

формирование маломассивных рентгеновких двойных с черными дырами: изменяя парадигму

Наталия Иванова (Canada Research Chair @ UofA)

Semyon Chaichenets (UofA)

Stephen Justham (KIAA)

John Fregeau (KITP/ IRA)

Craig Heinke (UofA)

Jamie Lombardi (Allegheny)

Philipp Podsiadlowski (Oxford)

Saul Rappaport (MIT)

Tyrone Woods (UofA)



Маломассивные рентгеновские двойные источники (LMXBs)

Компактный аккретор - НЗ или ЧД

RLOF (заполняющие полость

Роша) доноры -

маломассивные звезды

ГП, КГ или БК, $< 1M_{\odot}$

Орбитальные периоды:

от 10 минут до сотен дней

Возраст: $\sim 0.1 - 10$ млрд лет

аккреционная шкала времени

$10^7 - 10^9$ лет

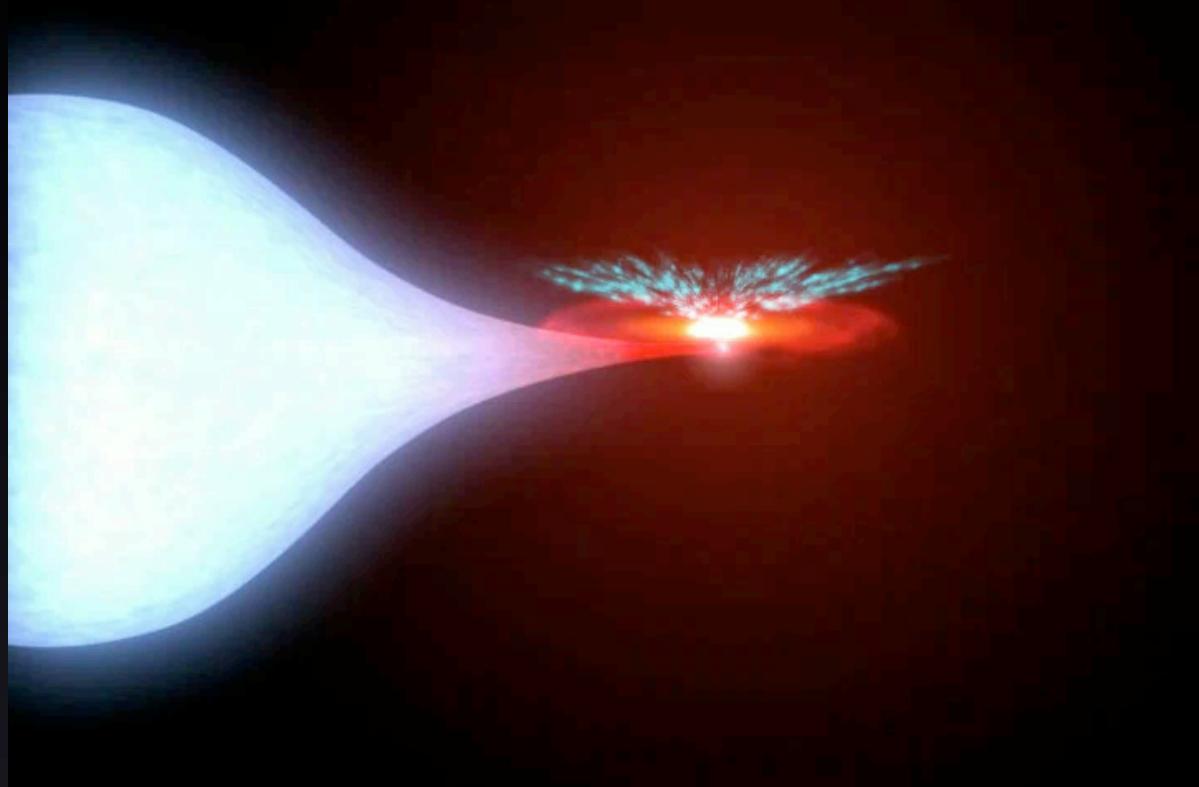
L_x : могут быть как постоянным источником, так и транзиентом.

от $\sim 10^{32}$ эрг/с (в пассивной стадии) до $\sim 10^{39}$ эрг/с (во время вспышки)

В рентгене могут быть видны в далеких галактиках (до нескольких Мпк)

Мягкий рентгеновский спектр ($kT < 10$ кеВ).

L_{opt} : Слабы в оптическом диапазоне. $L_{\text{opt}}/L_x \ll 0.1$



GRO J1655-40

Credit: NASA/CXC/A.Hobart

Массивные рентгеновские двойные источники (HMXBs)

Компактный аккретор - НЗ или ЧД

Аккреция захваченного звездного ветра -
массивные доноры
(O, B, Be, голубые СГ)

Орбитальные периоды:

от 1.5 до 260 дней

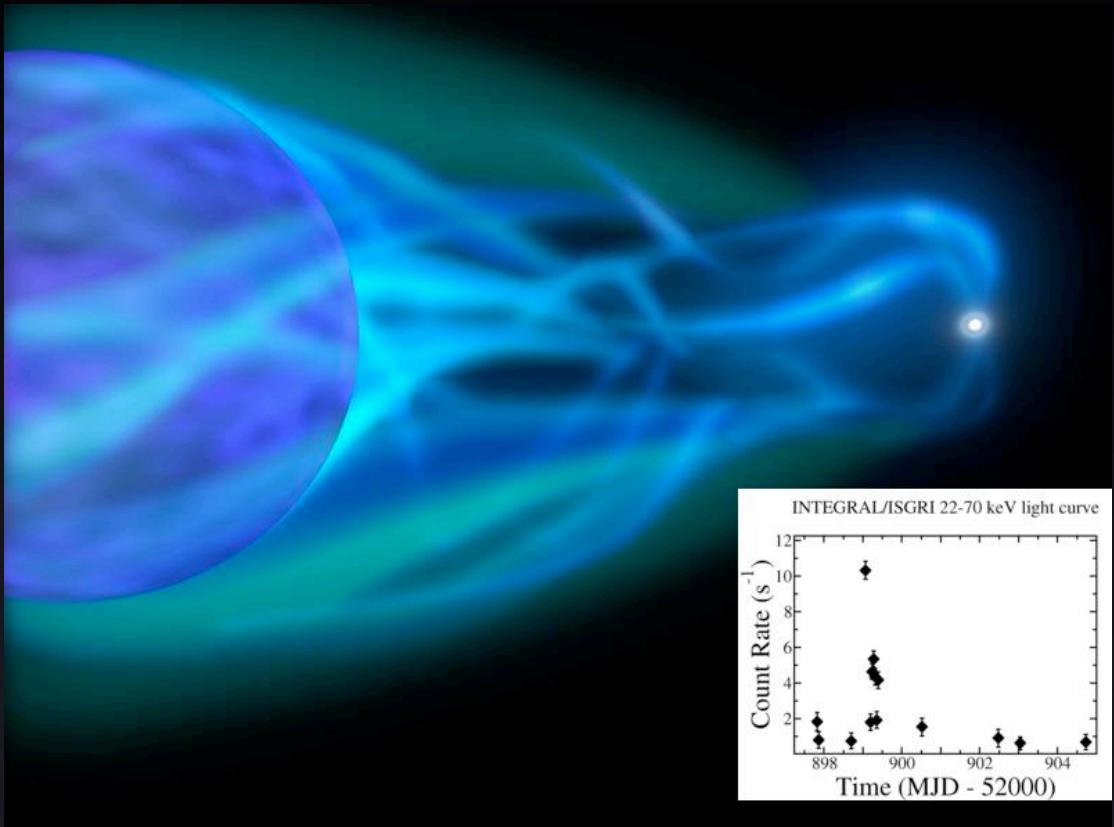
Возраст: менее 10 млн лет

аккреционная шкала времени

$< 10^7$ лет

L_x : Жесткий рентгеновский спектр

Большая часть транзиенты.



Рентгеновские двойные: почему это важно?

ВН ВСЕ наблюдательные подтверждения физики ЧД звездной массы приходят из исследования рентгеновских двойных где один из компаний - кандидат в ЧД.

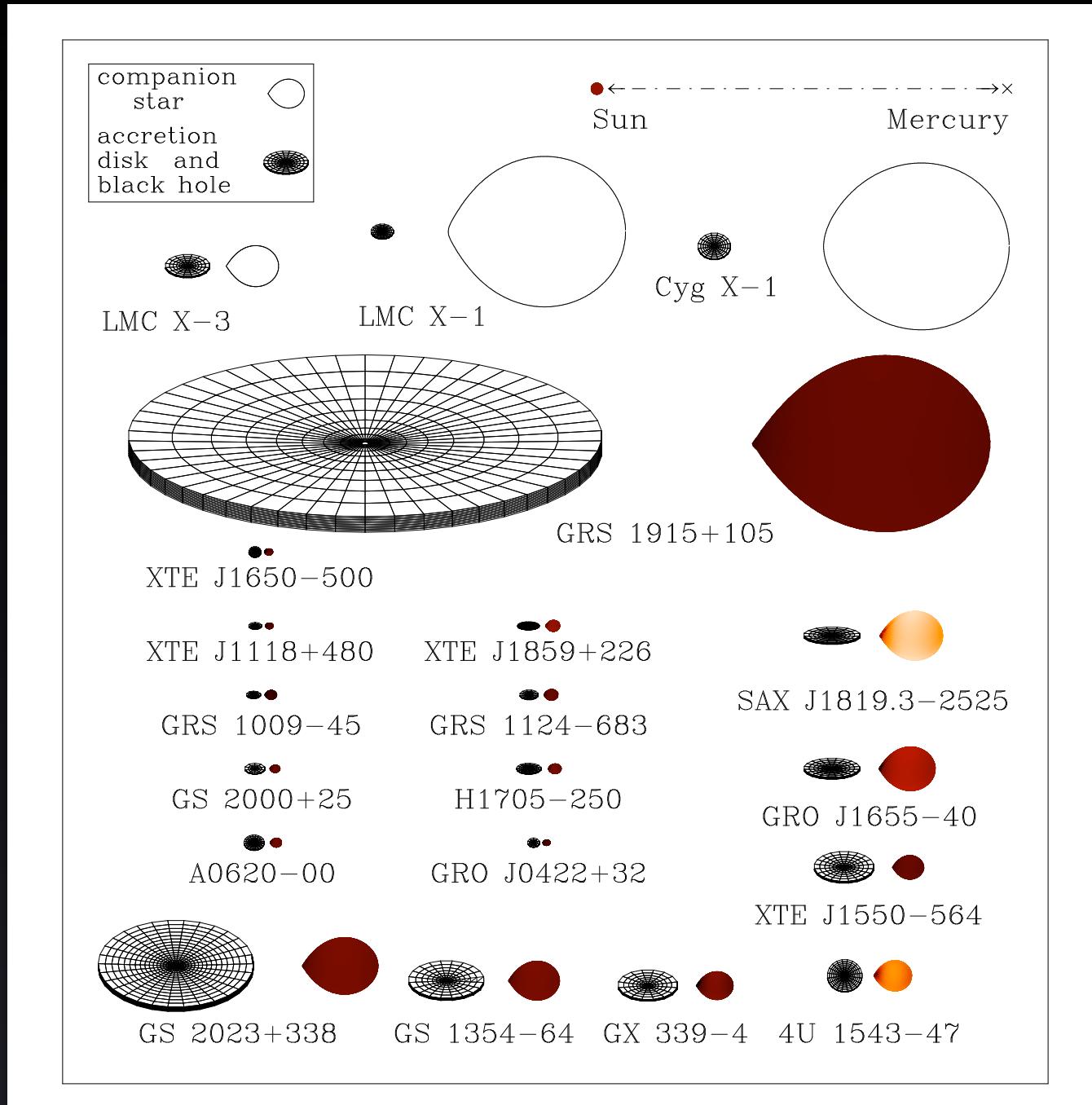
SN LMXBs и HMXBs - их орбитальные параметры - дают нам сильные ограничения на то как присходил взрыв сверхновых, что в свою очередь играет решающее значение для понимания того, как ЧД формируются.

GRB Чтобы понять характер г-всплесков и их частоту, необходима модель породившего их объекта. Обе основные модели включают взаимодействующие (изначально) массивных звезд, и одной из важных предшествующих эволюционных эпох является зачастую стадия рентгеновской двойной.

LIGO/LISA Для гравитационной астрофизики очень важно знать что именно и как много событий будет возможно наблюдать. Наилучшее ограничение на формирование различных компактных двойных со стороны теории звездной эволюции приходит из исследования рентгеновских двойных.

IMBH Наши знания о LMXBs помогают нам понять и интерпретировать наблюдения сверхярких рентгеновских источников ($ULXs, L_x > 10^{39}$ эрг/с) - необходимый этап на пути нахождения среднемассивных ЧД (от 100 до 1000 M_\odot).

Динамически подтвержденные рентгеновские двойные с ЧД



20 рентгеновских двойных с
компаньоном
кандидатом в ЧД
17 LMXBs и 3 HMXBs

+ еще одна система с
орбитальным периодом в
2.5 часа, открытая 7 Окт
2010

J. Orosz

LMXBs: стандартная парадигма

Bhattacharya & van der Heuvel (1991)

common envelope (CE) - стадия общей оболочки, в течение которой орбита менее массивной звезды проходит внутри теперь общей расширенной оболочки более массивной звезды; орбитальное движение тормозится и фаза прекращается после выброса общей оболочки или слияния двух звезд. Сброс оболочки использует орбитальную энергию как источник энергии \Rightarrow выжившая двойная гораздо более компактна

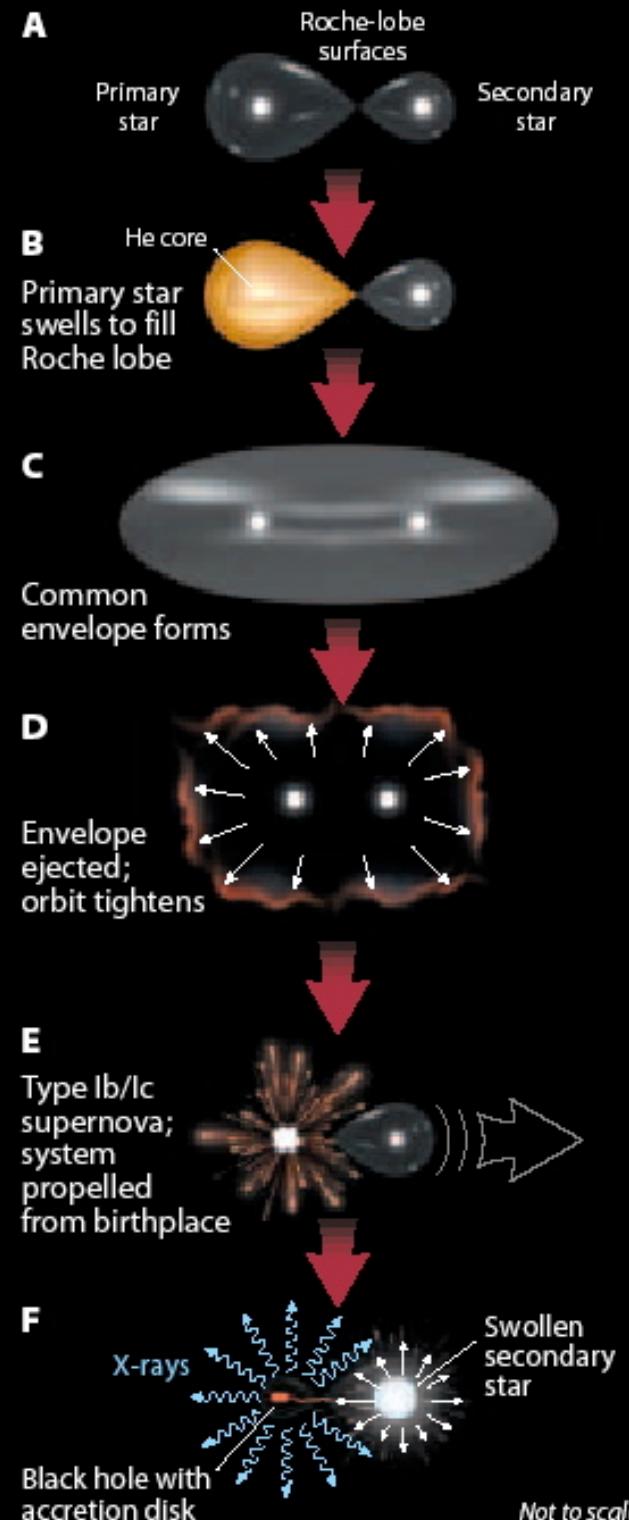
Взрыв СН: двойная скорее всего становится эксцентричной

Дальнейшее сближение идет за счет приливов, магнитного звездного ветра и гравитационных волн.

Так же возможен второй эпизод CE.

magnetic braking (MB) - магнитный звездный ветер - это процесс потери углового момента в звездах поздних спектральных классов. Эффективность торможения пропорциональна скорости потери массы с звездного ветра и магнитного поля.

Двойная система становится более и более компактной пока начавшийся стабильный перенос массы не делает систему обнаруживаемой в качестве источника рентгеновского излучения



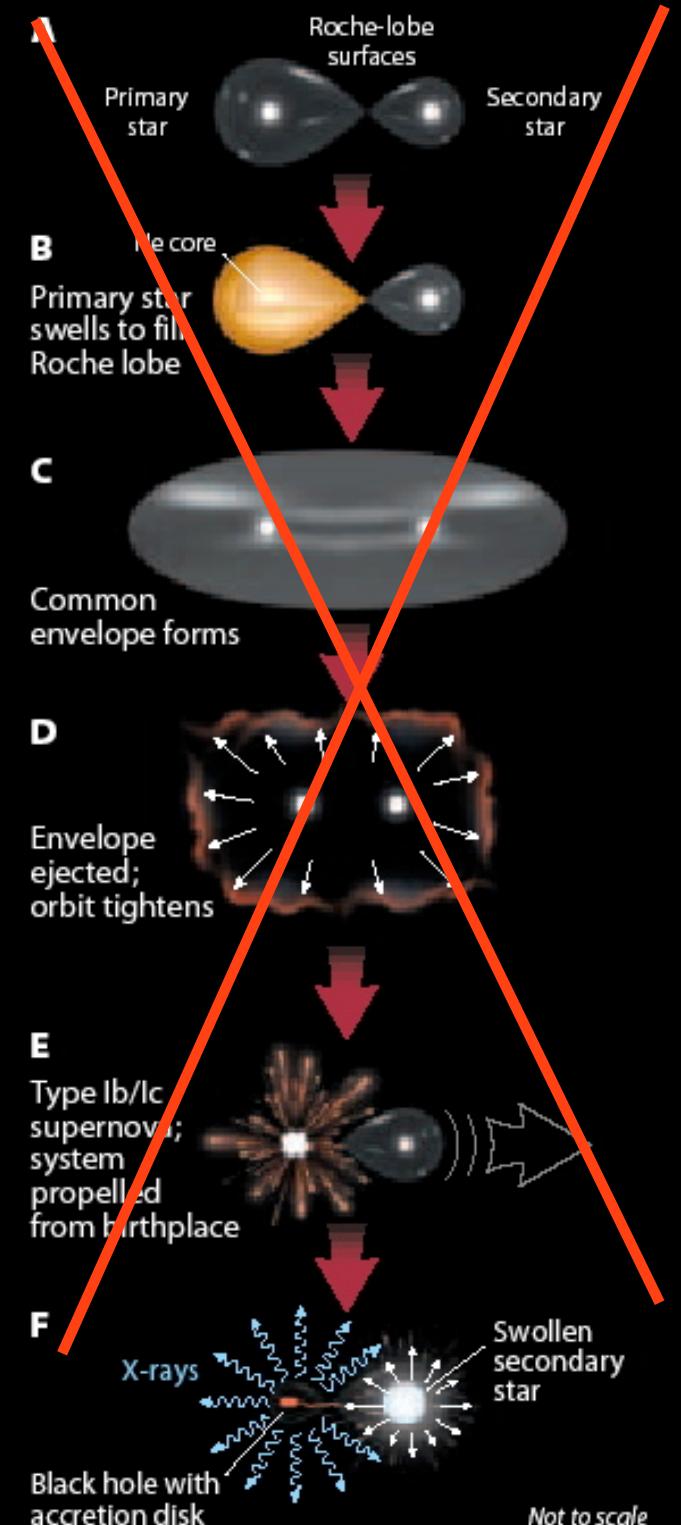
LMXBs: стандартная парадигма

Все не так просто!

Что же может пойти не так?

Практически все!

Мы можем ошибаться в том как проходит стадия общей оболочки, в том что именно представляет из себя донор, да и вся эволюционная последовательность может быть совершенно другой



LMXBs: стандартная парадигма

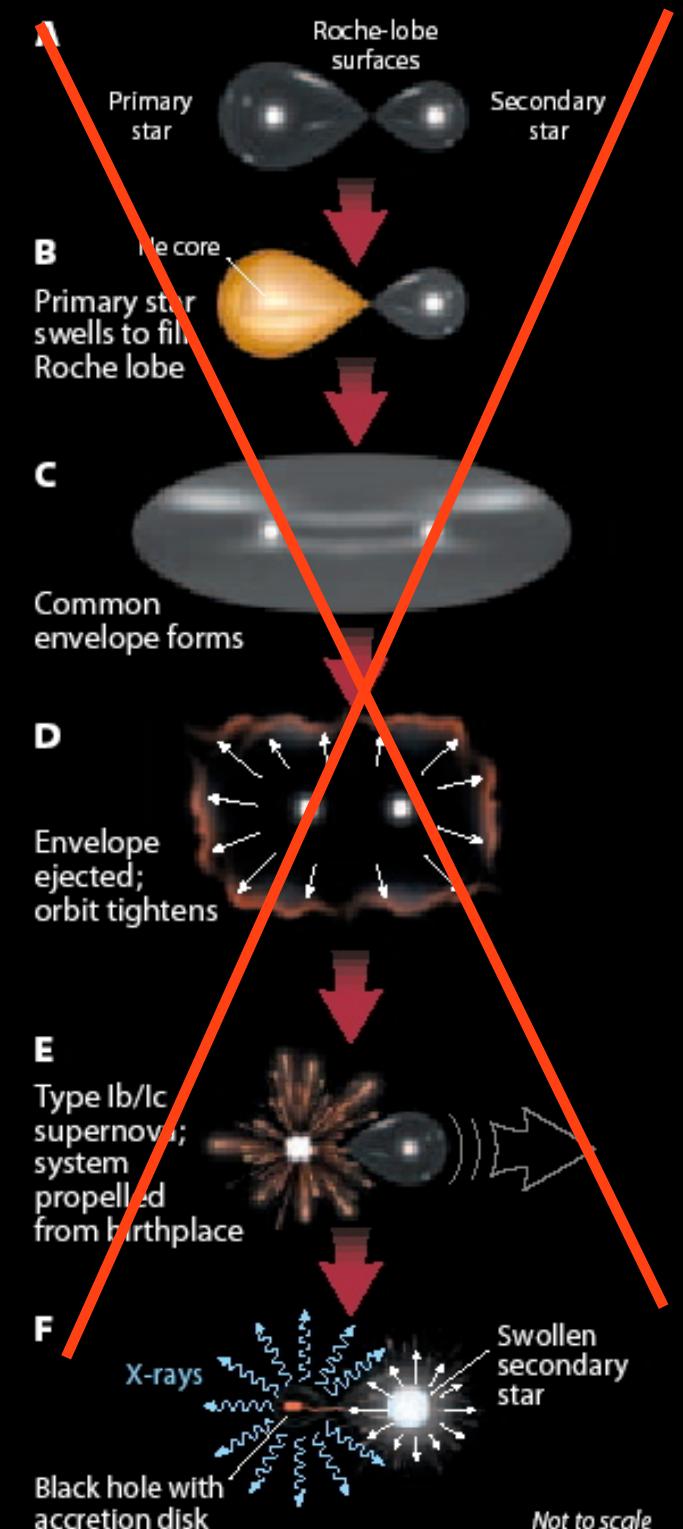
Все не так просто!

Что же может пойти не так?

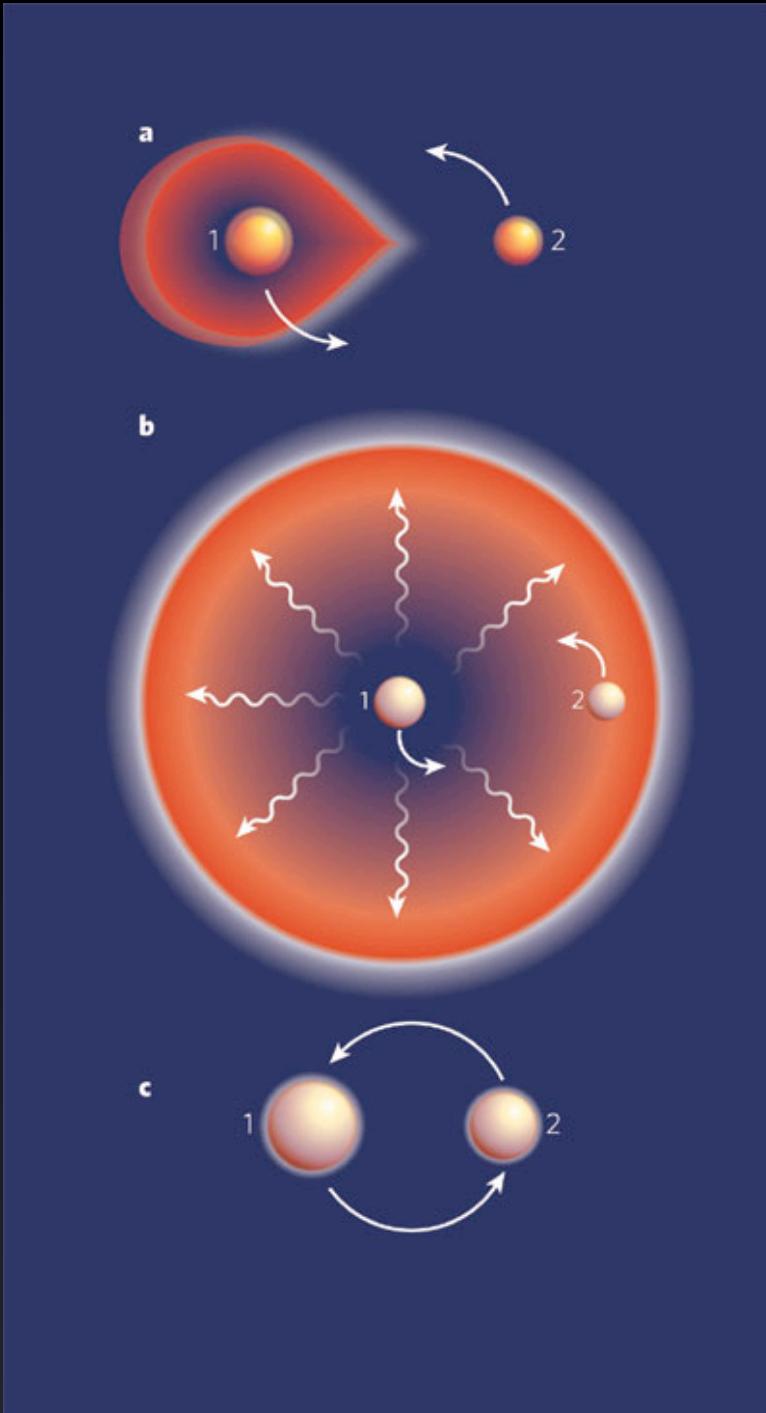
Практически все!

Мы можем ошибаться в том как проходит стадия общей оболочки, в том что именно представляет из себя донор, да и вся эволюционная последовательность может быть совершенно другой

Начнем с общей оболочки



Общая оболочка: стандартная парадигма



Во время стадии общей оболочки менее массивная звезда вращается внутри теперь общей расширенной оболочки более массивной звезды; вследствии потери углового момента и орбитальной энергии большая полуось орбиты уменьшается.

Фаза прекращается либо со сбросом общей оболочки или слиянием двух звезд.

$$\alpha_{\text{CE}} \Delta E_{\text{orb}} < E_{\text{bind env}} = \frac{GM M_{\text{core}}}{R_{\text{RL}} \lambda_{\text{ce}}}$$

$$\Delta E_{\text{orb}} = \frac{GM M_{\text{d}}}{2a_{\text{f}}} - \frac{GM_{\text{core}} M_{\text{d}}}{2a_{\text{i}}}$$

standard: $\alpha_{\text{CE}} \lambda_{\text{ce}} = 1$

(Livio 1988)

Проблема: частота формирования рентгеновских двойных с короткими периодами

Наблюдаемая ЧФ: 1 за млн лет на галактику типа Млечного Пути (10^{-6} per gal per yr)
(Romani 1998)

Kalogera (1999): для согласования НЧФ ЧД-ГП ММРД с наблюдениями, теории требуется нереалистично большое значение $\alpha_{ce} \lambda_{ce}$.

Теоретическая ЧФ как минимум в 100 раз меньше.

Podsiadlowski *et al.* 2003: ЧД с маломассивными компаньонами в теории могут сформироваться только с сильно нереалистичными предположениями:
 λ_{ce} согласно точным звездным моделям только ~ 0.01 !

(Dewi & Tauris 2001, Podsiadlowski *et al.* 2003)

возможно поможет рассмотрение рентгеновских двойных умеренных масс (IMXBs)!

Ivanova & Kalogera (2006): в то время как трудно сформировать ЧД-ГП ММРД, ТЧФ для ЧД-БК LMXB в 100-1000 выше!

Вопрос: где же они?

Коротко периодические РД с ЧД и среднемассивными донорами: тест на спектральный класс

Justham et al. (2006): МЗВ может работать в случае Ap/Br компаньонов.

МП не генерируется через динамо-механизм подобно маломассивным звездам, а сохранено с стадии жизни до ГП (фоссильное МП).

Орбитальный период, массы доноров, время жизни и ЧФ как в наблюдениях

Но не эффективные температуры!

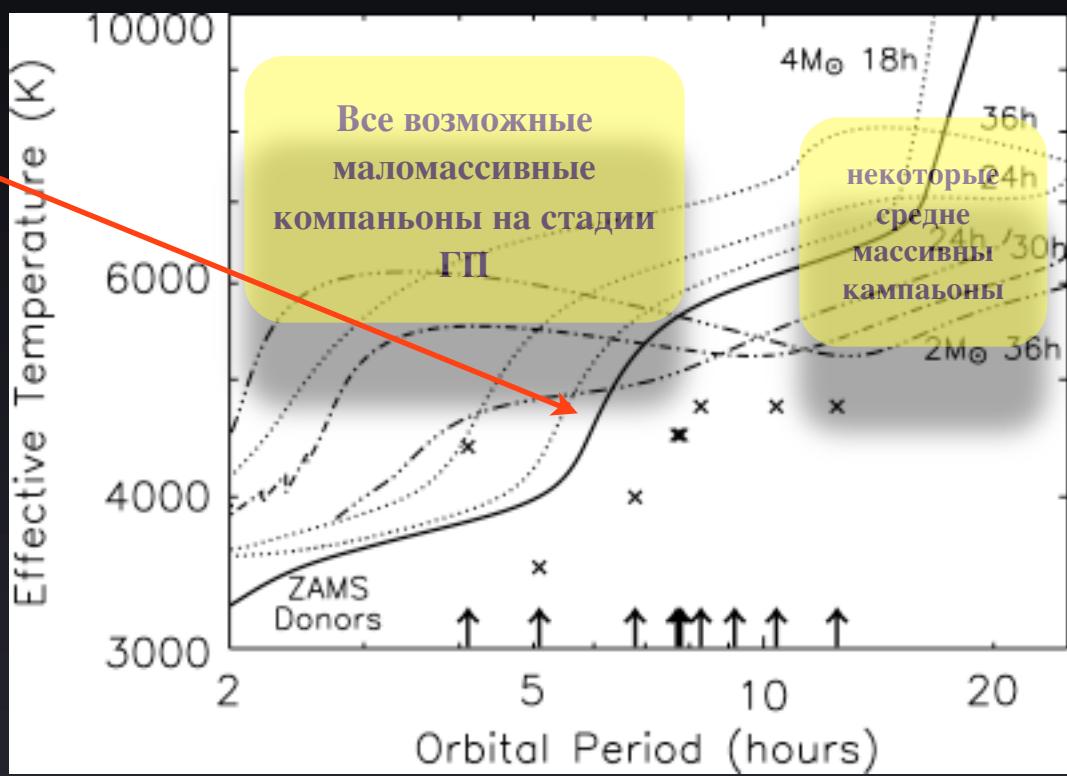
В 8 КПРД с ЧД, периоды и T_{eff} измерены

Показан верхний предел для T_{eff}

Переизлучение: не работает

В некоторых системах Li превышает солнечное значение в 20-200 раз и доходит до изначального.

Эволюционные треки показаны для случая контакта (RL overflow) в двойных где предполагается что компаньоном является ЧД $7 M_{\odot}$ ВН (Justham et al 2006)



Коротко периодические РД с ЧД и среднемассивными донорами: тест на спектральный класс

Justham et al. (2006): МЗВ может работать в случае Ap/Br компаньонов.

МП не генерируется через динамо-механизм подобно маломассивным звездам, а сохранено с стадии жизни до ГП (фоссильное МП).

Орбитальный период, массы доноров, время жизни и ЧФ как в наблюдениях

Но не эффективные температуры!

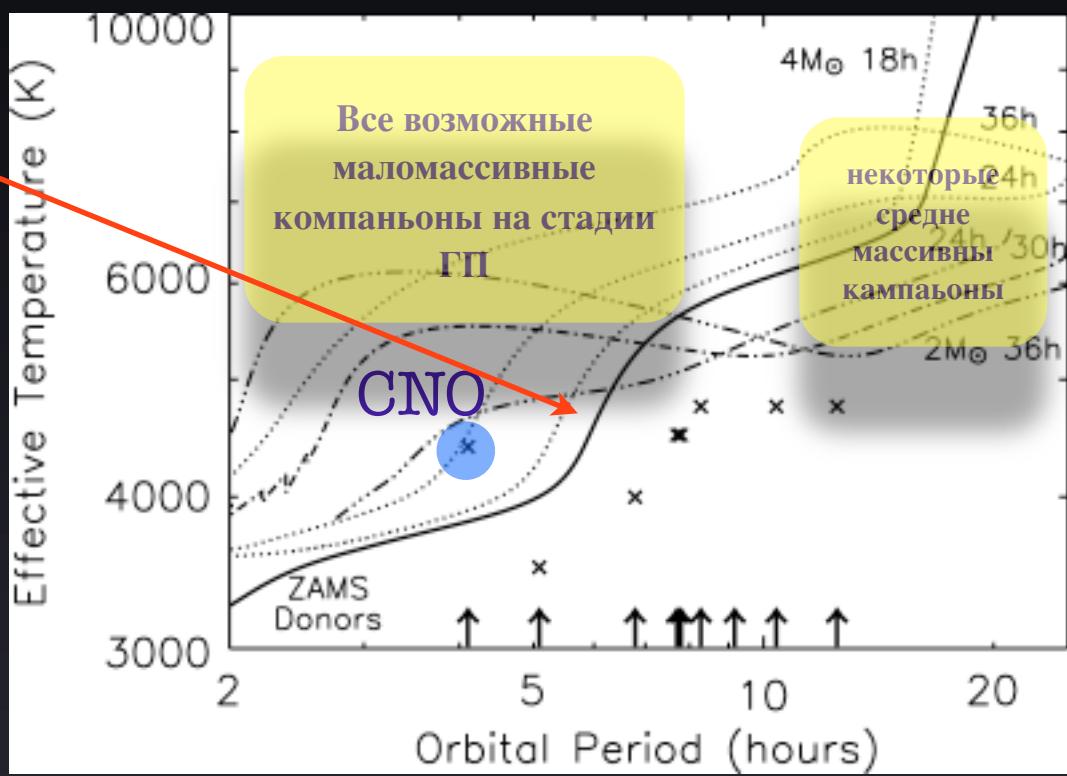
В 8 КПРД с ЧД, периоды и T_{eff} измерены

Показан верхний предел для T_{eff}

Переизлучение: не работает

В некоторых системах Li превышает солнечное значение в 20-200 раз и доходит до изначального.

Эволюционные треки показаны для случая контакта (RL overflow) в двойных где предполагается что компаньоном является ЧД $7 M_{\odot}$ ВН (Justham et al 2006)



Коротко периодические РД с ЧД и среднемассивными донорами: тест на спектральный класс

Justham et al. (2006): МЗВ может работать в случае Ap/Bp компаний.

МП не генерируется через динамо-механизм подобно маломассивным звездам, а сохранено с стадии жизни до ГП (фоссильное МП).

Орбитальный период, массы доноров, время жизни и ЧФ как в наблюдениях

Но не эффективные температуры!

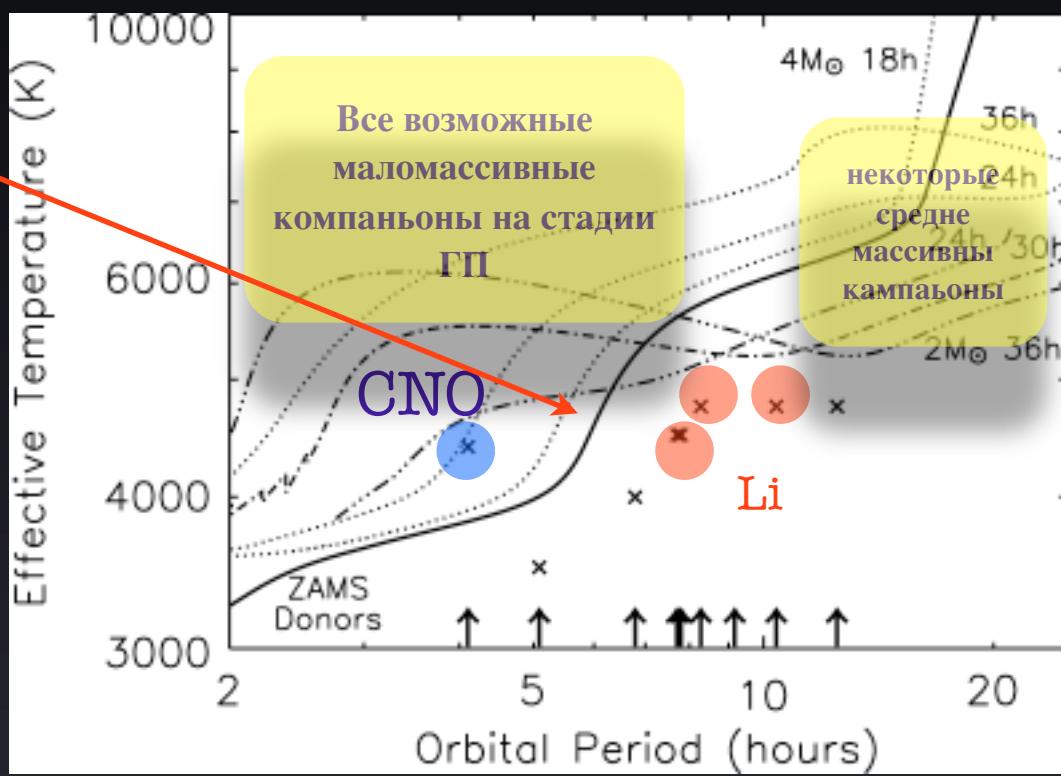
В 8 КПРД с ЧД, периоды и T_{eff} измерены

Показан верчний предел для T_{eff}

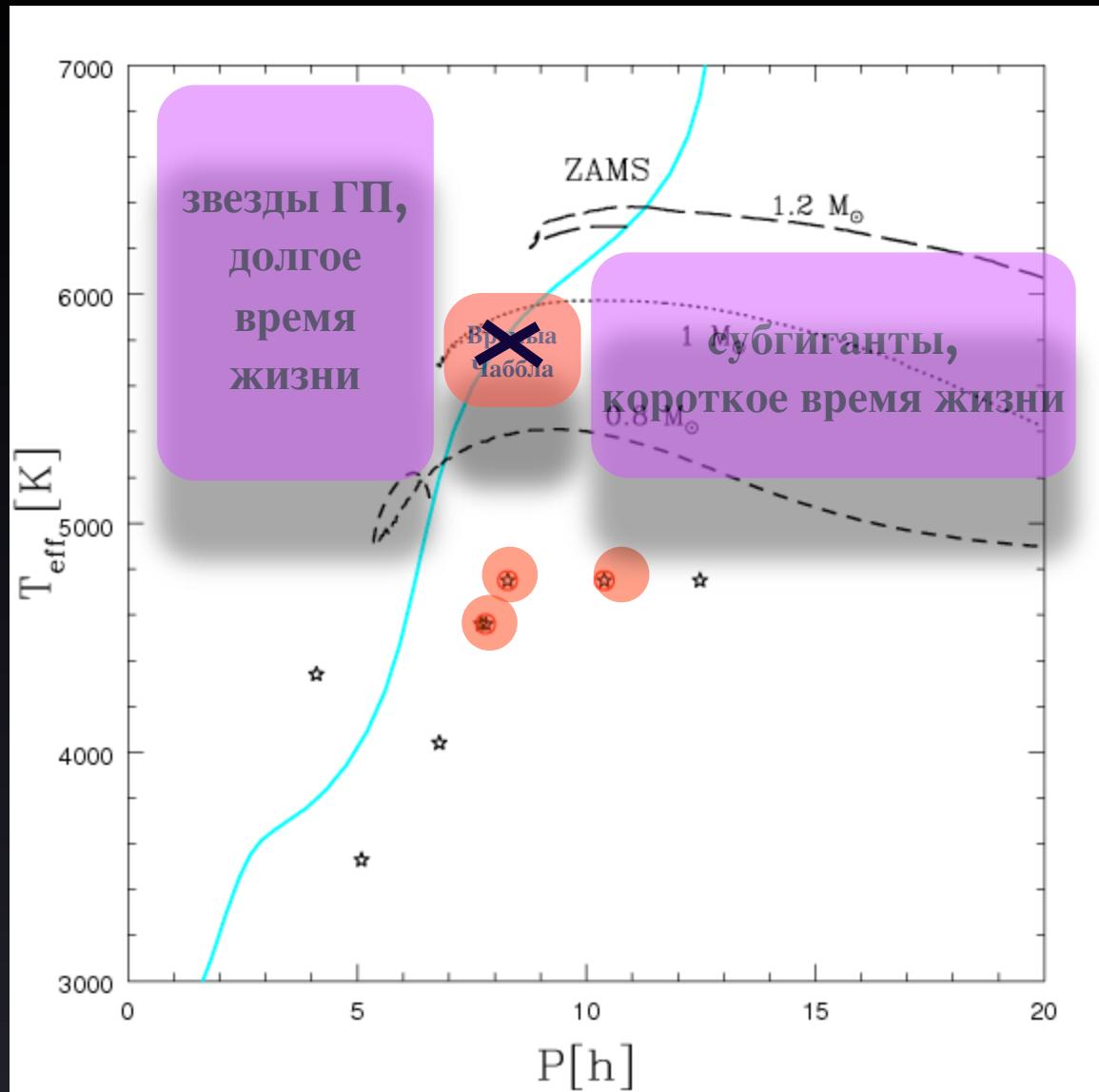
Переизлучение: не работает

В некоторых системах Li превышает солнечное значение в **20-200** раз и доходит до изначального.

Эволюционные треки показаны для случая контакта (RL overflow) в двойных где предполагается что команьоном является ЧД $7 M_{\odot}$ BH (Justham et al 2006)



Наблюдения и эволюционные треки: ГП и после

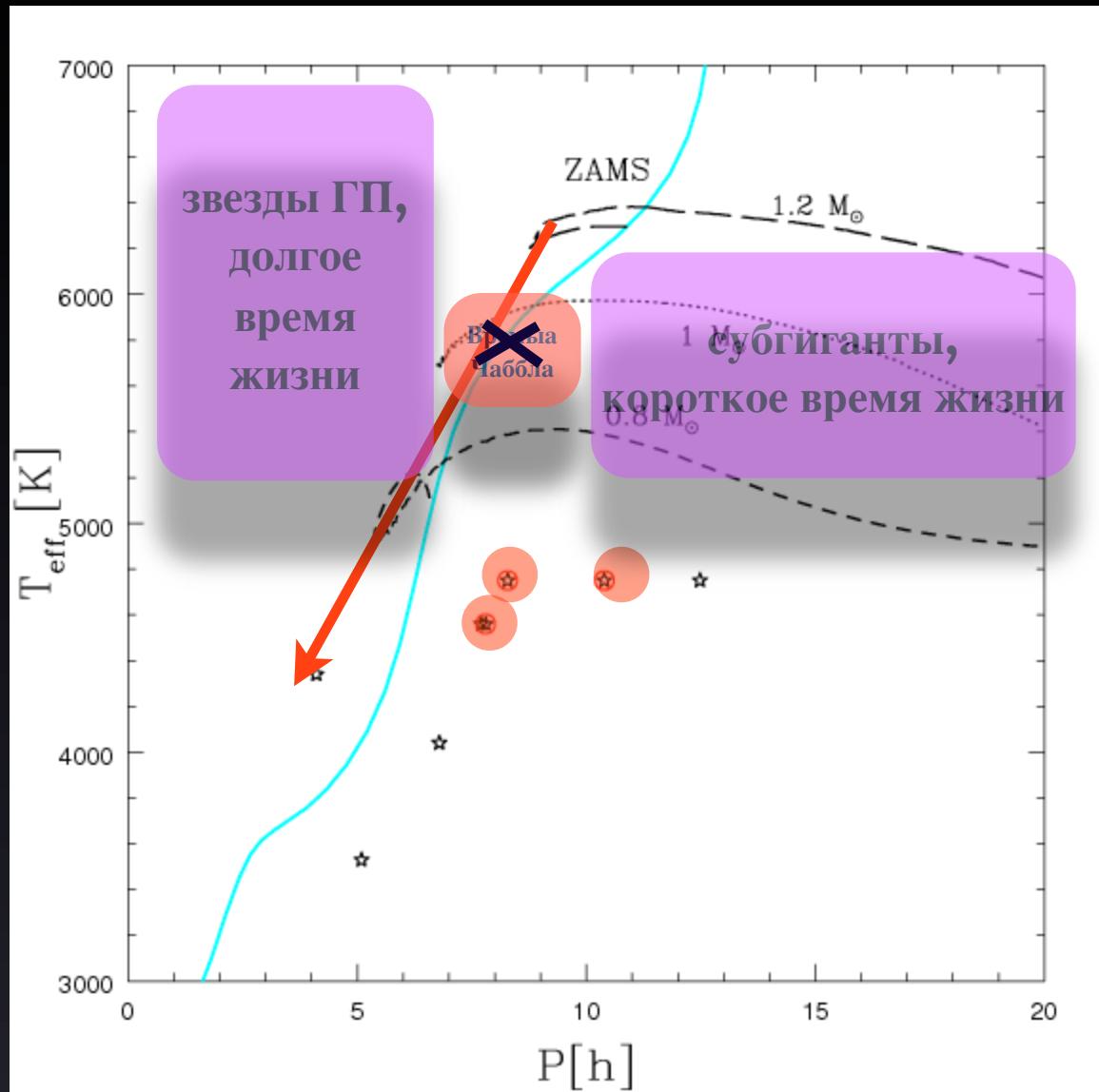


Время жизни на ГП звезды $0.8 M_{\odot}$ ($Z=0.02=Z_{\odot}$) около 2 времен Хаббла!

Только $0.95 M_{\odot}$ проэволюционируют с ГП за время Хаббла ($Z=Z_{\odot}$)

Для $Z=0.001$, НГП сдвигается наверх и звезды горячее на примерно 1000K при таком же размере (периоде)

Наблюдения и эволюционные треки: ГП и после

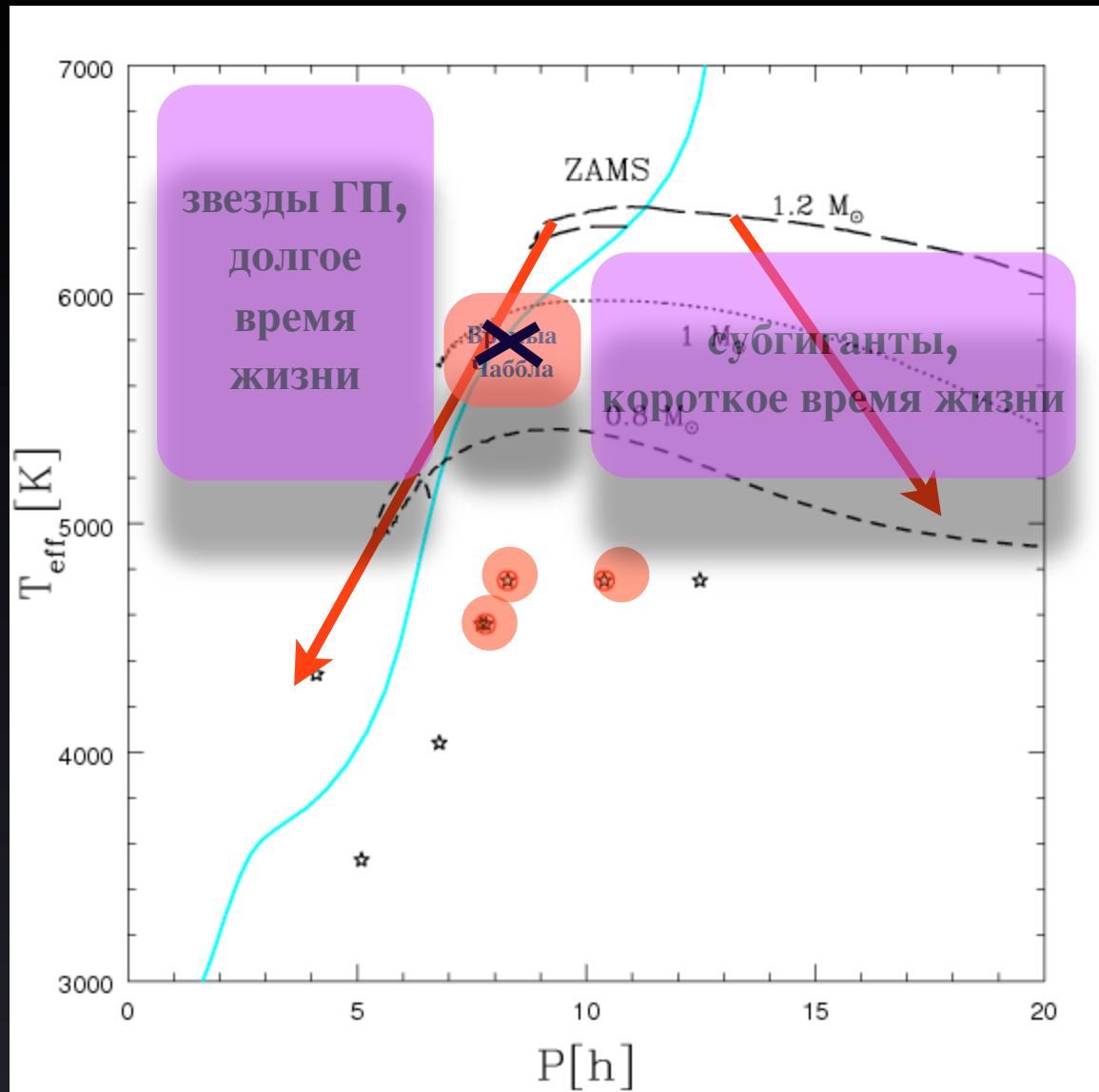


Время жизни на ГП звезды $0.8 M_{\odot}$ ($Z=0.02=Z_{\odot}$) около 2 времен Хаббла!

Только $0.95 M_{\odot}$ проэволюционируют с ГП за время Хаббла ($Z=Z_{\odot}$)

Для $Z=0.001$, НГП сдвигается наверх и звезды горячее на примерно 1000K при таком же размере (периоде)

Наблюдения и эволюционные треки: ГП и после

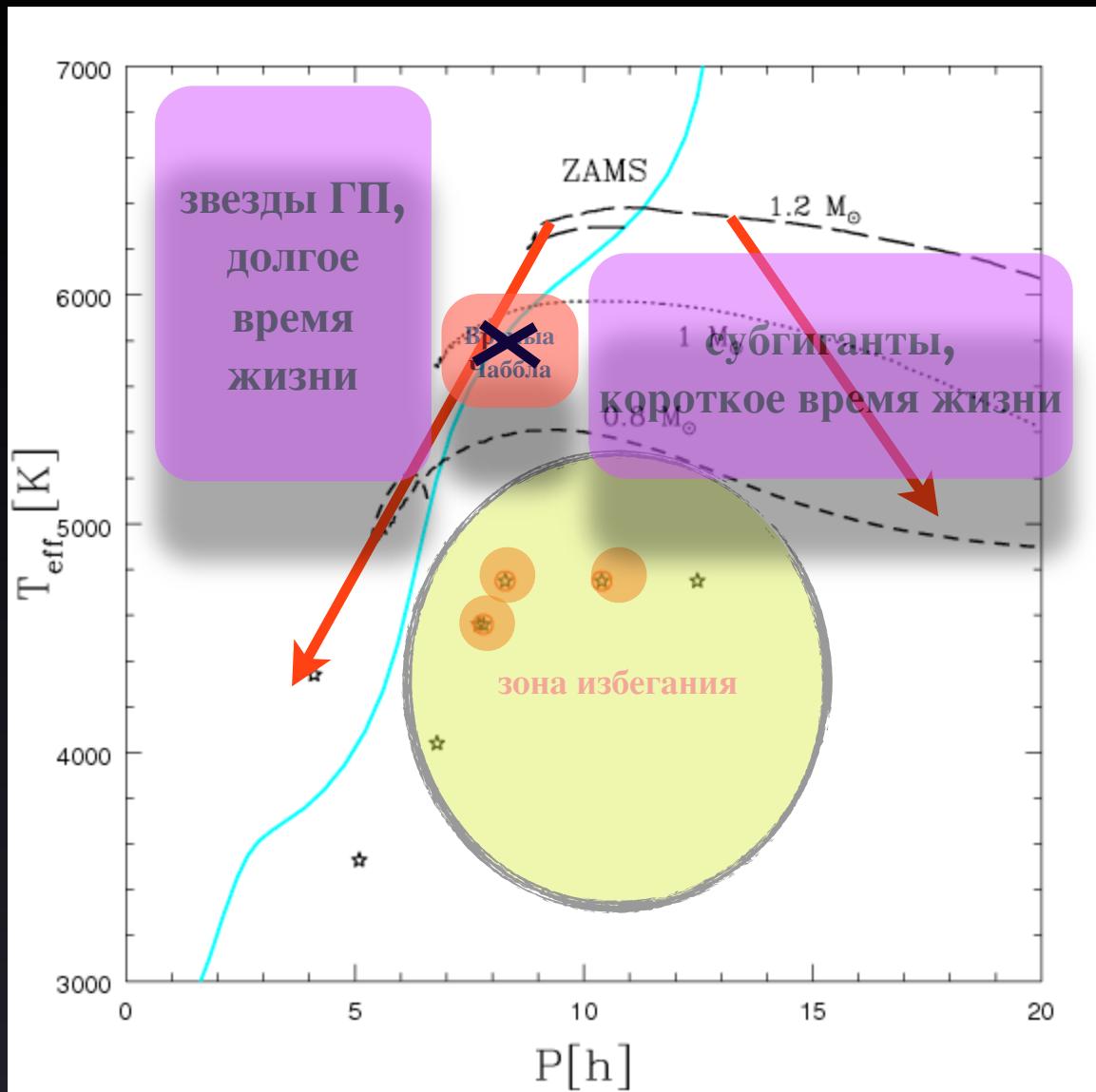


Время жизни на ГП звезды $0.8 M_{\odot}$ ($Z=0.02=Z_{\odot}$) около 2 времен Хаббла!

Только $0.95 M_{\odot}$ проэволюционируют с ГП за время Хаббла ($Z=Z_{\odot}$)

Для $Z=0.001$, НГП сдвигается наверх и звезды горячее на примерно 1000K при таком же размере (периоде)

Наблюдения и эволюционные треки: ГП и после



Время жизни на ГП звезды $0.8 M_{\odot}$
($Z=0.02=Z_{\odot}$) около 2 времен
Хаббла!

Только 0.95 M_{\odot}
проеволюционируют с ГП за
время Хаббла ($Z=Z_{\odot}$)

Для $Z=0.001$, НГП сдвигается наверх и звезды горячее на примерно 1000K при таком же размере (периоде)

Наблюдения и эволюционные треки: pre-MS ?!

- ЧД формируются через 6-8 млн лет после старта ЗФ
- За первые ~10 млн лет только звезды $> 2 M_{\odot}$ достигнут ГП!
- Звезды до ГП имеют Li! Им не надо его создавать, они просто еще не успели его разрушить!

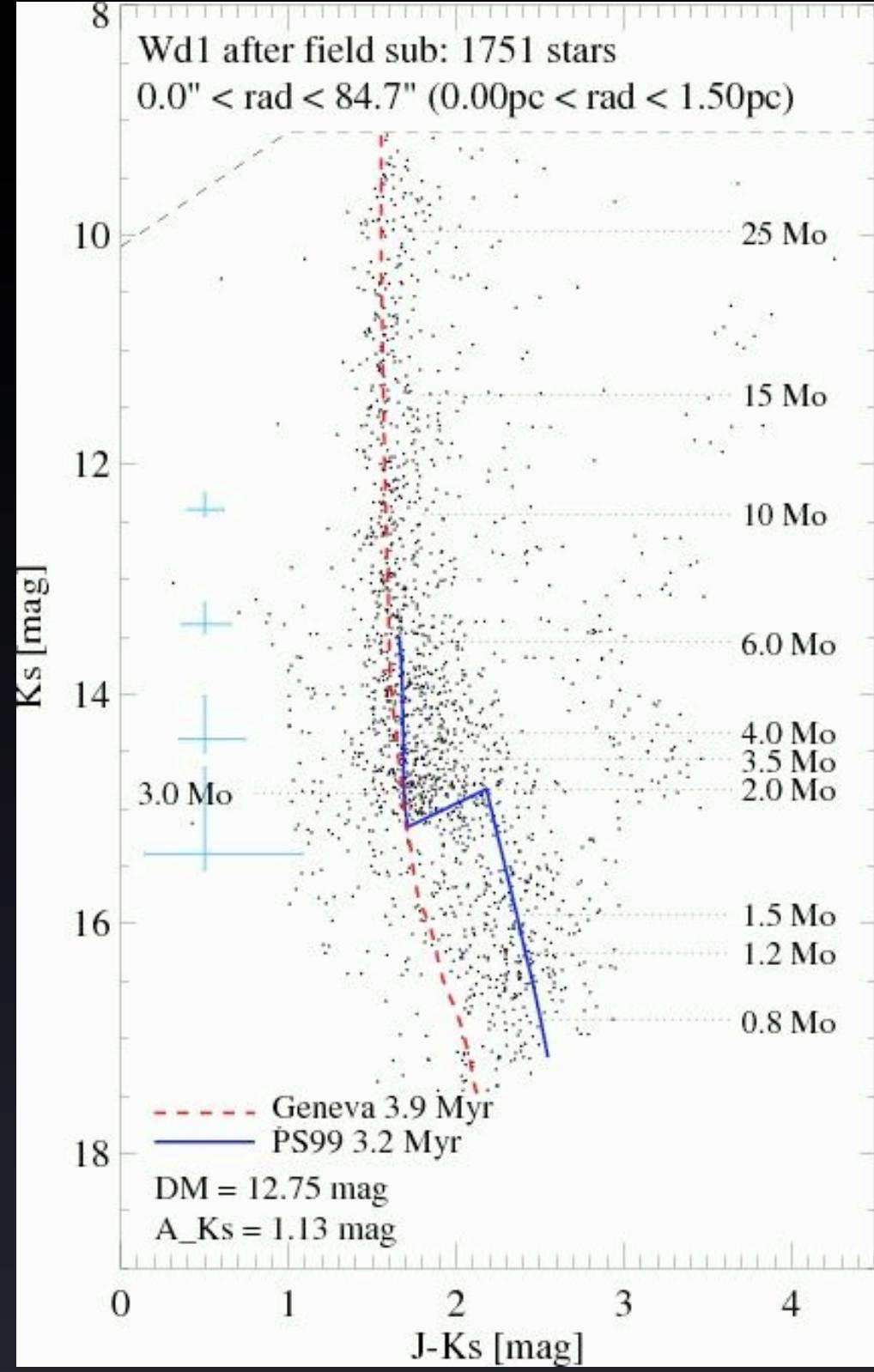
Наблюдения: Westerlund 1



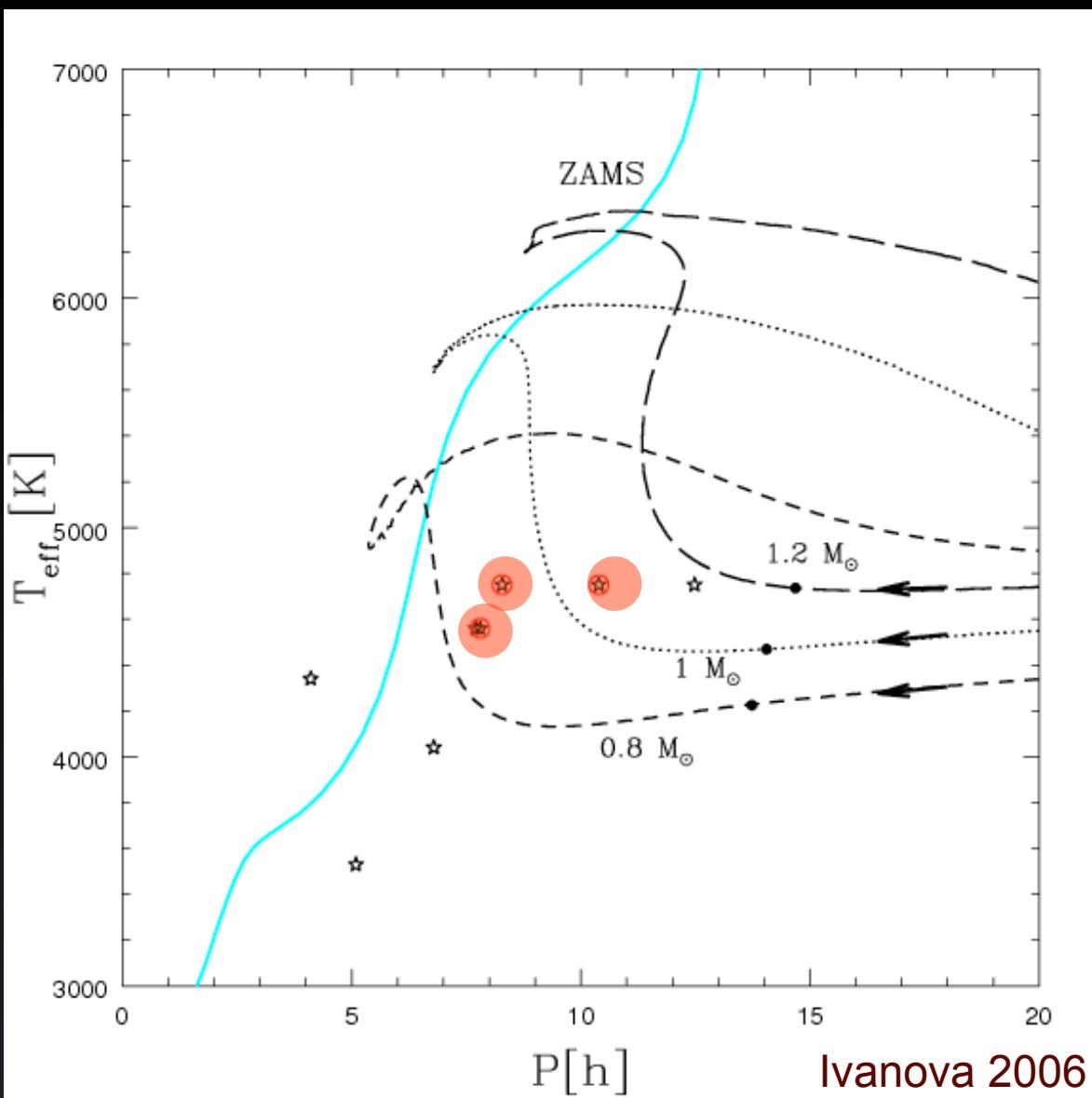
Наиболее массивное молодое скопление в нашей галактике

Рентгеновский пульсар (Muno et al. 2005)

Звезды с массой $< 3M_{\odot}$ не вышли на ГП
(Brandner et al 2008)



Наблюдения и эволюционные треки: pre-MS ?!

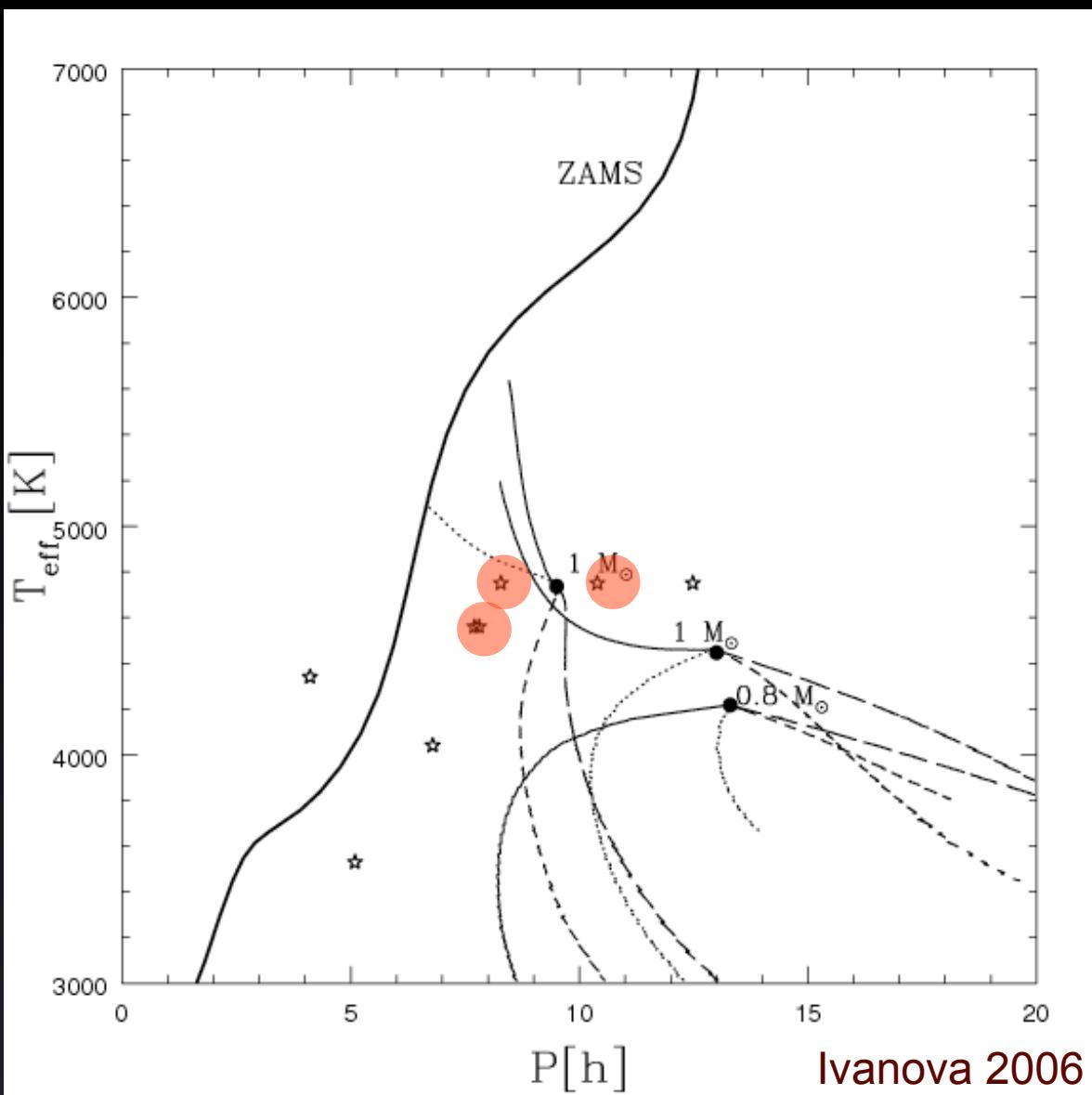


До ГП все звезды быстро сжимаются!

Каким образом двойная может оставаться в контакте?

Нужен механизм очень быстрой потери углового момента!

Наблюдения и эволюционные треки: pre-MS ?!



Наблюдения:

В Солнца : 2 G

В в звездах типа T Tauri 1-10kG

например,

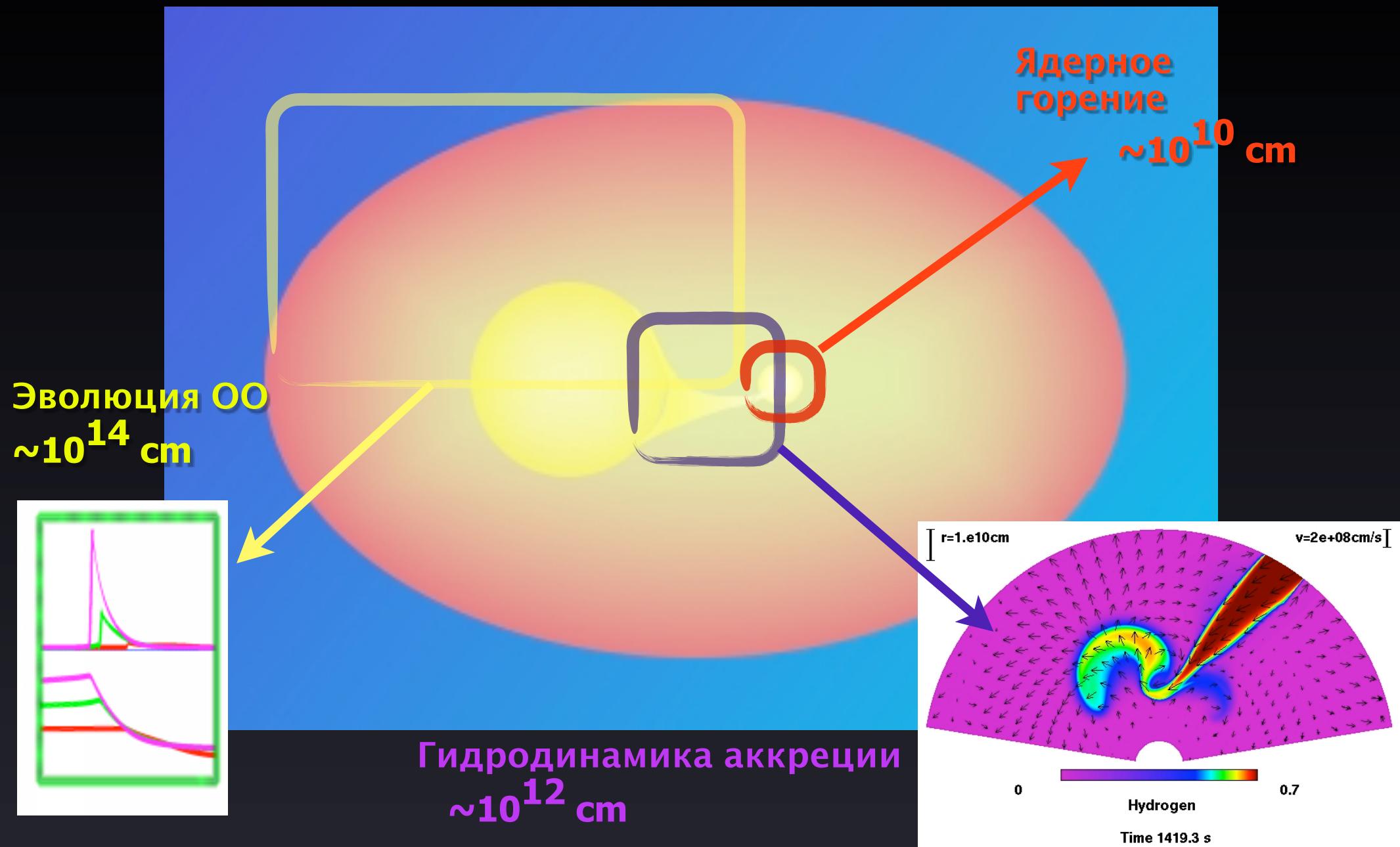
TW Hyd:

2.5 kG, возраст 2×10^7 лет

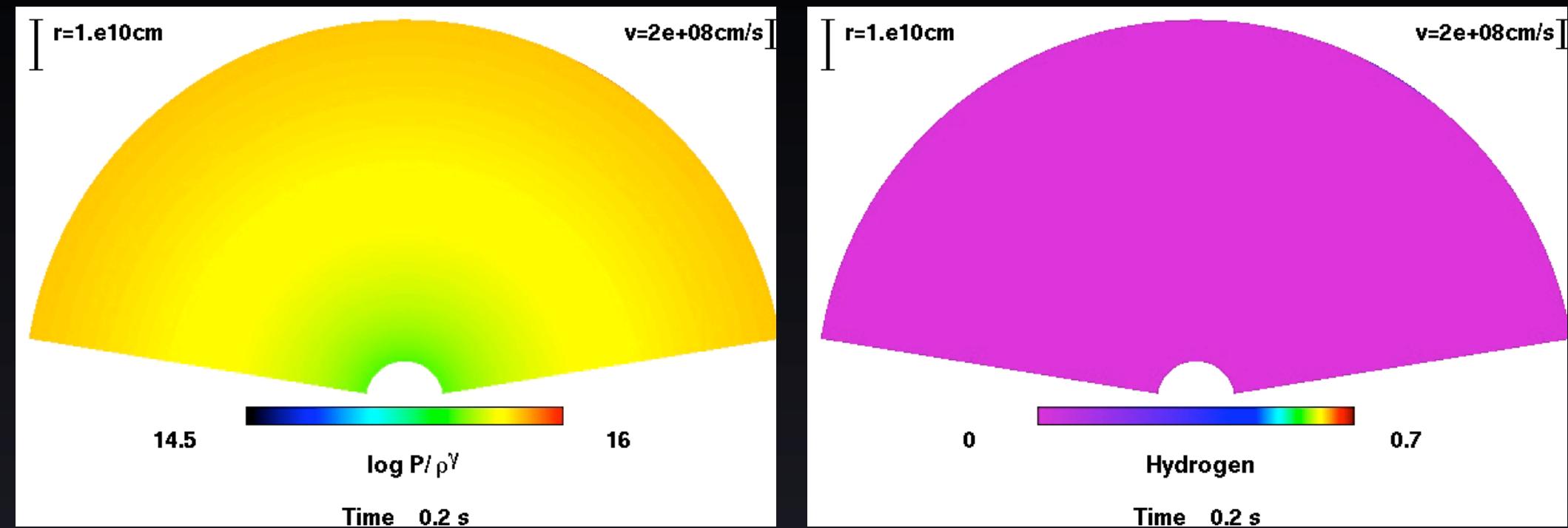
Показаны треки для звезд с разным МП

Эффективность ОО: новые идеи? Медленная ОО, ведущая к слиянию.

Ivanova (2002), Ivanova & Podsiadlowski (2003), систематические исследования ОО, которые должны привести к слиянию



Эффективность 00: новые идеи? Медленная 00, ведущая к слиянию.
Ее особенность: перенос массы во время 00

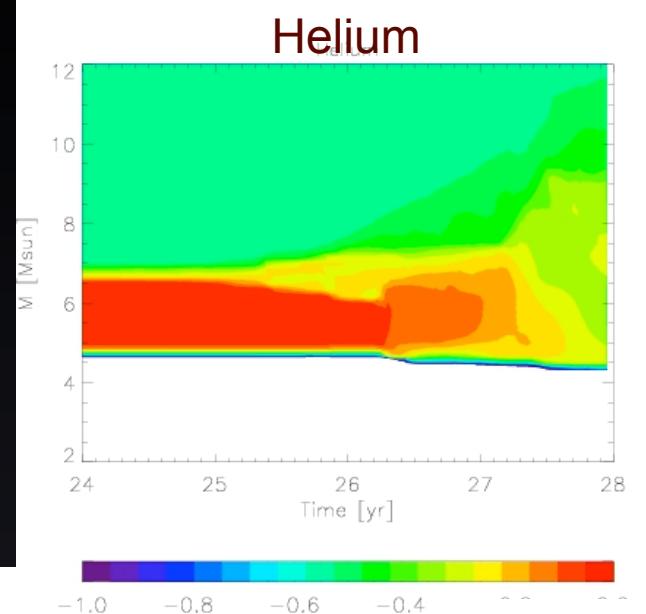
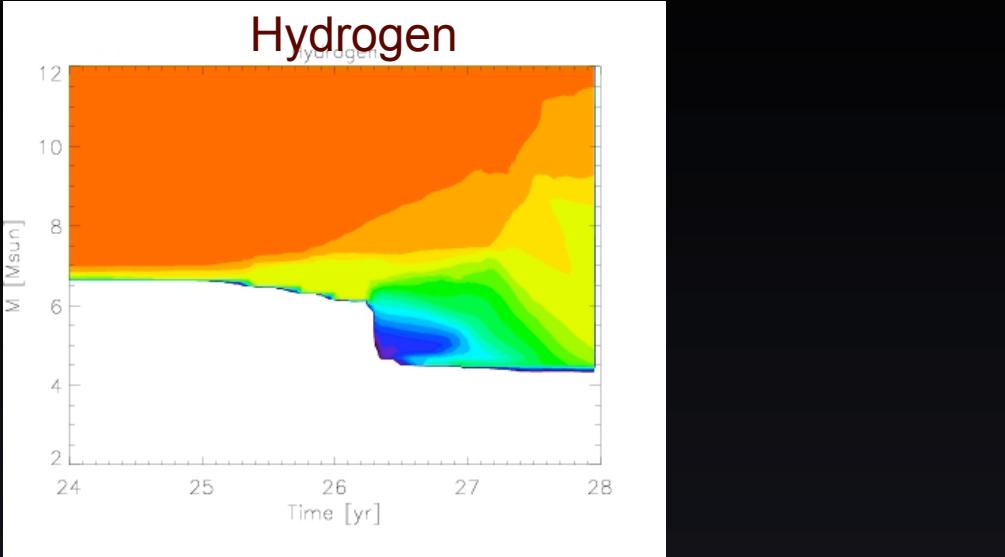


Ivanova 2002

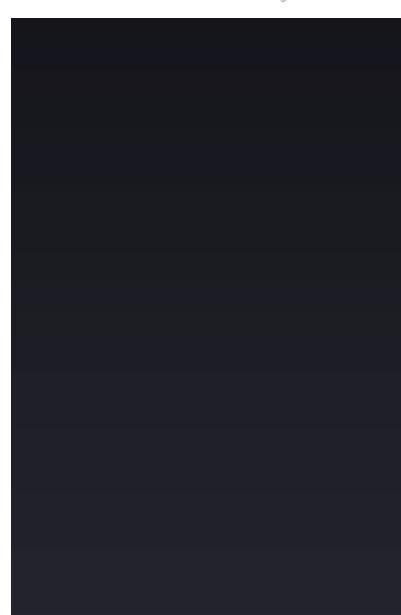
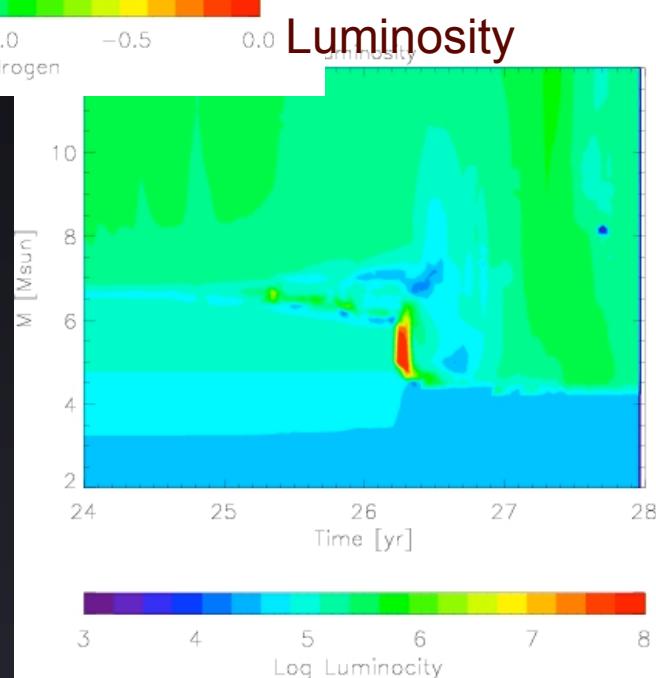
Эффективность 00: новые идеи? Медленная 00, ведущая к слиянию. Ее особенность: перенос массы во время 00

Было найдено, что один из возможных результатов ведет к взрыву водорда внутри Не слоевого источника:

общая оболочка сносится за счет ядерного взрыва!



Ivanova 2002

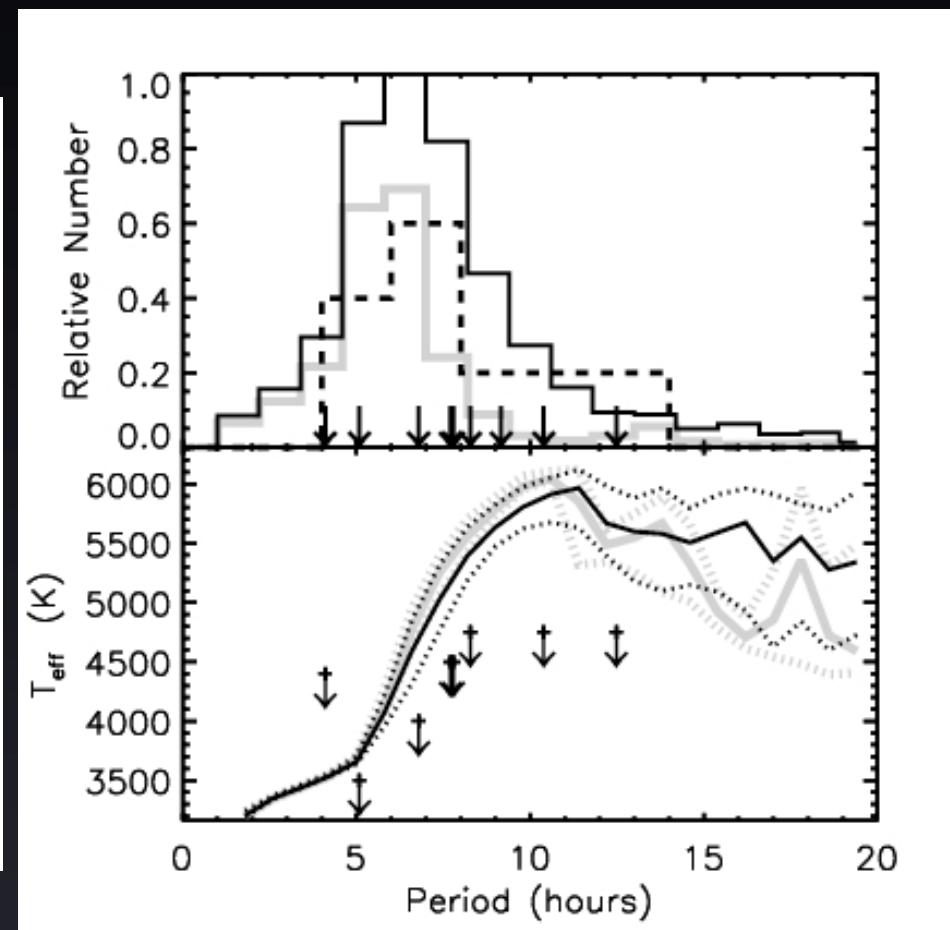
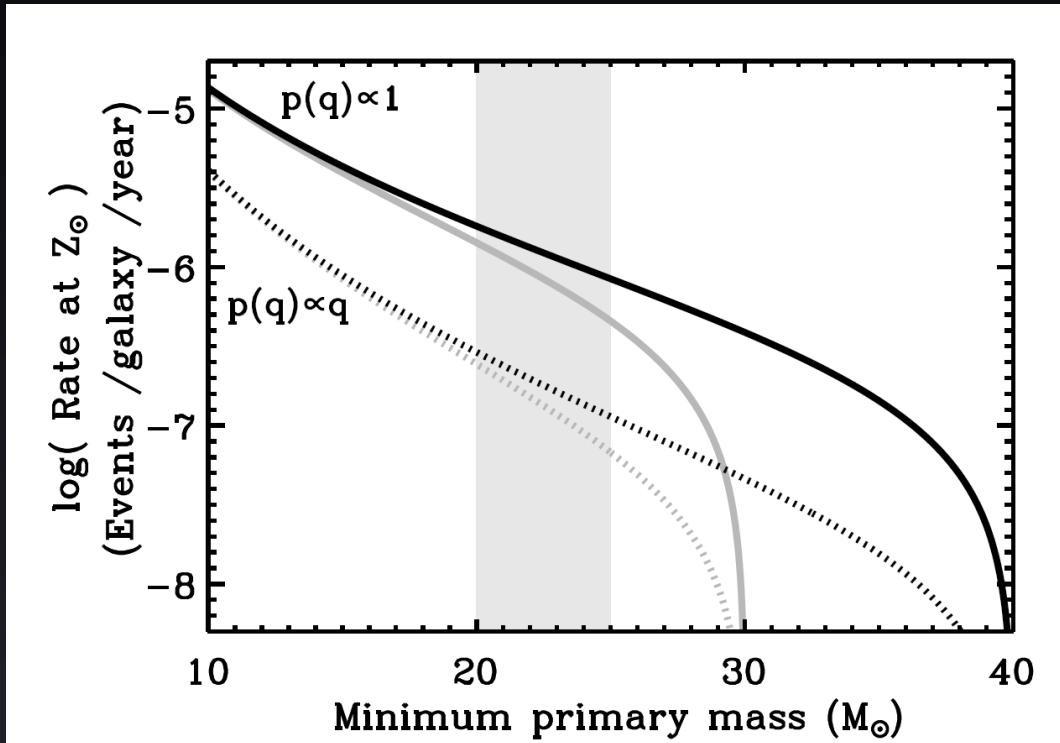


Radius

Взрывной сброс общей оболочки

Podsiadlowski, Ivanova, Justham & Rappaport (2010):

- теоретическая ЧФ короткопериодических двойных с ЧД как НЧФ, 10^{-6} в год на галактику
- естественная связь между сверхновыми типа Ic и длинными гамма-всплесками - и Н, и Не слои сброшены
- поскольку ЧФ для гамма всплесков 10^{-6} в год на галактику - может обеспечить всю НЧФ длинных гамма-всплесков



ЧД-БК: наблюдения

NGC 4472 (Zepf et al. 2008)

- $L_X \sim 4 \times 10^{39}$ ergs s⁻¹
- сильная переменность
- сильные, широкие (2000 km/s) эмиссионные линии О III
- low H α /[O III] ratio
- скорее всего ЧД 5-20 M $_{\odot}$ с наиболее вероятной массой 15 M $_{\odot}$ (Gnedin et al. 2009)

Шаровые скопления: распространенность

NGC 4365: много молодых ШС



M87:
1688 ШС опознано
общее население ШС
оценочно 10,000



Сталкивающиеся галактики
формирование ШС



Sombrero: опознано ~650 ШС



NGC 4365: множество ШС
“среднего” возраста



ЧД-БК: наблюдения

Насколько часты ULXs ($L_x > 10^{39}$ ergs/s) в ШС?

- Kim et al. 2006: 8 в 6173 GCs $\Rightarrow 2.0_{-1.0}^{+1.5} \times 10^{-9}$ per M_\odot
- Humphrey&Buote 2008: 2 в 3782 $\Rightarrow 7_{-6}^{+15} \times 10^{-10}$ per M_\odot
- Sivakoff 2010: 7 в 6776 GCs $\Rightarrow 2.2_{-1.2}^{+1.9} \times 10^{-9}$ per M_\odot

Kalogera et al 2004:

теория не предполагает что рентгеновские двойные с ЧД и НЕвырожденным донором будут сформированы в ШС

Сколько ЧД может быть в ШС?

Звездная эволюция:

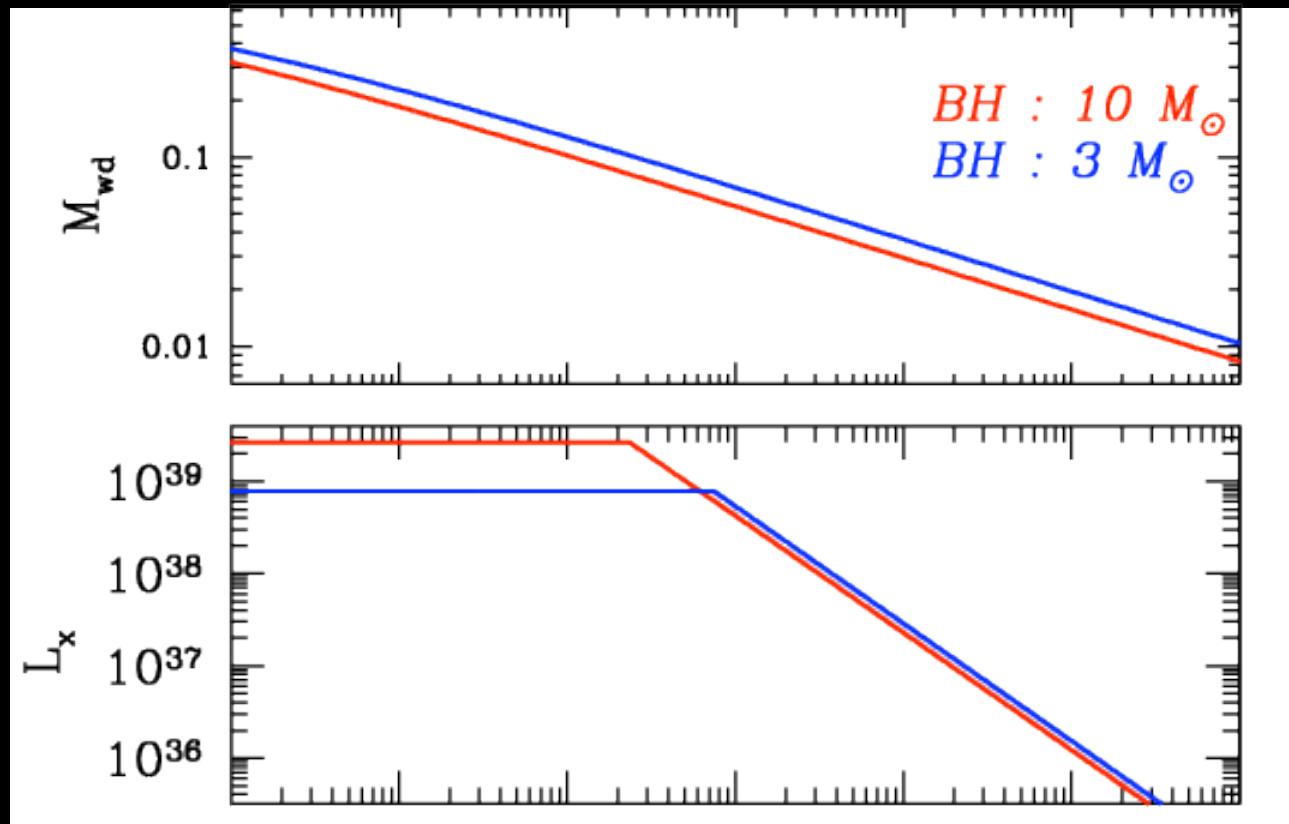
- Каждые $150\text{-}200 M_{\odot}$ текущей звездной массы соответствуют как минимум одной ЧД, сформированной в прошлом
- Половина сформированных ЧД имеет массу $> 10 M_{\odot}$
- Вследствие кика (толчка) во время взрыва, только 30-40% останется в ШС со скоростью убегания 50 км/с (Belczynski et al. 2006)

Звездная динамика:

Спитцеровская нестабильность + испарение \Rightarrow только одна (одиночная или двойная) ЧД может присутствовать в нашу эпоху (Kalogera et al. 2004)

- Если рассматривать скопление только из ЧД (100-1000 ЧД), то до 20% останется (O'Leary et al. 2006). Такое скопление не достигает равновесия.
- В ШС, рассчитанном методом Монте Карло, до 25% ЧД остается, более того, некоторые из них взаимодействуют также и с другими звездами (Downing et al. 2009)

\Rightarrow до 10% сформированных ЧД могут оставаться в ШС:
(125-200 ЧД на одно массивное плотное ШС)



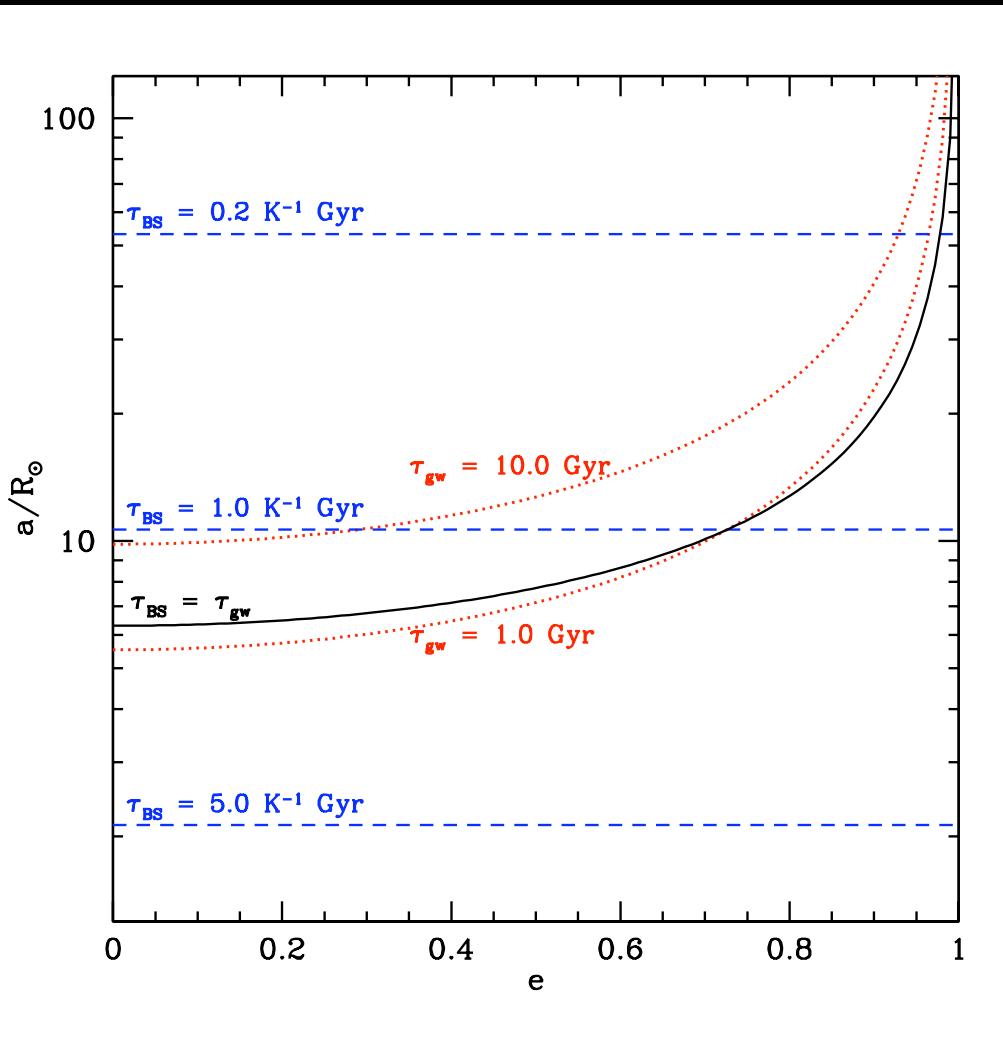
Время жизни рентгеновского источника:

- $\sim 2 \times 10^5$ лет на Едингтоновском пределе
- $\sim 5 \times 10^5$ с ULX светимостью $L_x > 10^{39}$ эрг/с

$$R = \tau / N$$

- Если в каждом ШС осталась только одна ЧД, то каждая ЧД должна формировать 2 рентгеновские двойные за млрд лет.
- Если в каждом ШС осталось 10% сформированных ЧД, то минимальная НЧФ $\sim 4 \times 10^{-3}$ на ЧД за млрд лет

Шкалы времени: гравитация и столкновения



Initial a/R_\odot and e of a $15+0.6 M_\odot$ BH-WD binary.

τ_{gw} – constant gravitational merger time

τ_{BS} – encounter time

a_{sep} is such that $\tau_{\text{gw}} = \tau_{\text{BS}}$

Сечение сильного взаимодействия

$$\sigma = 2\pi G k a m_{\text{tot}} v_\infty^{-2}$$

$$k = r_p/a$$

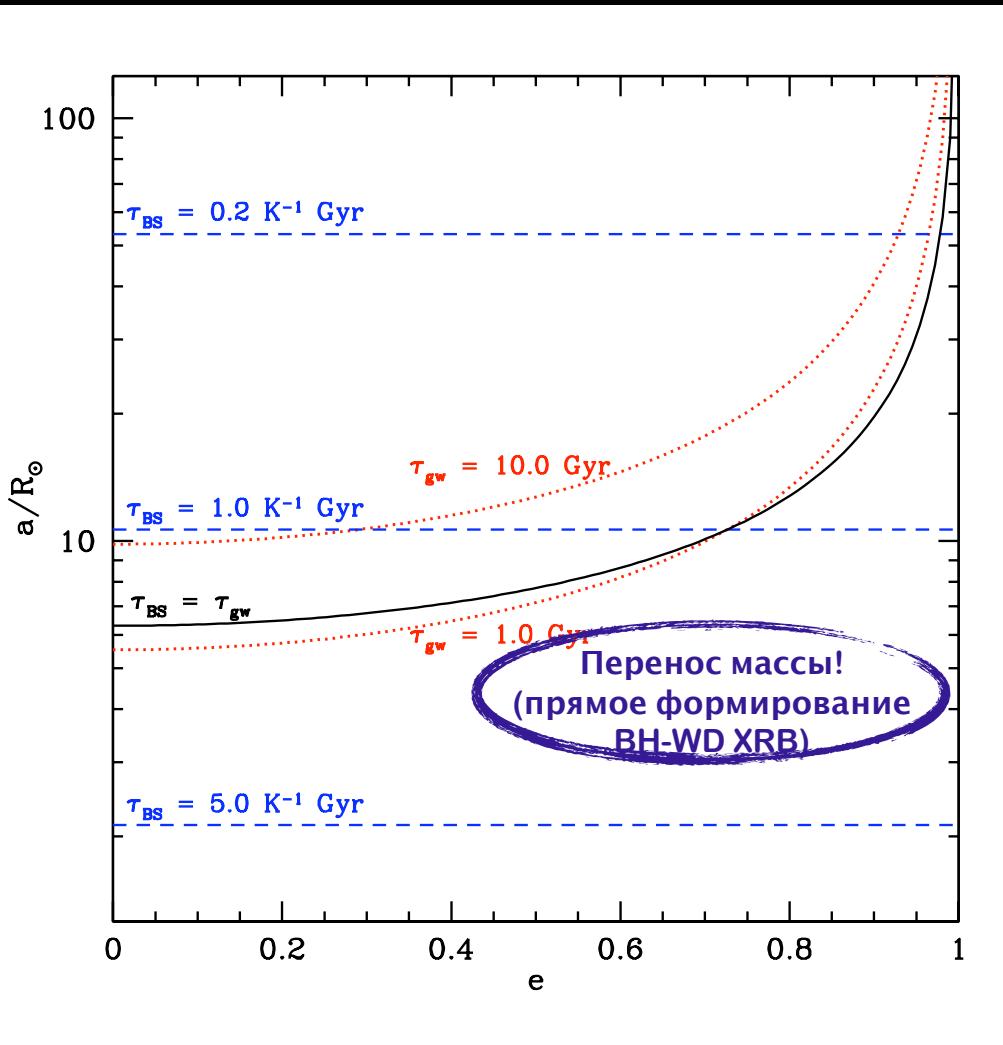
Характерное время для сильного взаимодействия

$$\tau = (\sigma n v_\infty)^{-1}$$

Частота

$$\Gamma_{\text{BS}} \simeq 0.1 k \frac{m_{\text{BH}}}{15 M_\odot} \frac{n_c}{10^5 \text{pc}^{-3}} \frac{10 \text{km s}^{-1}}{v_\infty} \frac{a}{R_\odot} \text{ per Gyr}$$

Шкалы времени: гравитация и столкновения



Сечение сильного взаимодействия

$$\sigma = 2\pi G k a m_{\text{tot}} v_\infty^{-2}$$

$$k = r_p/a$$

Характерное время для сильного взаимодействия

$$\tau = (\sigma n v_\infty)^{-1}$$

Частота

$$\Gamma_{\text{BS}} \simeq 0.1 k \frac{m_{\text{BH}}}{15 M_\odot} \frac{n_c}{10^5 \text{pc}^{-3}} \frac{10 \text{km s}^{-1}}{v_\infty} \frac{a}{R_\odot} \text{ per Gyr}$$

Взаимодействия с одиночными звездами

Fregeau et al. (2004):

$$\frac{\sigma_{\text{coll}}}{\sigma} = \frac{1}{4k} \left(\frac{215R}{a} \right)^{0.65}, \quad k=r_p/a=2 \text{ для сильных взаимодействий}$$

ГП:

- $\sigma_{\text{coll}}=\sigma$ для ЧД с $a \leq 15 R_\odot$ и $k \leq 1$
- такие двойные не переживают столкновения со звездой ГП

БК:

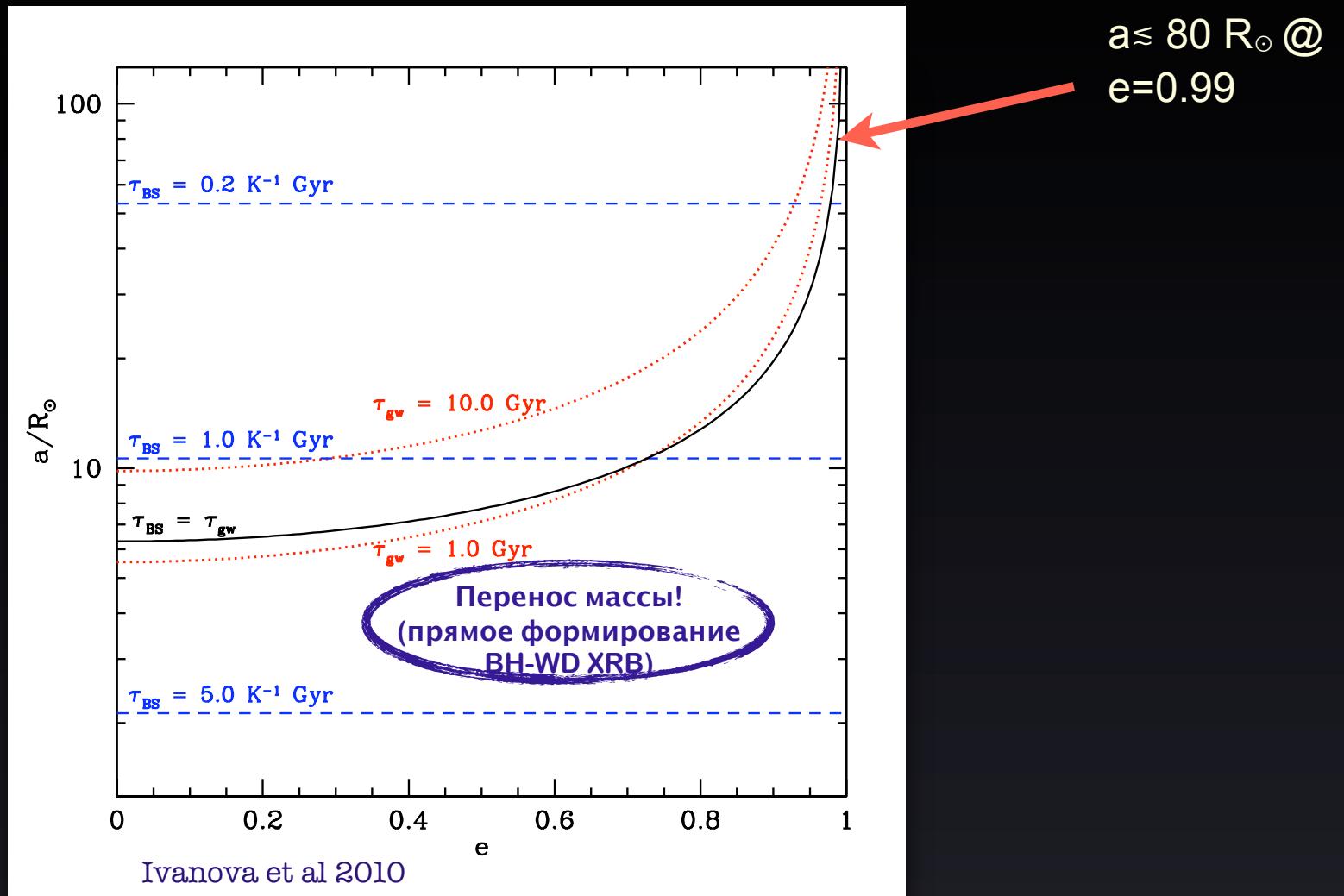
- БК составляют около 20% всех звезд в ядре ШС \rightarrow частота сильных взаимодействий в 5 раз меньше чем с ГП
- физические столкновения с БК возможны только в двойных с $a \leq 0.1 R_\odot$
Для двойных с $5 R_\odot \leq a \leq 15 R_\odot$ более вероятны смена партнера либо сохранение

Смена партнера:

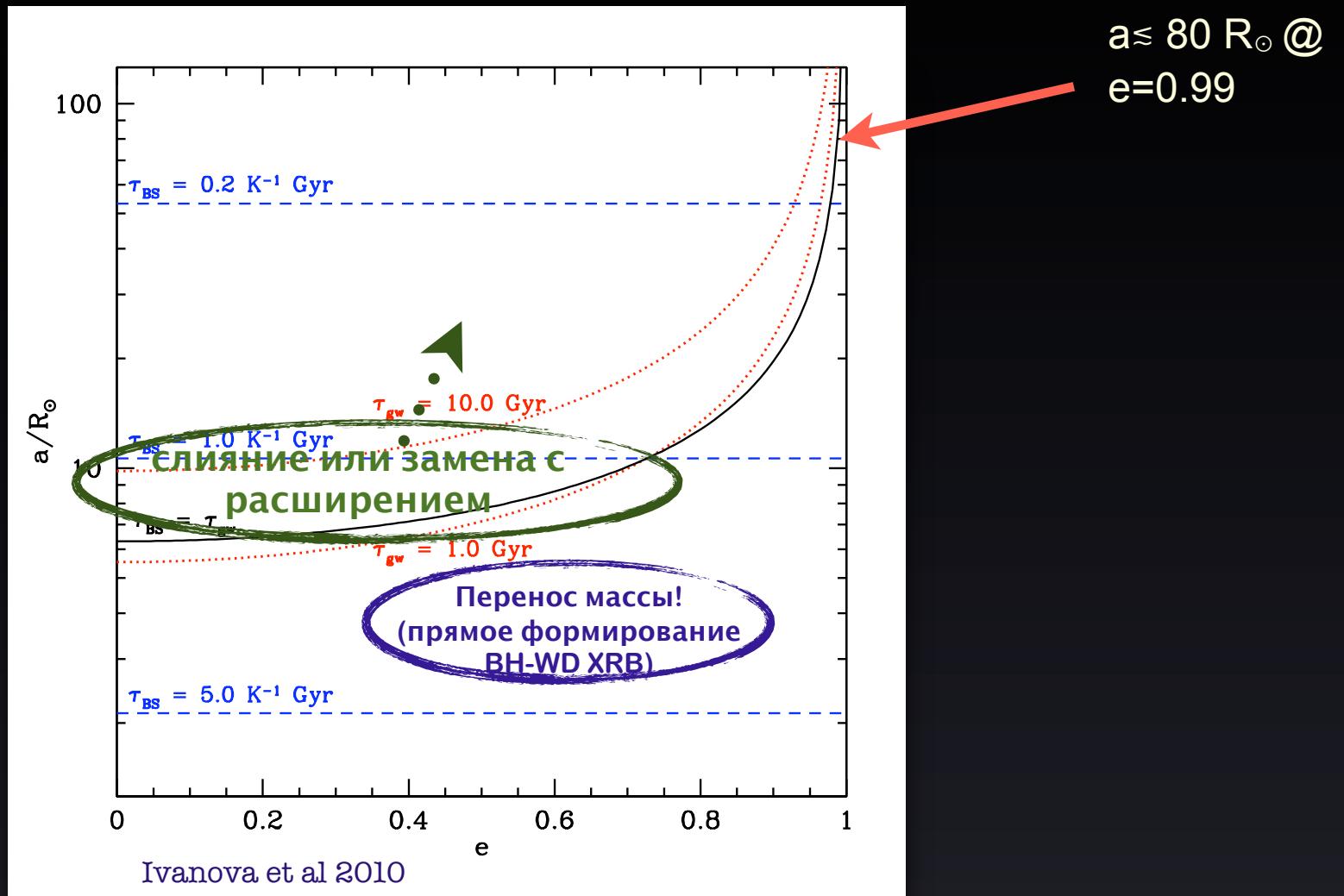
- если встреченная звезда более массивна
- сопровождается увеличением большой полуоси $\Rightarrow a > a_{\text{sep}}(e)$

Двойная, сформированная в результате замены, не сможет начать перенос массы

Шкалы времени и сценарии



Шкалы времени и сценарии



Initial a/R_\odot and e of a $15+0.6 M_\odot$ BH-WD binary.

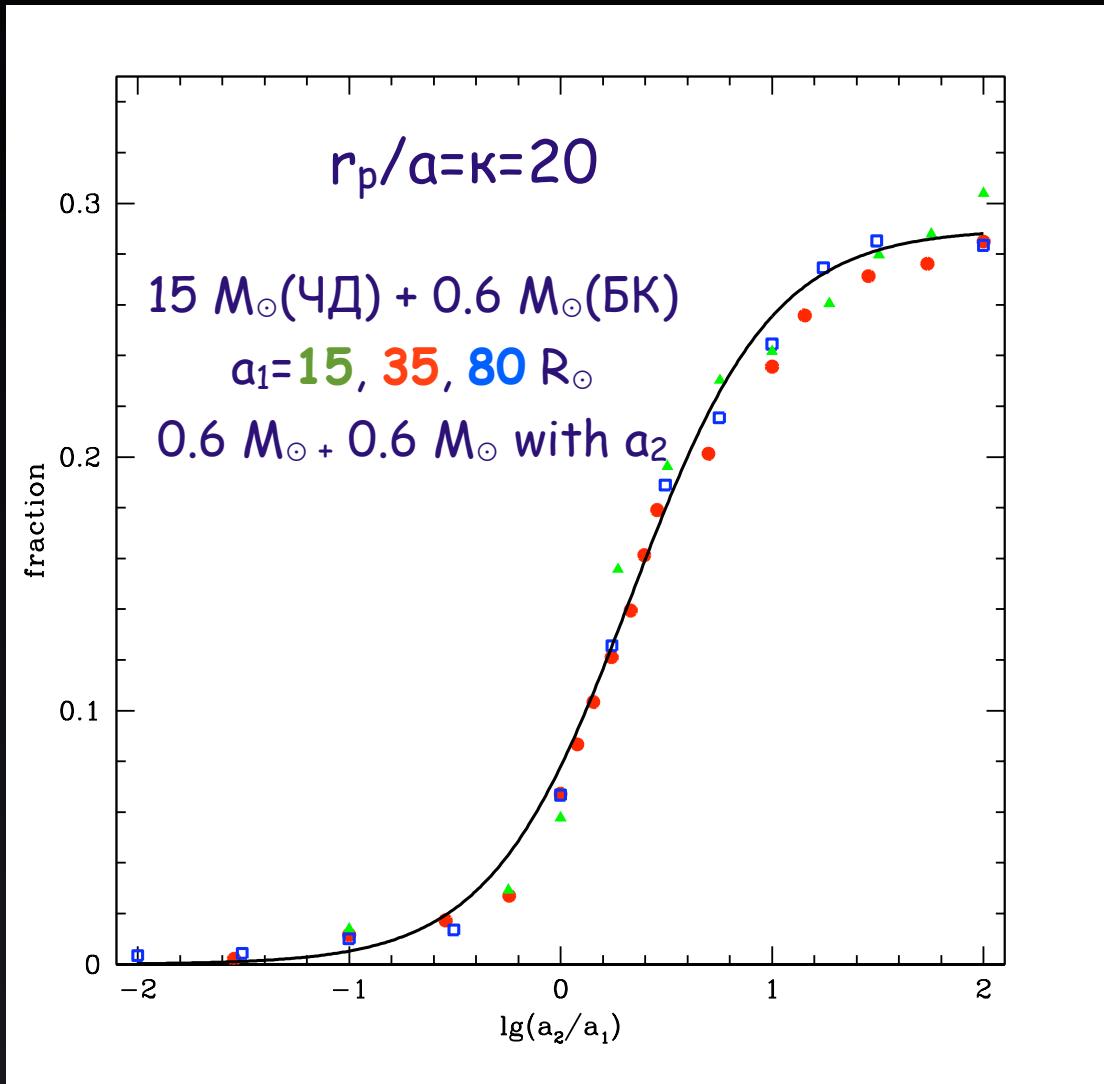
τ_{gw} – constant gravitational merger time

τ_{BS} – encounter time

a_{sep} is such that $\tau_{gw} = \tau_{BS}$

Взаимодействия с двойными: формирование иерархически-стабильных тройных

Доля столкновений между двойными которые результируют в формировании тройной



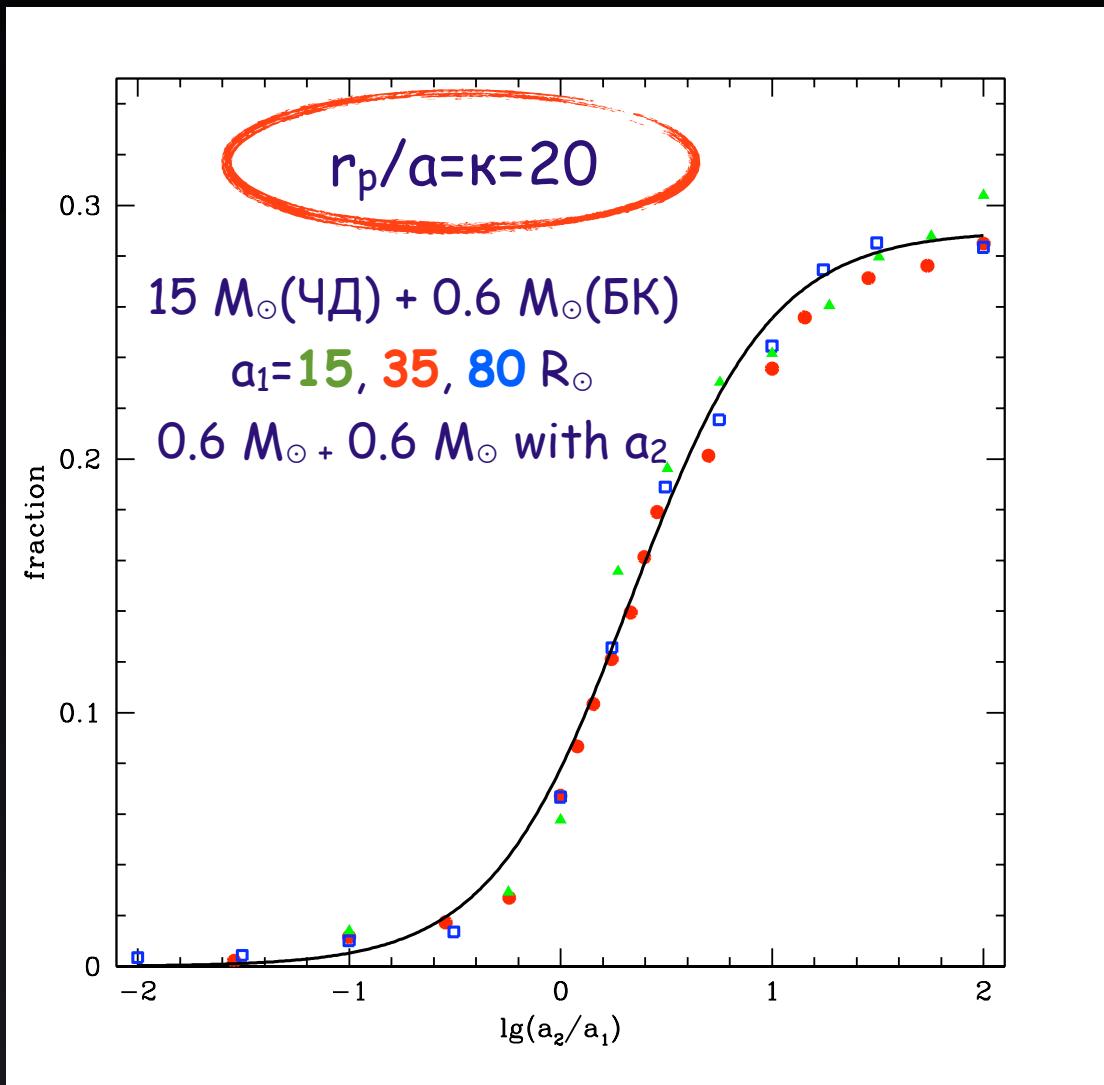
$$\frac{\Gamma_{\text{triples}}(a_1, a_2)}{\Gamma_{\text{BS}}(a_1)} \sim 3\sqrt{2}f_{\text{wb}} \left(1 + \frac{a_2}{a_1}\right).$$

При $f_{\text{wd}} \geq 5\%$, ЧДБД с $a_1 = 20 R_\odot$ формирует тройную 30 раз за 1 млр лет

Это превышает скорость сильных взаимодействий с одиночными звездами

Взаимодействия с двойными: формирование иерархически-стабильных тройных

Доля столкновений между двойными которые результируют в формировании тройной



$$\frac{\Gamma_{\text{triples}}(a_1, a_2)}{\Gamma_{\text{BS}}(a_1)} \sim 3\sqrt{2}f_{\text{wb}} \left(1 + \frac{a_2}{a_1}\right).$$

При $f_{\text{wd}} \geq 5\%$, ЧДБД с $a_1 = 20 R_\odot$ формирует тройную 30 раз за 1 млр лет

Это превышает скорость сильных взаимодействий с одиночными звездами

Перенос массы индуцированный механизмом Козая

Механизм Козая вызывает большие изменения в эксцентриситете и в наклонении звездных орбит.

TIMT (triple induced mass transfer)

- $a \leq 80 R_{\odot}$
- для тройных: функция e_{\max} под воздействием механизма Козая: от 0.07 ($a=15 R_{\odot}$) до 0.01 (для $a > 40 R_{\odot}$).
- **Консервативная оценка:** все ЧД-БК двойные с $a < 35 R_{\odot}$ гарантировано достигнут TIMT в течении 1 млрд лет.
- **Оптимистичная оценка:** все ЧД-БК двойные с $a < 80 R_{\odot}$ достигнут TIMT как минимум раз в течении нескольких млрд лет.

Замечание: TIMT будет успешным только если время между звездными столкновениями дольше чем время для увеличения эксцентриситета за счет механизма Козая до e_{\max} .

$$\frac{\tau_{Koz}}{\tau_{BB}} \approx 4 \times 10^{-14} f_b \frac{0.42 \ln(1/e_i)}{\sqrt{\sin^2(i_0) - 0.4}} \left(\frac{a_2^2}{a_1 R_{\odot}} \right)^{5/2} \left(\frac{m_{BH}}{15 M_{\odot}} \right)^{3/2} \frac{M_{\odot}}{m_o} (1 - e_o^2)^{3/2} \frac{n_c}{10^5 \text{pc}^{-3}} \frac{10 \text{km/s}}{v_{\infty}}$$

в тройных с $15 R_{\odot} < a_1 < 80 R_{\odot}$ и $a_2 < 10^5 R_{\odot}$ время $\tau_{Koz} \ll \tau_{BB}$.

Множественные слабые взаимодействия: ужесточение

В результате последовательности из многих пролетов на расстоянии (слабых взаимодействий), жесткие двойные становятся жестче (Hut 1983):

$$N_{\text{hard}} \approx \log(f_{\text{change}}) / \log(1 + \delta)$$

$\delta \sim m_3/m_{\text{bh}} \sim 0.04$ относительное изменение энергии связи двойной в результате одного события.



ужесточение ЧД-БК двойной с $a=1000 R_{\odot}$ до $35 R_{\odot}$ может произойти за примерно 100 событий, что произойдет за примерно несколько Гигалет.

Однако:

в то же самое время будут происходить сильные взаимодействия.

Ужесточение: детальные расчеты

a_i	Hardened fraction [per cent]				Average time [Gyr]			
	Black hole fraction in the total core population [per cent]							
	0.4	0.04	0.004	0	0	0.4	0.04	0.004
Corresponding $f_{\text{BH},0.1}$								
	10	1	0.1	0	10	1	0.1	0
Hardening to $35 R_\odot$								
Original binary survival only								
$100R_\odot$	4.6	12.9	14.8	14.9	0.86	1.38	1.48	1.52
$250R_\odot$	0.53	2.5	3.4	3.4	1.07	1.9	1.9	1.9
$500R_\odot$	0.	0.8	1.0	1.3	-	1.9	2.1	2.3
Exchanges are allowed								
$100R_\odot$	9.4	30.4	38.1	38.9	1.06	1.50	1.58	1.60
$250R_\odot$	1.3	9.8	13.9	13.3	1.17	1.85	2.00	2.07
$500R_\odot$	0.	3.2	4.8	5.9	-	1.78	2.15	2.09
Hardening to $80 R_\odot$								
Original binary survival only								
$100R_\odot$	37.9	56.0	58.2	60.6	0.22	0.29	0.30	0.31
$150R_\odot$	12.7	27.5	30.0	30.9	0.35	0.52	0.57	0.57
$200R_\odot$	6.5	16.9	19.1	20.7	0.41	0.64	0.68	0.70
$250R_\odot$	3.5	11.3	14.4	14.4	0.46	0.73	0.77	0.77
$500R_\odot$	1.1	3.1	3.8	3.8	0.37	0.90	0.98	0.98

$f_{\text{hard}} \ll 1$

Наибольший шанс
при $f_{\text{ЧД}}=10$
это когда
100% сформированных
ЧД осталось в ШС

Ужесточение: детальные расчеты

a_i	Hardened fraction [per cent]				Average time [Gyr]			
	Black hole fraction in the total core population [per cent]				Corresponding $f_{\text{BH},0.1}$			
	0.4	0.04	0.004	0	0	0.4	0.04	0.004
	10	1	0.1	0	10	1	0.1	0
	Hardening to $35 R_\odot$							
	Original binary survival only							
$100R_\odot$	4.6	12.9	14.8	14.9	0.86	1.38	1.48	1.52
$250R_\odot$	0.53	2.5	3.4	3.4	1.07	1.9	1.9	1.9
$500R_\odot$	0.	0.8	1.0	1.3	-	1.9	2.1	2.3
	Exchanges are allowed							
$100R_\odot$	9.4	30.4	38.1	38.9	1.06	1.50	1.58	1.60
$250R_\odot$	1.3	9.8	13.9	13.3	1.17	1.85	2.00	2.07
$500R_\odot$	0.	3.2	4.8	5.9	-	1.78	2.15	2.09
	Hardening to $80 R_\odot$							
	Original binary survival only							
$100R_\odot$	37.9	56.0	58.2	60.6	0.22	0.29	0.30	0.31
$150R_\odot$	12.7	27.5	30.0	30.9	0.35	0.52	0.57	0.57
$200R_\odot$	6.5	16.9	19.1	20.7	0.41	0.64	0.68	0.70
$250R_\odot$	3.5	11.3	14.4	14.4	0.46	0.73	0.77	0.77
$500R_\odot$	1.1	3.1	3.8	3.8	0.37	0.90	0.98	0.98

$f_{\text{hard}} \ll 1$

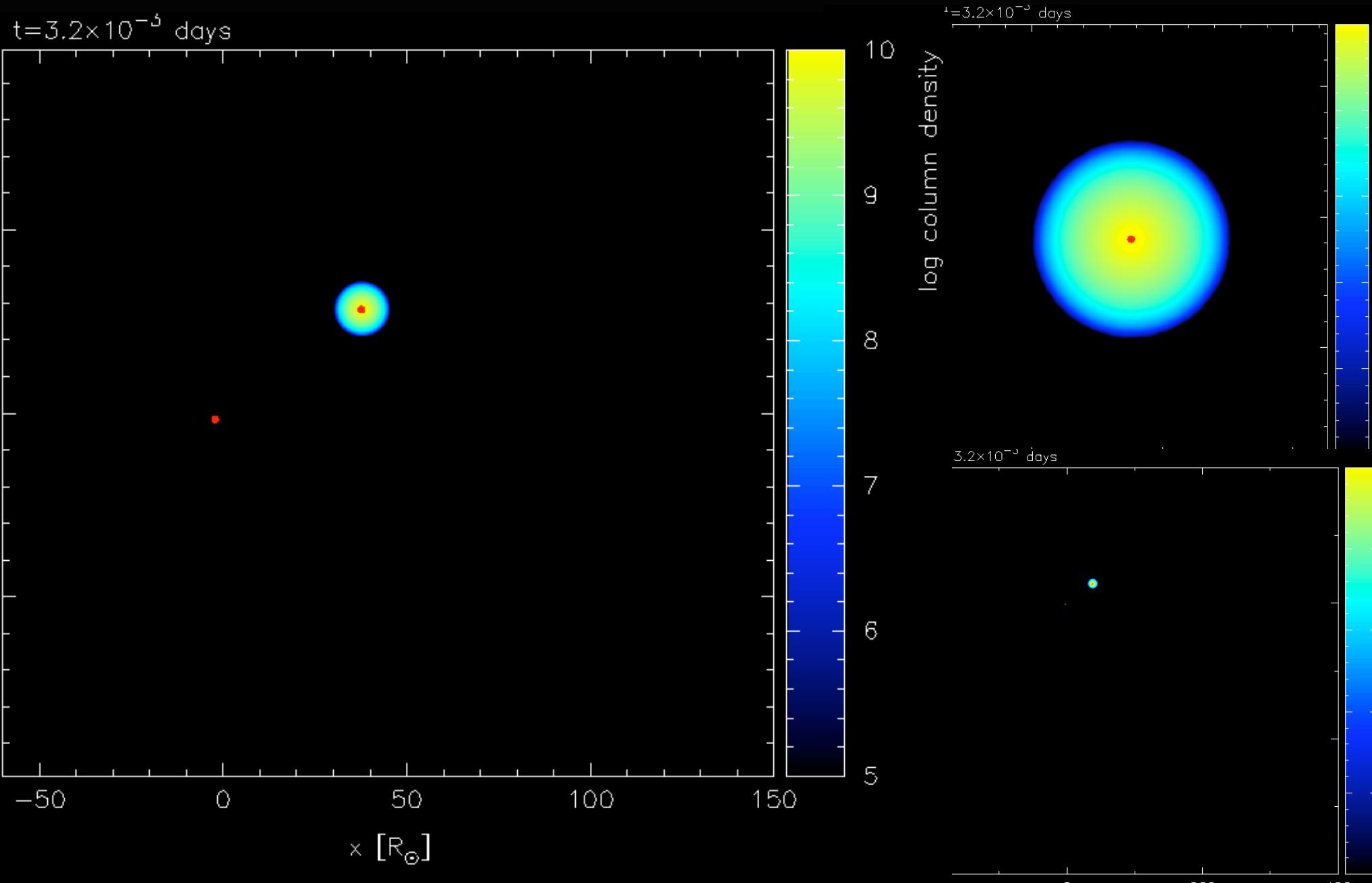
Наибольший шанс
при $f_{\text{ЧД}}=10$
это когда
100% сформированных
ЧД осталось в ШС

Формирование: смена партнера

$$a_{\text{post}} \sim a_{\text{pre}} m_{\text{BH}} / m_c$$

- Для создания ЧД-БК двойной с $15R_\odot < a_{\text{post}} < 35R_\odot$ срабатывают только столкновения с двойными БК-БК:
 $\text{ЧФ}_{c1} \simeq 2 \times 10^{-3}$ на ЧД за млрд лет
- Для создания ЧД-БК двойной с $a_{\text{post}} \sim 80-1000R_\odot$ срабатывают столкновения с двойными как БК-БК так и ГП-БК:
 $\text{ЧФ}_{c2} \simeq 0.06 f_{\text{hard}} \simeq 2 \times 10^{-3}$ на ЧД за млрд лет
- В случае оптимистичного сценария (ТИМТ работает во всех двойных с $a_{\text{post}} < 80 R_\odot$)
 $\text{ЧФ}_{c1} \simeq 6 \times 10^{-3}$ и $\text{ЧФ}_{c2} \simeq 1.5 \times 10^{-2}$ на ЧД за млрд лет

Формирование: столкновения ЧД и КГ



Формирование: столкновения ЧД и КГ

$$\Gamma_{\text{BHRG}} \approx 0.1 f_{\text{RG}} \frac{r_p}{\bar{R}_{\text{RG}}} \frac{m_{\text{BH}}}{15M_{\odot}} \frac{n_c}{10^5 \text{pc}^{-3}} \frac{\bar{R}_{\text{RG}}}{R_{\odot}} \frac{10 \text{km/s}}{v_{\infty}} \text{per Gyr}$$

$$r_p \approx R_{\text{RG}}$$

граница между теми столкновениями, которые ведут к формированию двойной которая станет рентгеновским источником в изоляции и теми, которые нет

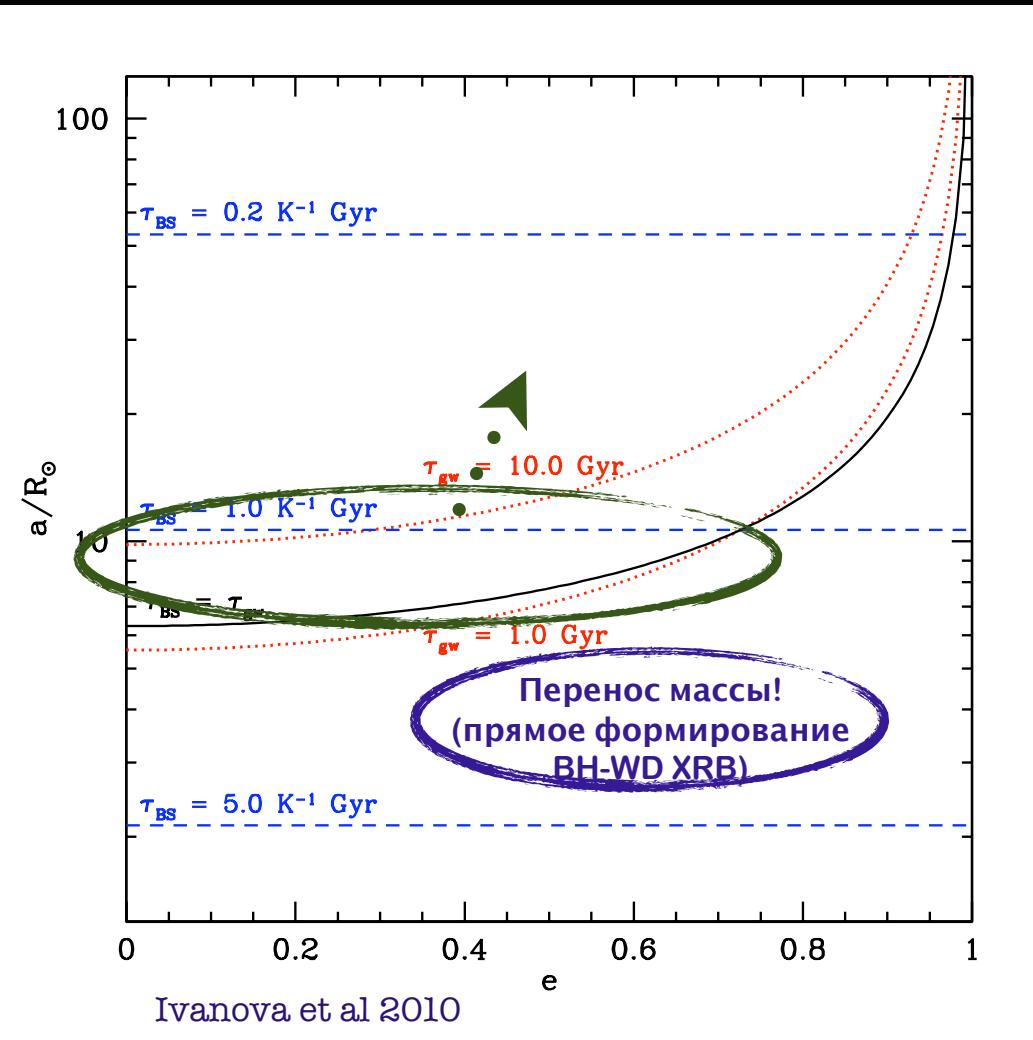
$$r_p \approx 5R_{\text{RG}}$$

максимальное расстояние, при котором двойная формируется

non-TIMT столкновения дают ЧФ до 4×10^{-4} на ЧД за млрд лет

с учетом TIMT, в оптимистичном сценарии, ЧФ до 1.5×10^{-2} на ЧД за млрд лет

Сценарии формирования и ЧФ



Ivanova et al 2010

- Консервативная оценка:

НЧФ возможно объяснить только если 10% всех сформированных ЧД остается в ШС и при этом взаимодействуют с обычным звездным населением (ядра) ШС.

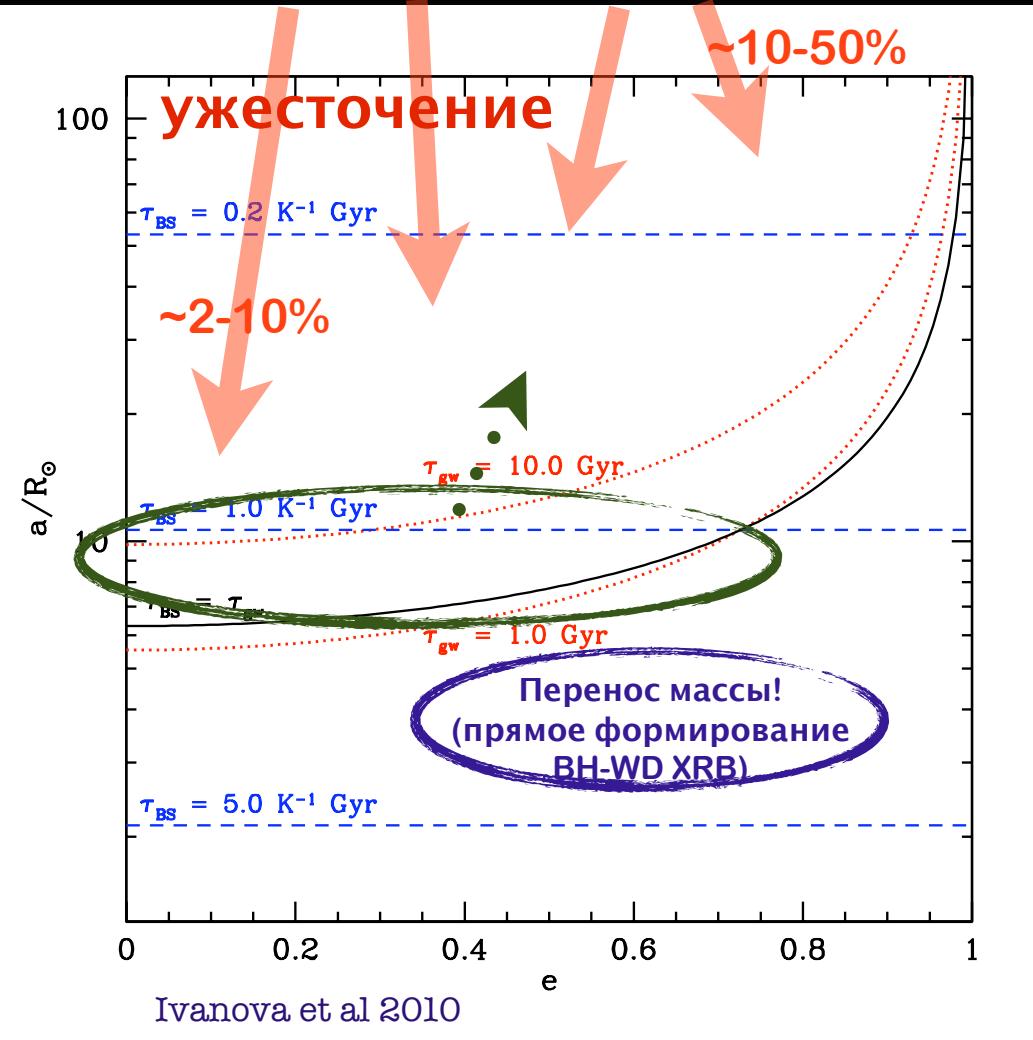
- Оптимистичная оценка

все возможные способы формирования дают сравнимую ЧФ и каждый из них может объяснить НЧФ рентгеновских двойных ЧД и БК. Общая ЧФ $\sim 4 \times 10^{-2}$ на ЧД за млрд лет. $f_{\text{ЧД}} = 0.1$ - минимальное значение, необходимое для объяснения НЧФ.

Даже в самом оптимистичном случае необходимо, чтобы как минимум 1% всех изначально сформированных ЧД не только остались в ШС, но и не отделились динамически от звездного населения ядра в отдельное подскопление ЧД.

Ожидается продолжающееся формирование ЧД-ЧД двойных в наше время.

Сценарии формирования и ЧФ



- Консервативная оценка:

НЧФ возможно объяснить только если 10% всех сформированных ЧД остается в ШС и при этом взаимодействуют с обычным звездным населением (ядра) ШС.

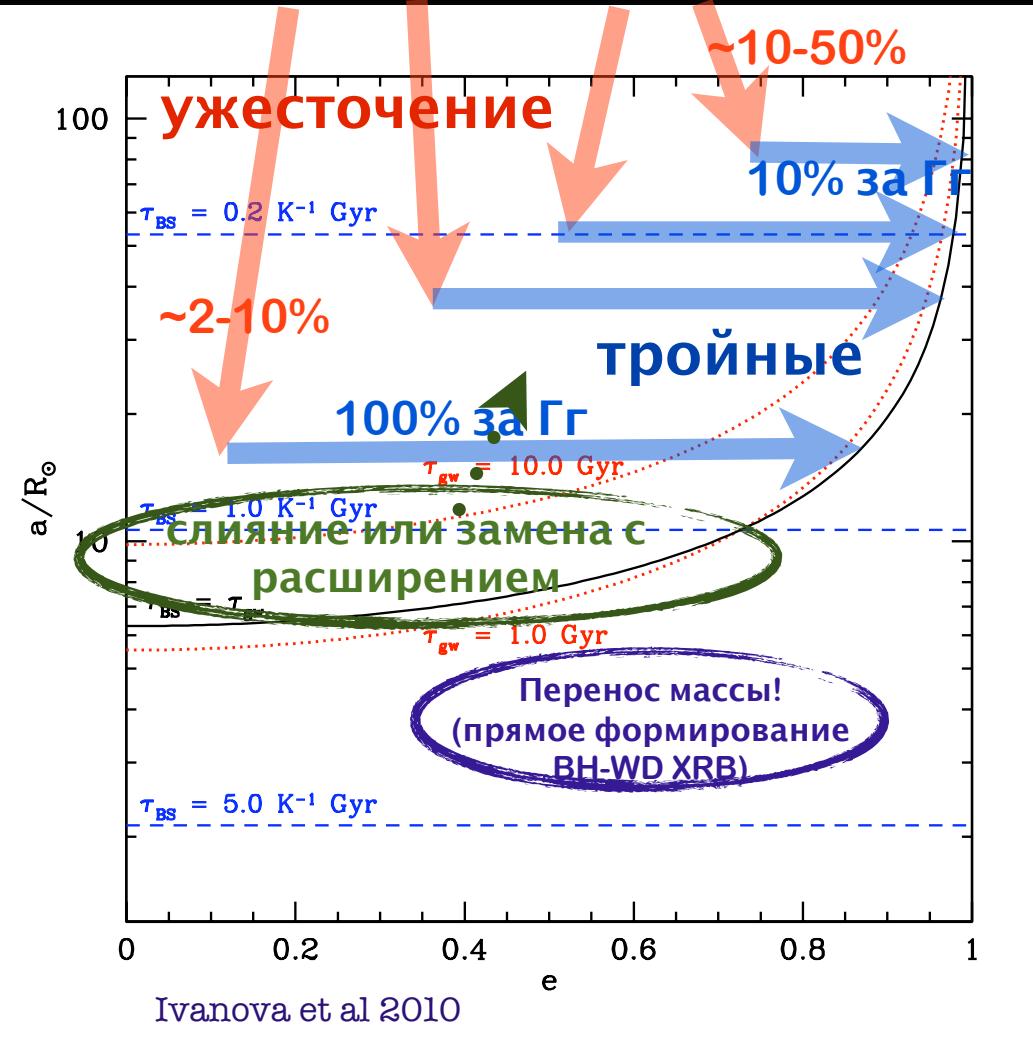
- Оптимистичная оценка

все возможные способы формирования дают сравнимую ЧФ и каждый из них может объяснить НЧФ рентгеновских двойных ЧД и БК. Общая ЧФ $\sim 4 \times 10^{-2}$ на ЧД за млрд лет. $f_{\text{ЧД}} = 0.1$ - минимальное значение, необходимое для объяснения НЧФ.

Даже в самом оптимистичном случае необходимо, чтобы как минимум 1% всех изначально сформированных ЧД не только остались в ШС, но и не отделились динамически от звездного населения ядра в отдельное подскопление ЧД.

Ожидается продолжающееся формирование ЧД-ЧД двойных в наше время.

Сценарии формирования и ЧФ



Ivanova et al 2010

- Консервативная оценка:

НЧФ возможно объяснить только если 10% всех сформированных ЧД остается в ШС и при этом взаимодействуют с обычным звездным населением (ядра) ШС.

- Оптимистичная оценка

все возможные способы формирования дают сравнимую ЧФ и каждый из них может объяснить НЧФ рентгеновских двойных ЧД и БК. Общая ЧФ $\sim 4 \times 10^{-2}$ на ЧД за млрд лет. $f_{\text{ЧД}} = 0.1$ - минимальное значение, необходимое для объяснения НЧФ.

Даже в самом оптимистичном случае необходимо, чтобы как минимум 1% всех изначально сформированных ЧД не только остались в ШС, но и не отделились динамически от звездного населения ядра в отдельное подскопление ЧД.

Ожидается продолжающееся формирование ЧД-ЧД двойных в наше время.

Заключение

- Происхождение и текущее состояние маломассивных рентгеновских двойных, как с вырожденными, так и с невырожденными компаньонами, еще понятны не до конца - почему так и не обнаружено двойных с БК в поле? почему рентгеновские светимости галактических РИ не совпадают с теоретически предсказанными?
- Обнаружение ЧД-БК рентгеновских двойных в ШС дает новые ограничения на динамическую эволюцию населения ЧД в ШС
- Взрывная ОО - совершенно новый и интересный способ эволюции через фазу общей оболочки. Он решает проблему энергетики для рентгеновских двойных с коротким периодом (ЧФ), а также дает объяснение связи между долгими гамма-всплесками и сверхновыми Ic.