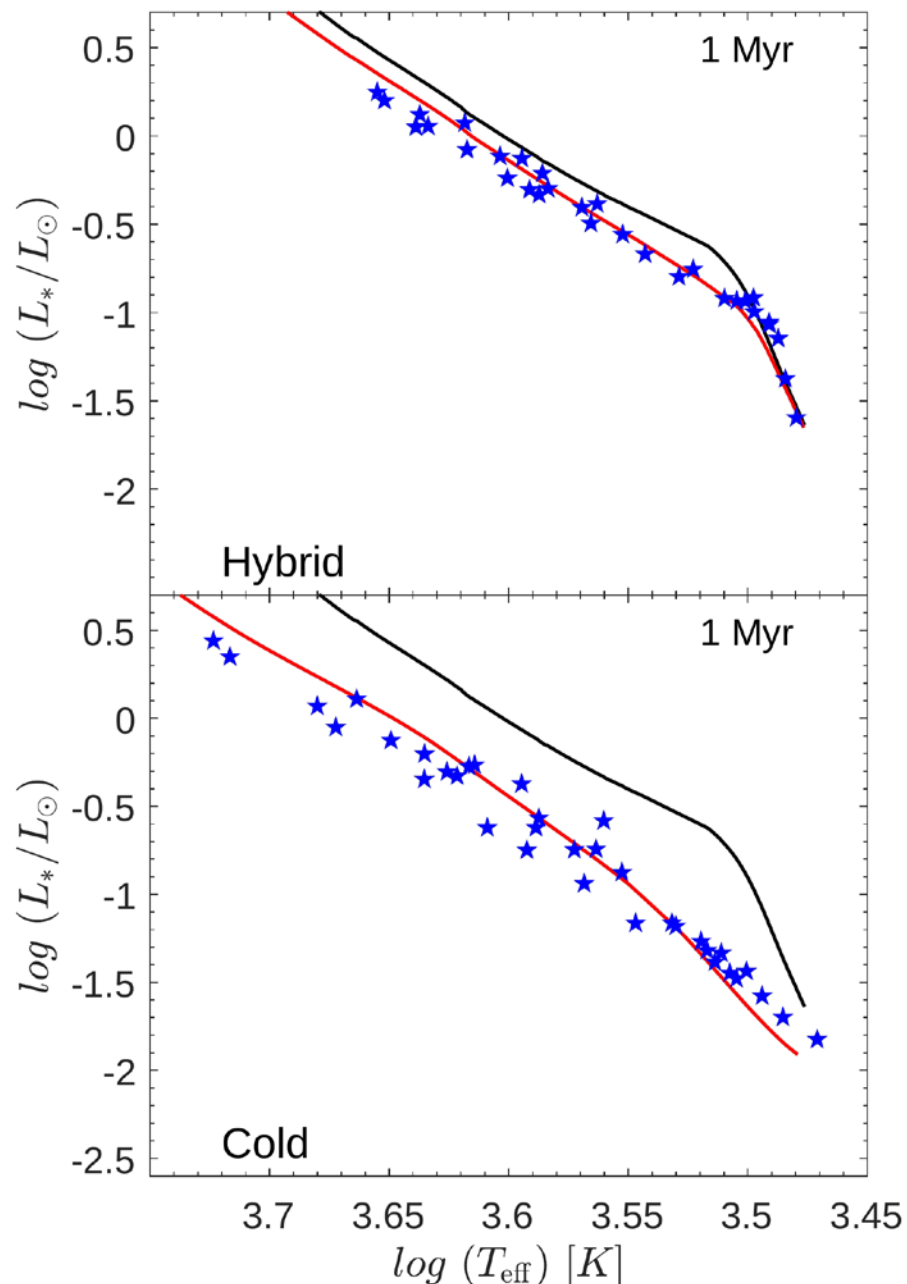
Квазистационарная аккреция Переменная аккреция со вспышками



Квазистационарная аккреция Переменная аккреция со вспышками



Несоответствие возрастов между аккрецирующими моделями и неаккремирующими изохронами



Гибридная аккреция

Черная линия — неаккрецирующая изохрона 1 млн. лет

Красная линия — неаккрецирующая изохрона 1.5 млн. лет

Звезды — аккрецирующие модели с возрастом в 1 млн. лет

Холодная аккреция

Черная линия — неаккрецирующая изохрона 1 млн. лет

Красная линия — неаккрецирующая изохрона 4.5 млн. лет

Звезды — аккрецирующие модели с возрастом в 1 млн. лет

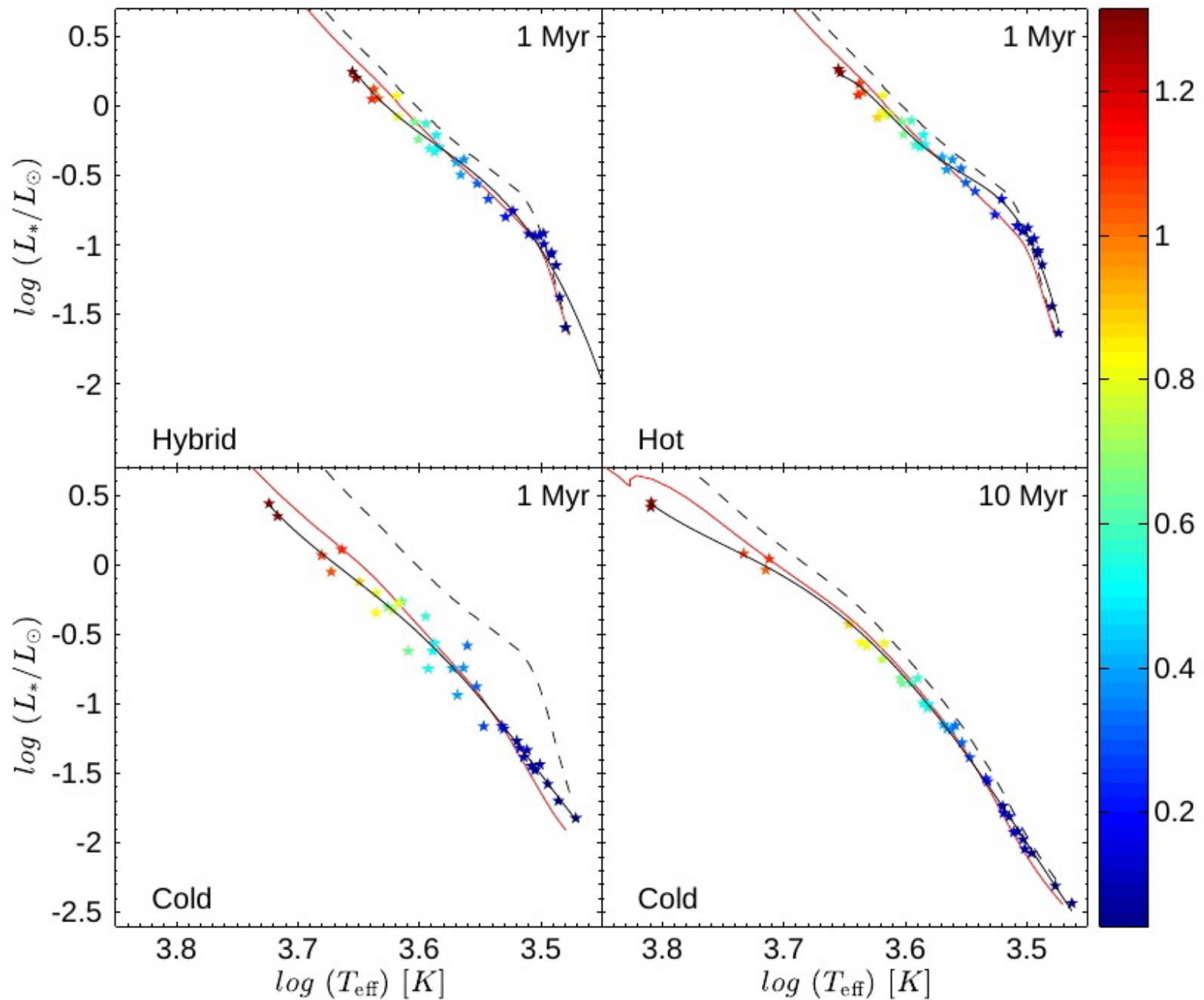
Для холодной аккреции объекты с возрастом в **1 млн. лет** могут быть идентифицированы, как объекты с возрастом в **4,5 млн лет.**

Также существует заметный разброс.

Изохроны с учетом аккреции

$$\log \frac{L_*}{L_\odot} = p_1 (\log T_{\text{eff}})^4 + p_2 (\log T_{\text{eff}})^3 + p_3 (\log T_{\text{eff}})^2 + p_4 \log T_{\text{eff}} + p_5,$$

	Cold 1 Myr	Cold 10 Myr	Hot 1 Myr	Hybrid 1 Myr
p_1	5.298×10^2	2.665×10^2	-7.249×10^3	0.9761×10^2
p_2	-7.582×10^3	-3.858×10^3	1.039×10^5	-1.050×10^3
p_3	4.067×10^4	2.092×10^4	-5.580×10^5	3.770×10^3
p_4	-9.690×10^4	-5.033×10^4	1.332×10^6	-4.512×10^3
p_5	8.652×10^4	4.534×10^4	-1.193×10^6	-1.034×10^{-8}



Какая тепловая эффективность аккреции более реалистична?

Холодная аккреция?



Слишком большая светимость
вовремя аккреционных вспышек
 $> 1000 L_{\text{sun}}$

Объекты FU Orionis имеют
меньшие максимальные
($\sim 500 L_{\text{sun}}$).

Горячая аккреция?



Фотосферная светимость всегда больше $0.1 L_{\text{sun}}$ для $\alpha \geq 0.1$

Не может объяснить объекты веллос (very low luminosity objects, VeLLOs) наблюдаемые в протозвездной фазе (Voroboyv et al. 2017)

ГИБРИДНАЯ АККРЕЦИЯ?



Значение критического темпа аккреции (для перехода между холодной и горячей аккрецией) является неопределенным.

Основные выводы

- Как квазистационарная, так и переменная аккреция могут быть реализованы в протозвездных дисках. В обоих случаях переменность постепенно убывает со временем. Переменность ограничивается стадиями ранней эволюции.
- Влияние аккреции на эволюцию маломассивных звезд и коричневых карликов является самым сильным для сценария холодной аккреции (когда мало аккреционной энергии поглощается звездой).
- В случае холодной аккреции оценка возрастов молодых звезд могут отличаться от реальных возрастов в несколько раз.
- Характер аккреции (переменный или стационарный) имеет важное значение для ранней эволюции звезд, но его влияние теряется для поздней эволюции звезд (после 10 млн. лет).
- Молодые звезды показывают заметные экскурсии во время вспышек типа FU Orionis, но их характер зависит от тепловой эффективности аккреции.

Необходимо сравнение с наблюдениями!!!