

Формирование маломассивных рентгеновских 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 аккректор - НЗ или ЧД

RLOF (заполняющие полость

Роша) доноры -

маломассивные звезды

ГП, КГ или БК, $< 1M_{\odot}$

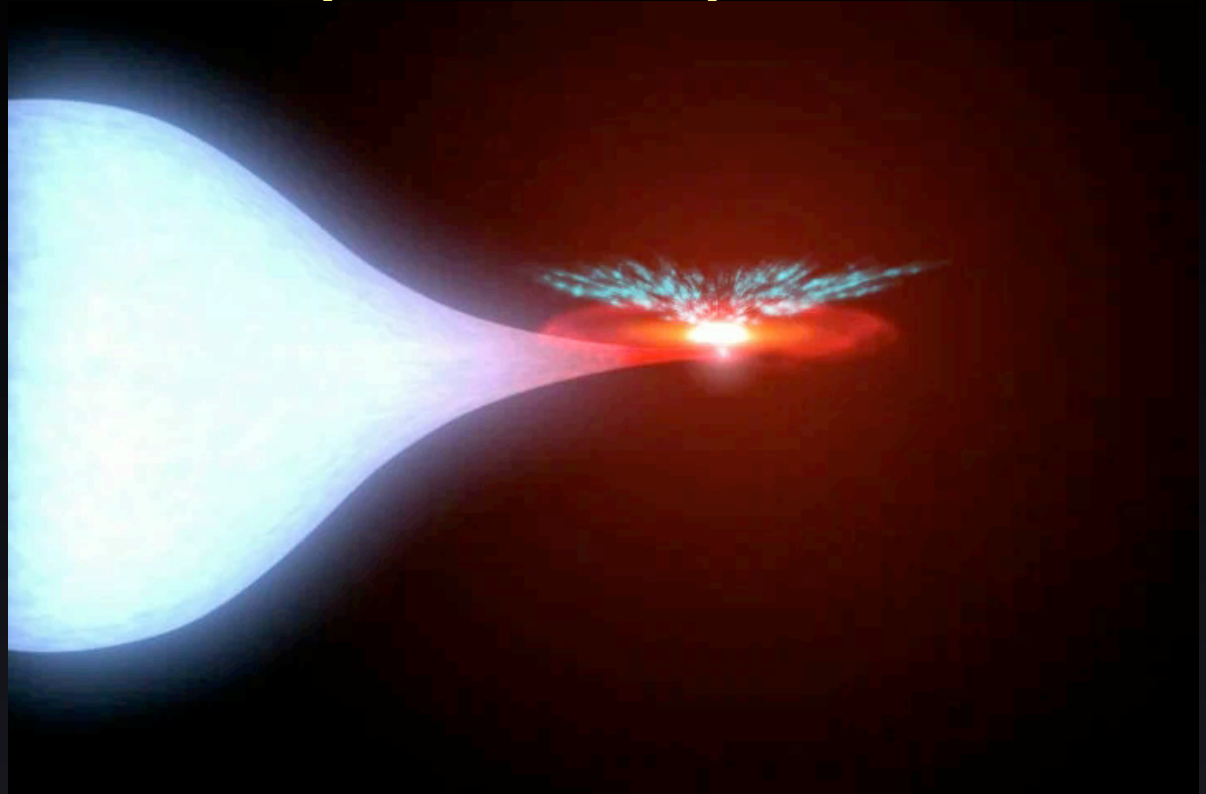
Орбитальные периоды:

от 10 минут to сотен дней

Возраст: $\sim 0.1 - 10$ млрд лет

аккреционная шкала времени

$10^7 - 10^9$ лет



GRO J1655-40

Credit: NASA/CXC/A.Hobart

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 ($kT < 10$ keV).

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

Массивные рентгеновские двойные источники (HMXBs)

Компактный аккректор - НЗ или ЧД

Аккреция захваченного звездного ветра -
массивные доноры
(О, В, Ве, голубые СГ)

Орбитальные периоды:

от 1.5 до 260 дней

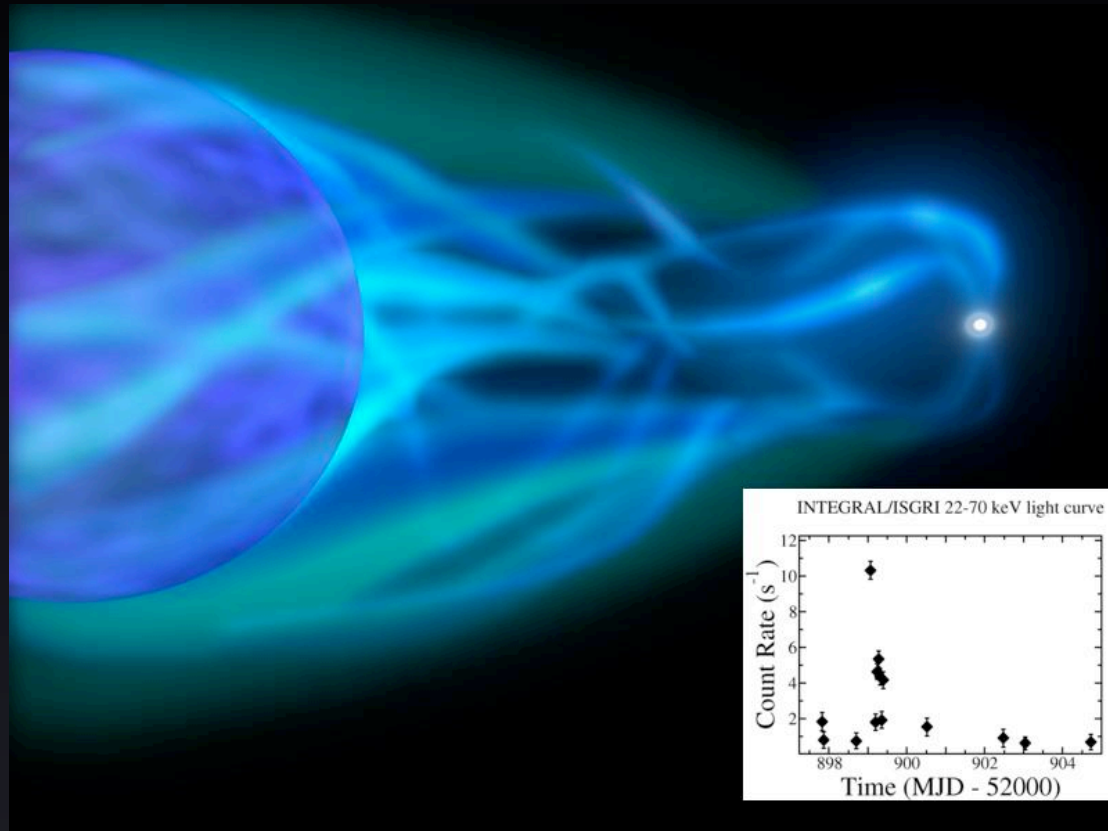
Возраст: менее 10 млн лет

аккреционная шкала времени

$< 10^7$ лет

Lx: Жесткий рентгеновский спектр

Большая часть транзиенты.



Рентгеновские двойные: почему это важно?

BH Все наблюдательные подтверждения физики ЧД звездной массы приходят из исследования рентгеновских двойных где один из компаньонов - кандидат в ЧД.

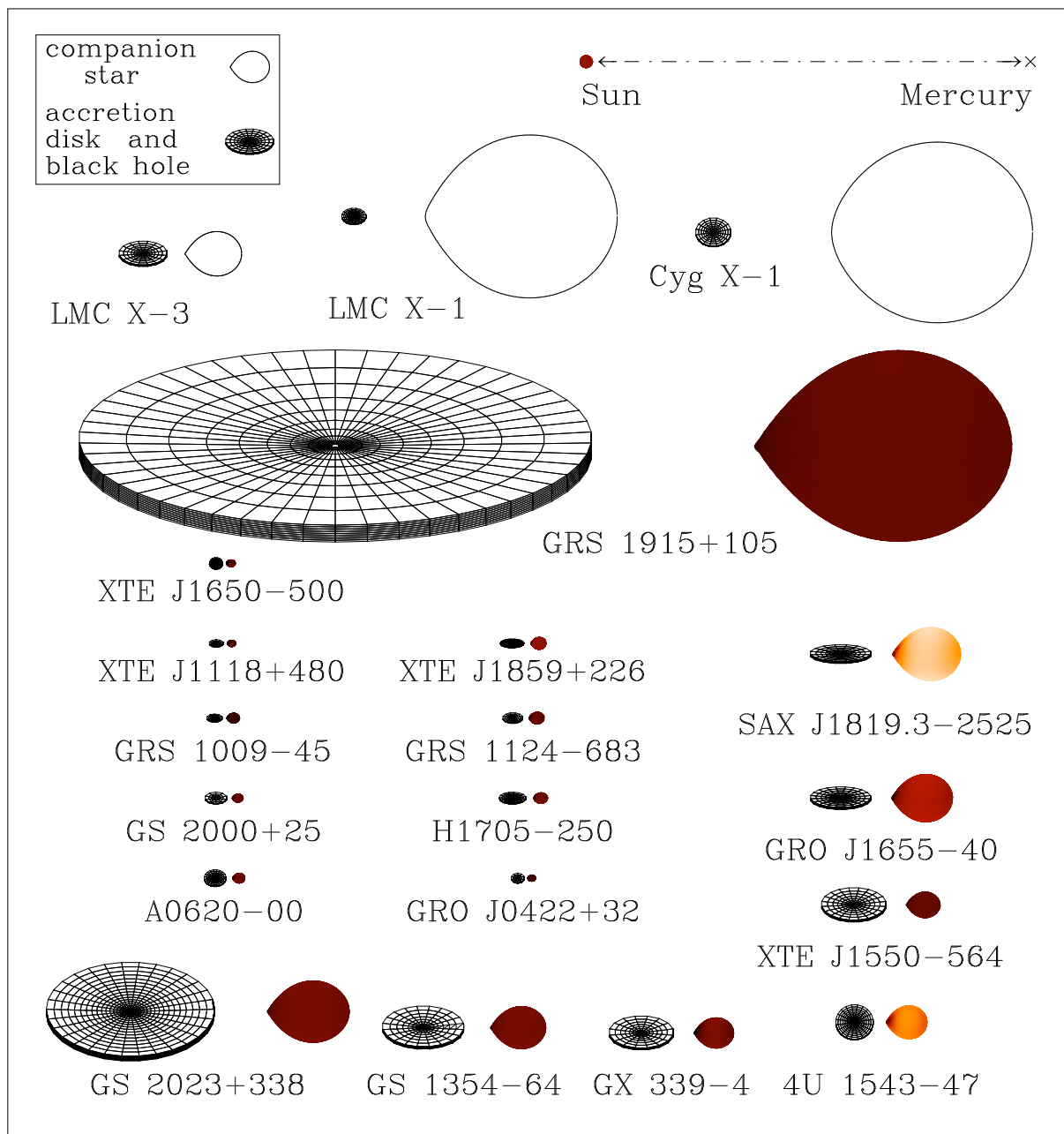
SN LMXBs и HMXBs - их орбитальные параметры - дают нам сильные ограничения на то как происходил взрыв сверхновых, что в свою очередь играет решающее значение для понимания того, как ЧД формируются.

GRB Чтобы понять характер γ -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 отнаблюдать. 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 среднemasсивных 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

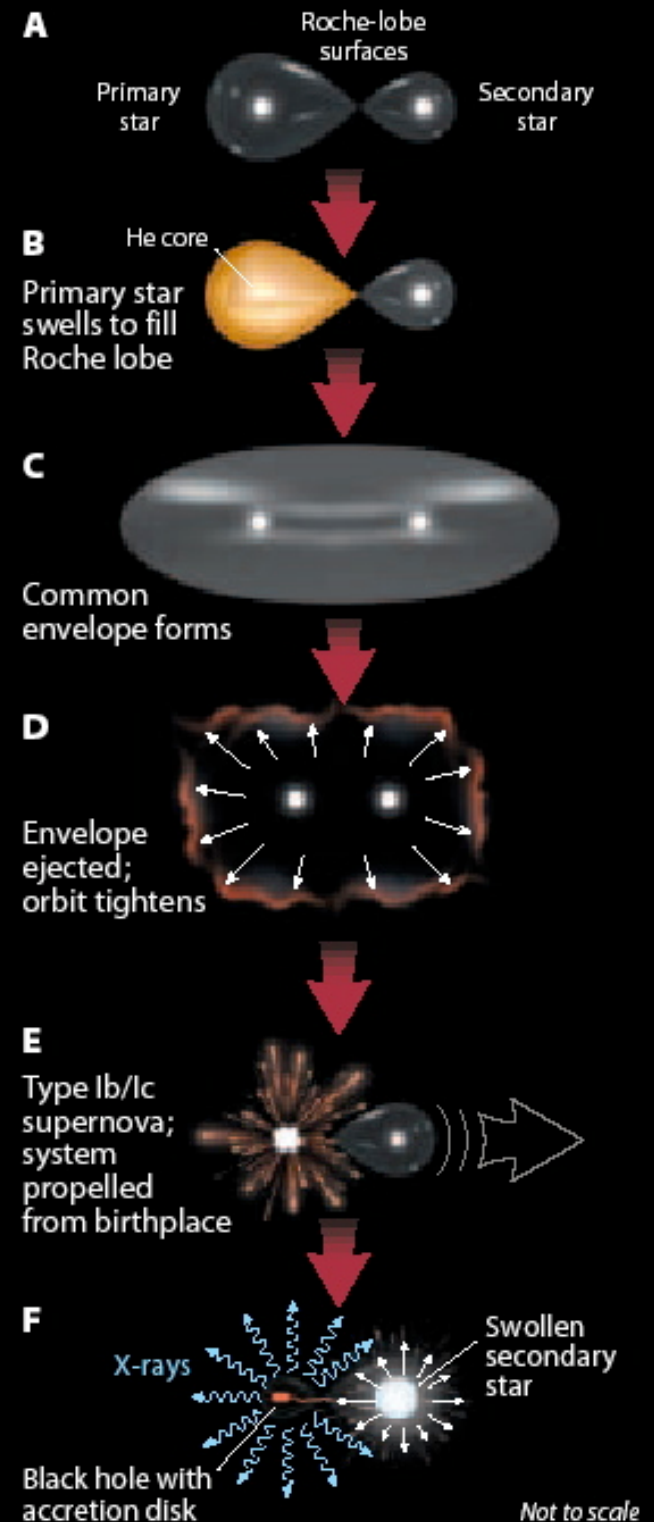
Взрыв СН: двойная скорее всего становится эксцентричной

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



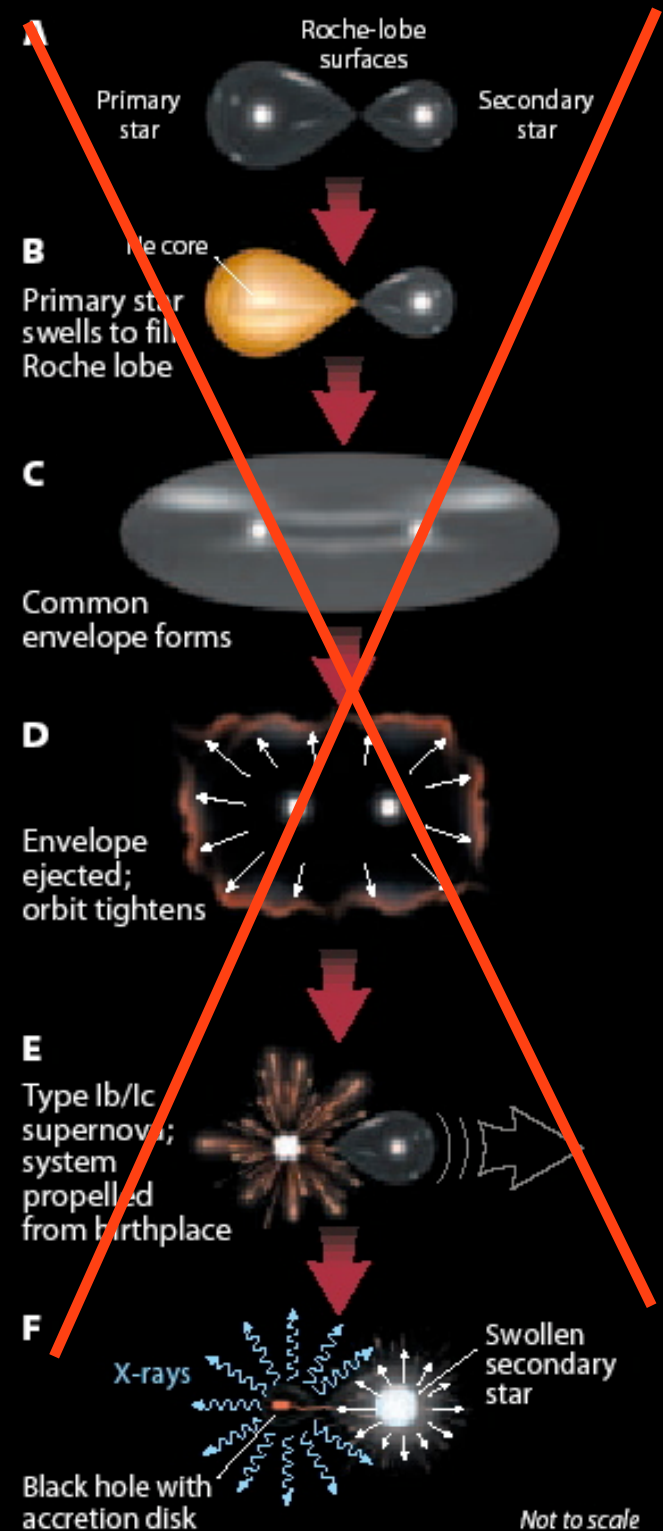
LMXBs: стандартная парадигма

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

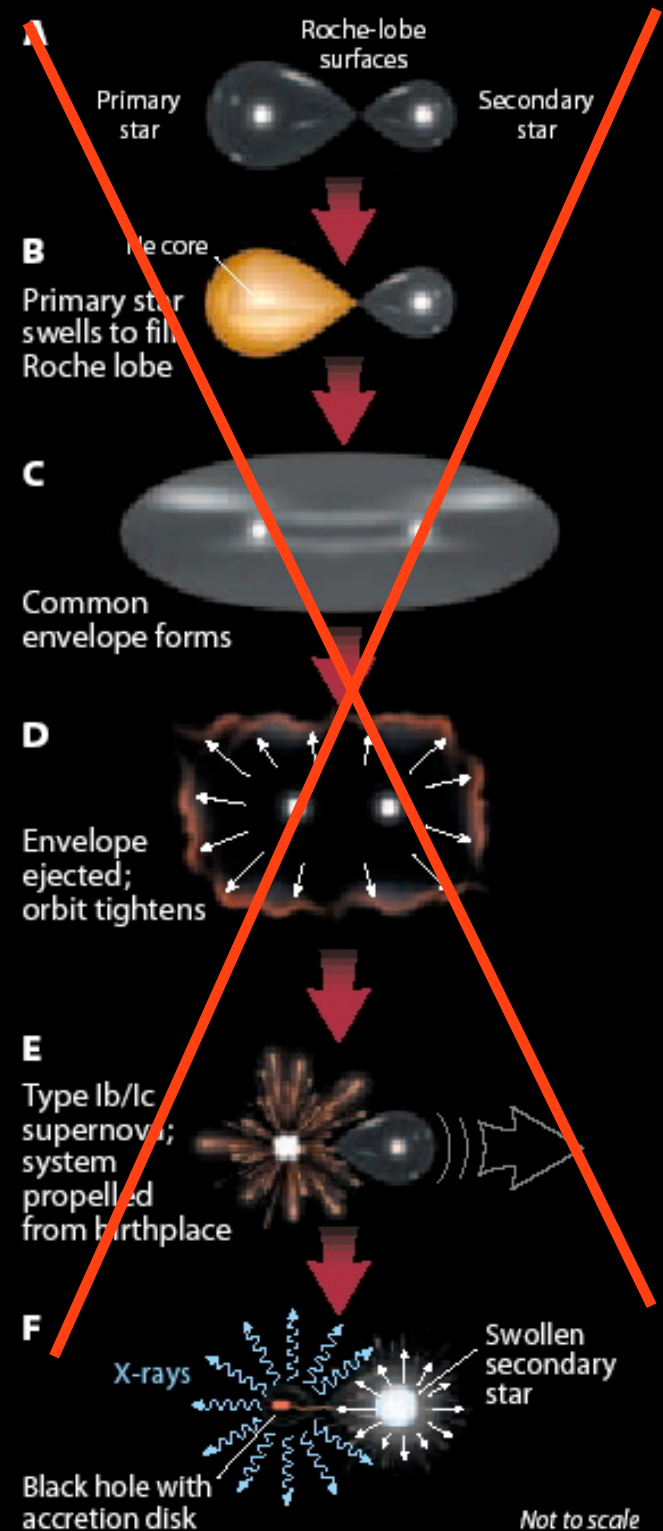
Все не так просто!

Что же может пойти не так?

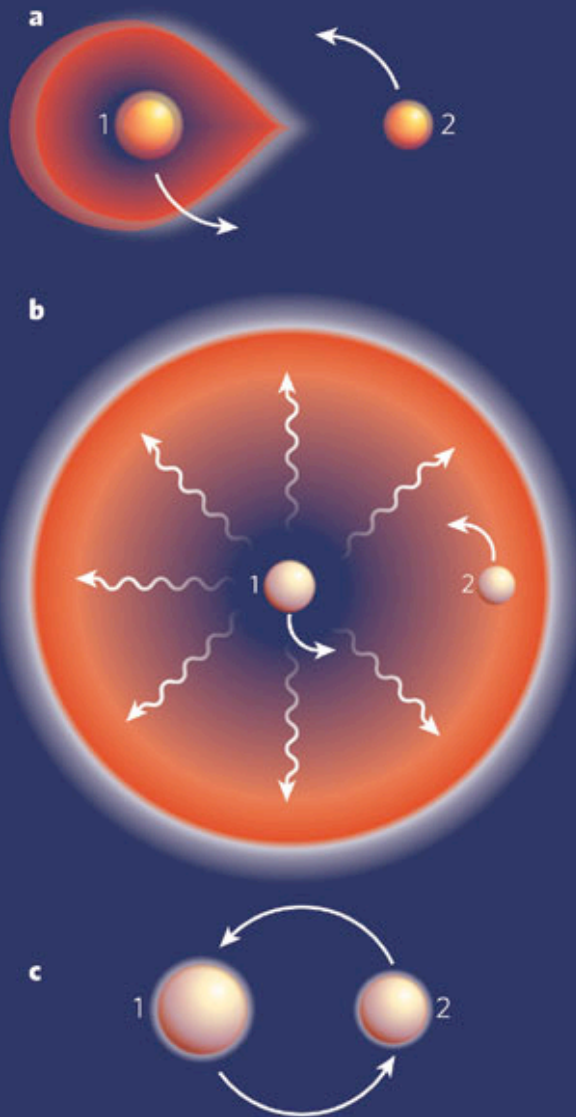
Практически все!

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; вследствие потери углового момента и орбитальной энергии большая полуось орбиты уменьшается.

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

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

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

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

(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 IMXB в 100-1000 выше!

Вопрос: где же они?

Коротко периодические РД с ЧД и среднemasсивными донорами: место на спектральный класс

Justham et al. (2006): МЗВ может работать в случае Ар/Вр компаньонов.

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

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

Но не эффективные температуры!

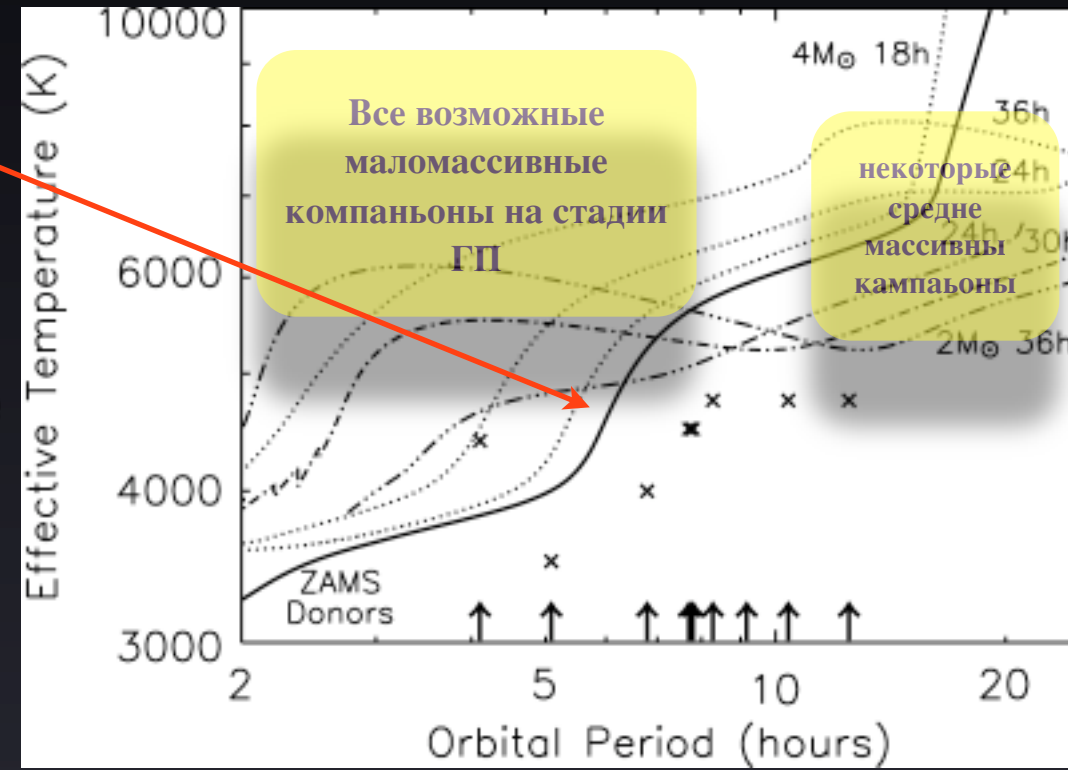
В 8 КТРД с ЧД, периоды и T_{eff} измерены

Показан верхний предел для T_{eff}

Переизлучение: не работает

В некоторых системах L_i 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 среднemasсивными донорами: место на спектральный класс

Justham et al. (2006): МЗВ может работать в случае Ар/Вр компаньонов.

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

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

Но не эффективные температуры!

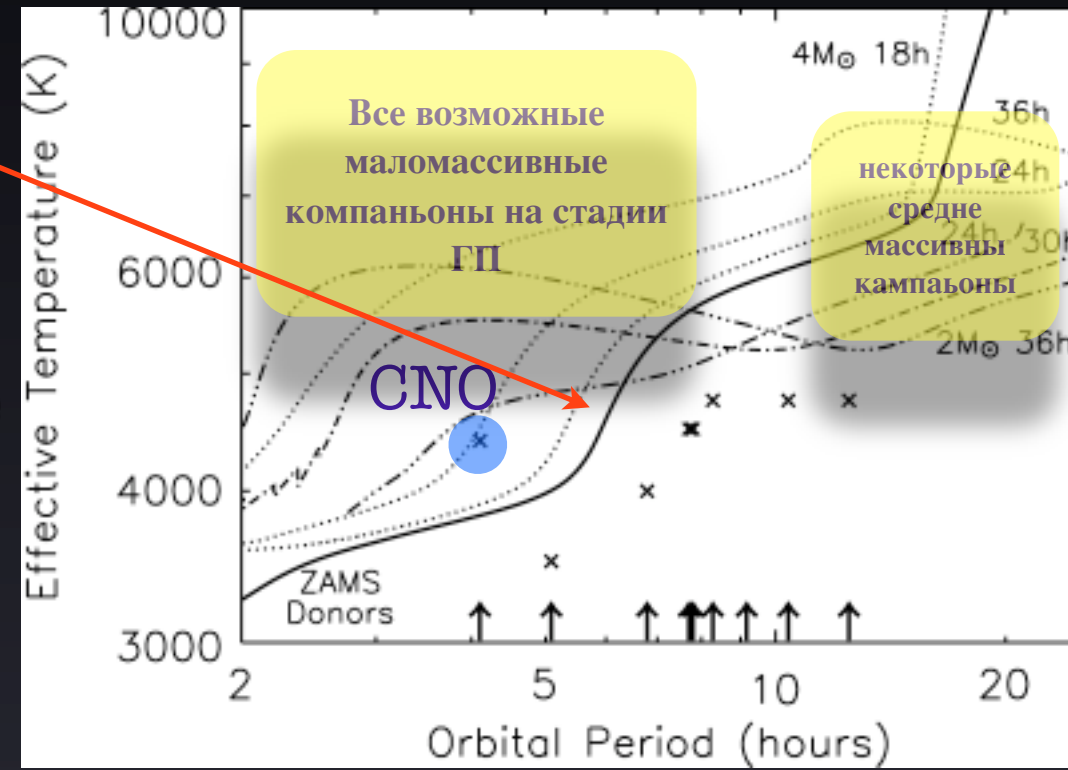
В 8 КТРД с ЧД, периоды и T_{eff} измерены

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 среднemasсивными донорами: место на спектральный класс

Justham et al. (2006): МЗВ может работать в случае Ар/Вр компаньонов.

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

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

Но не эффективные температуры!

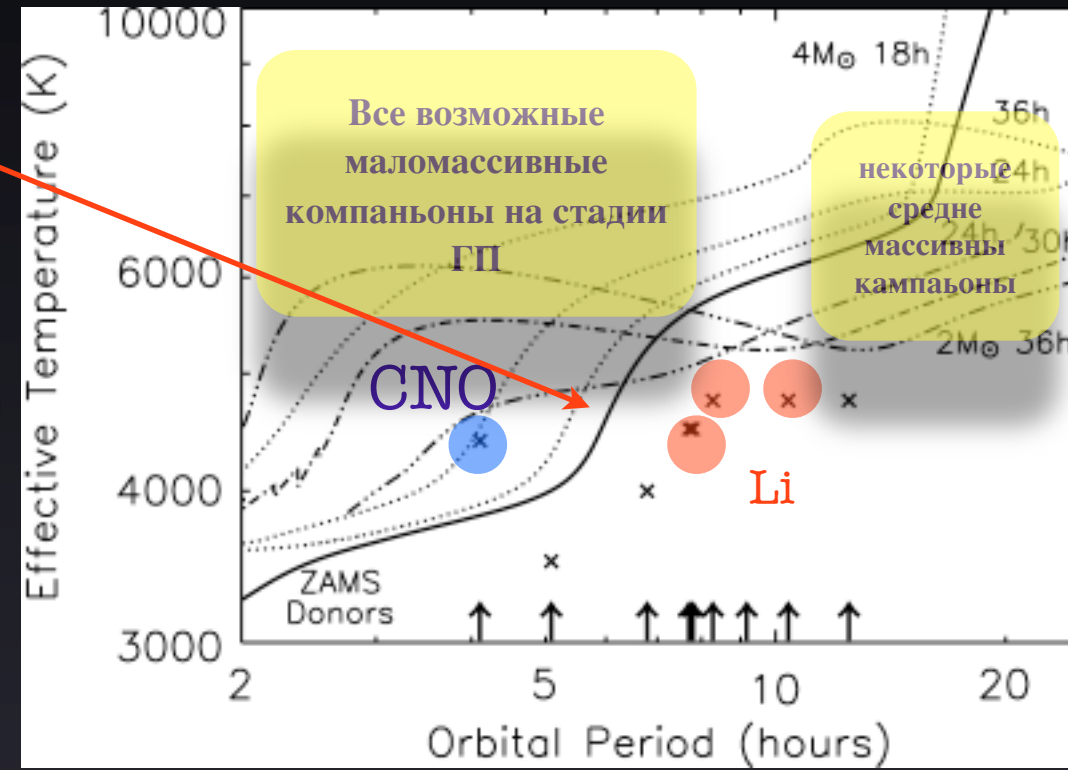
В 8 КТРД с ЧД, периоды и T_{eff} измерены

Показан верхний предел для T_{eff}

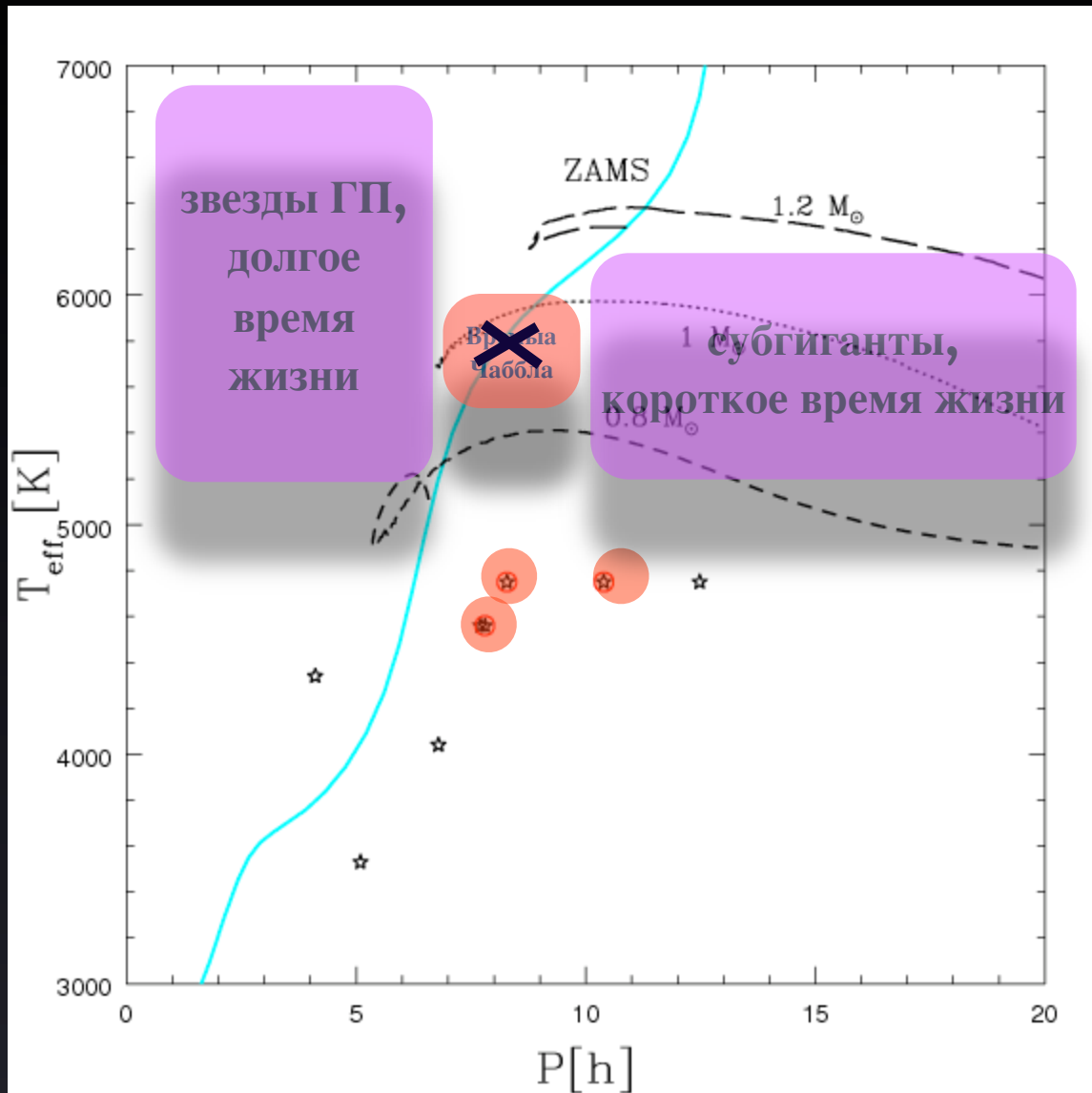
Переизлучение: не работает

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)



Наблюдения и эволюционные треки: ГП и после

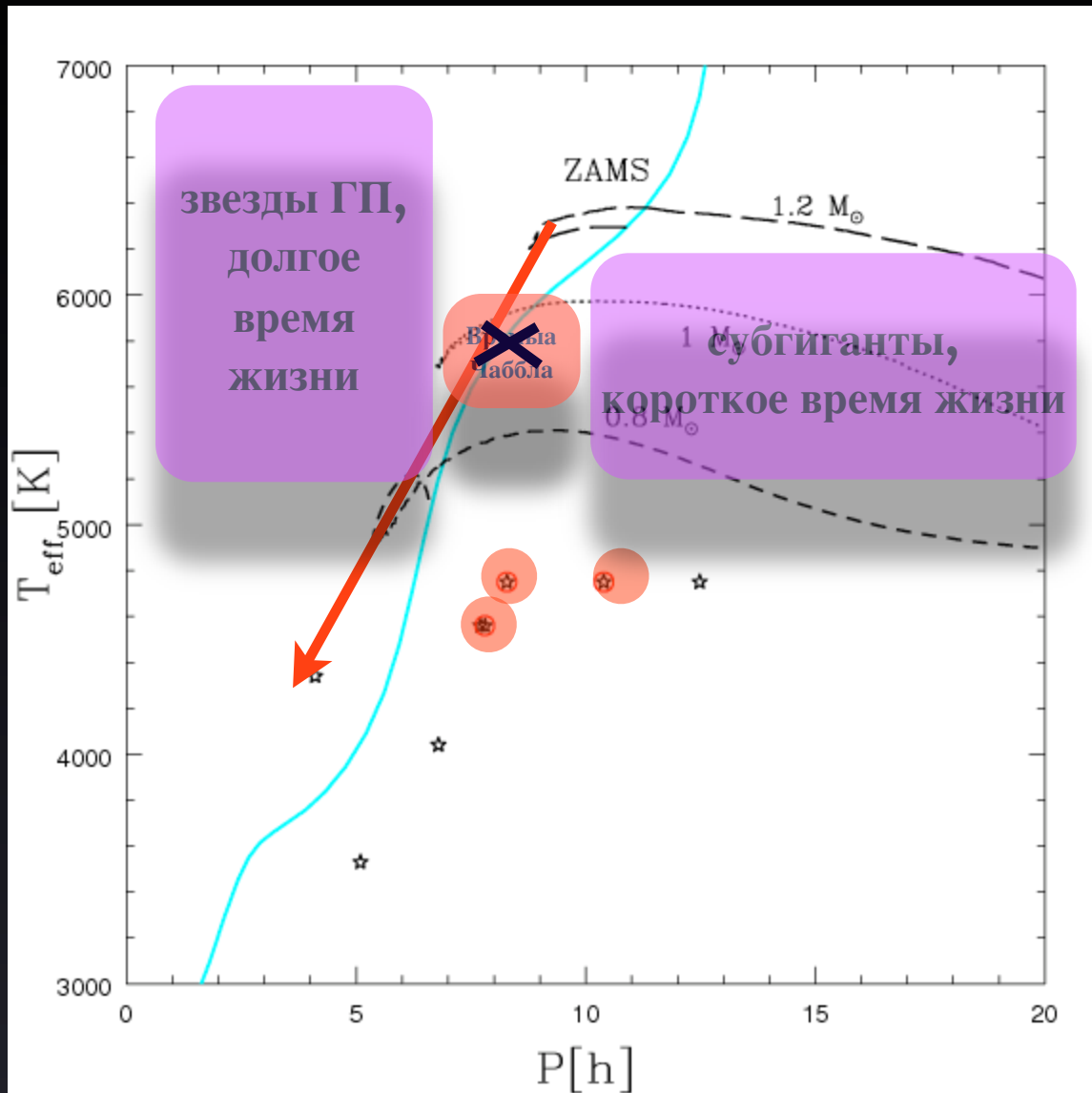


Время жизни на ГП звезды $0.8 M_{\odot}$ ($Z=0.02=Z_{\odot}$) около 2 времен Хаббла!

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

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

Наблюдения и эволюционные треки: ГП и после

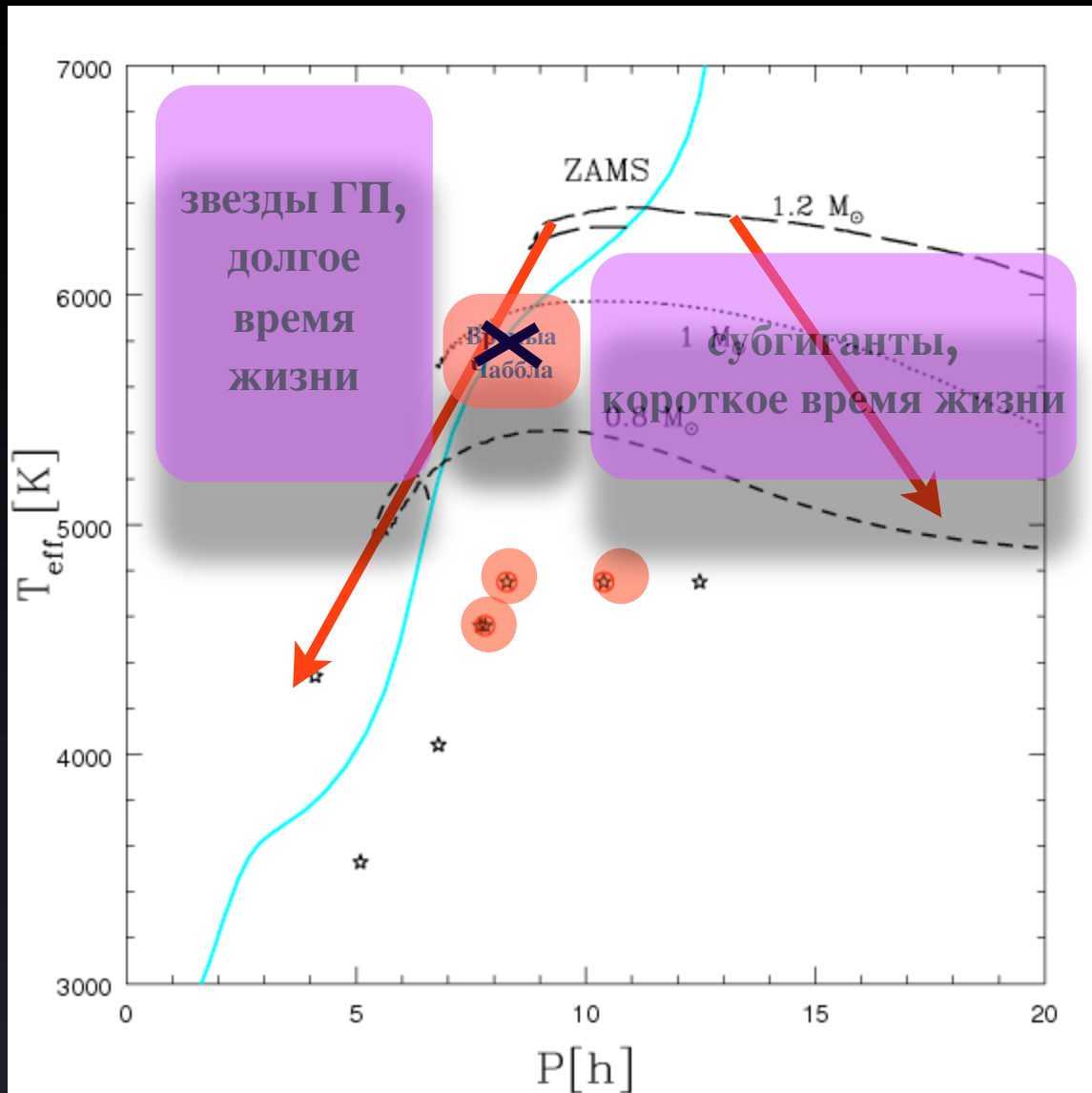


Время жизни на ГП звезды $0.8 M_{\odot}$ ($Z=0.02=Z_{\odot}$) около 2 времен Хаббла!

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

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

Наблюдения и эволюционные треки: ГП и после

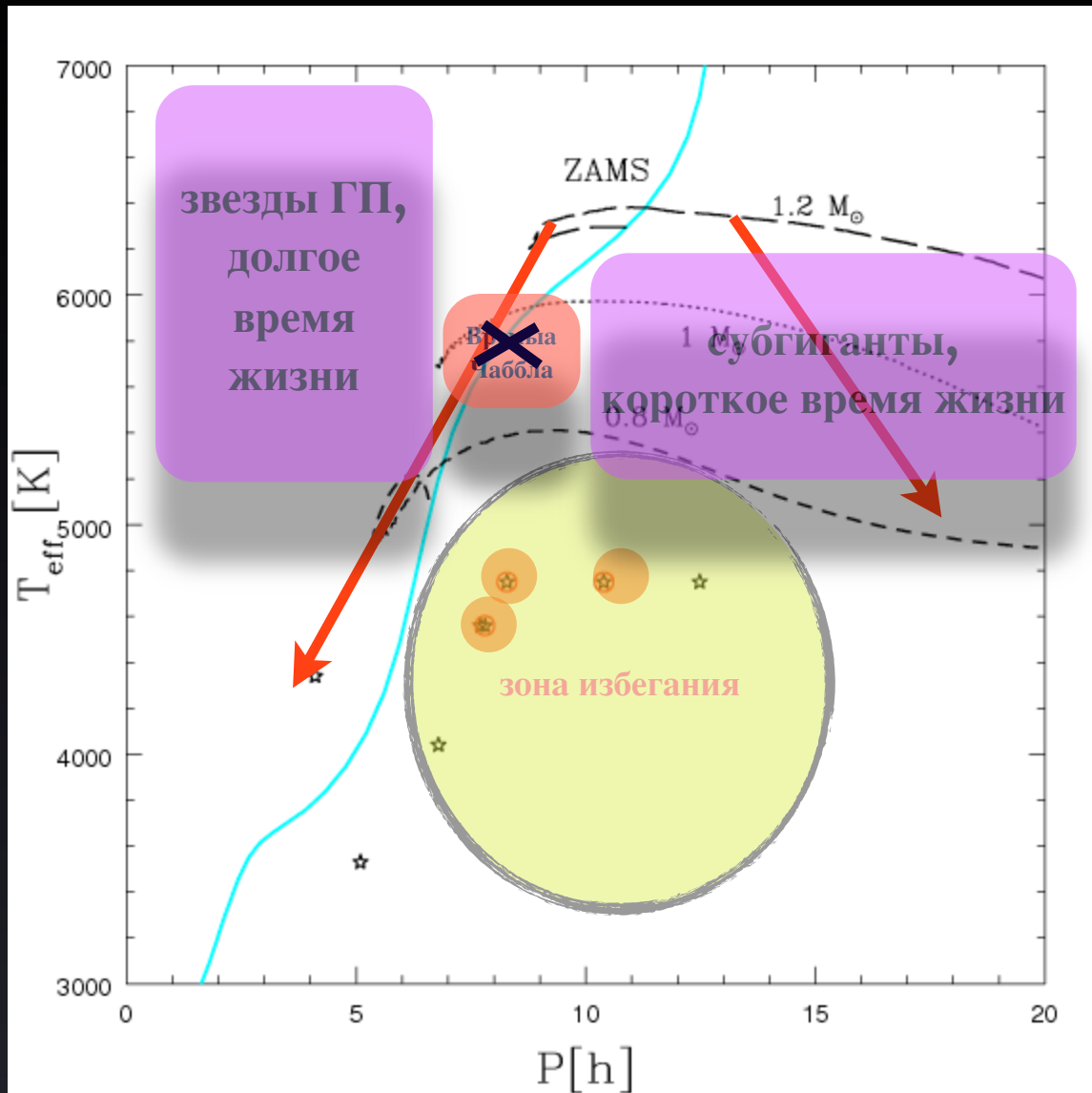


Время жизни на ГП звезды $0.8 M_{\odot}$ ($Z=0.02=Z_{\odot}$) около 2 времен Хаббла!

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

Для $Z=0.001$, НГП сдвигается вверх 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 вверх 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!

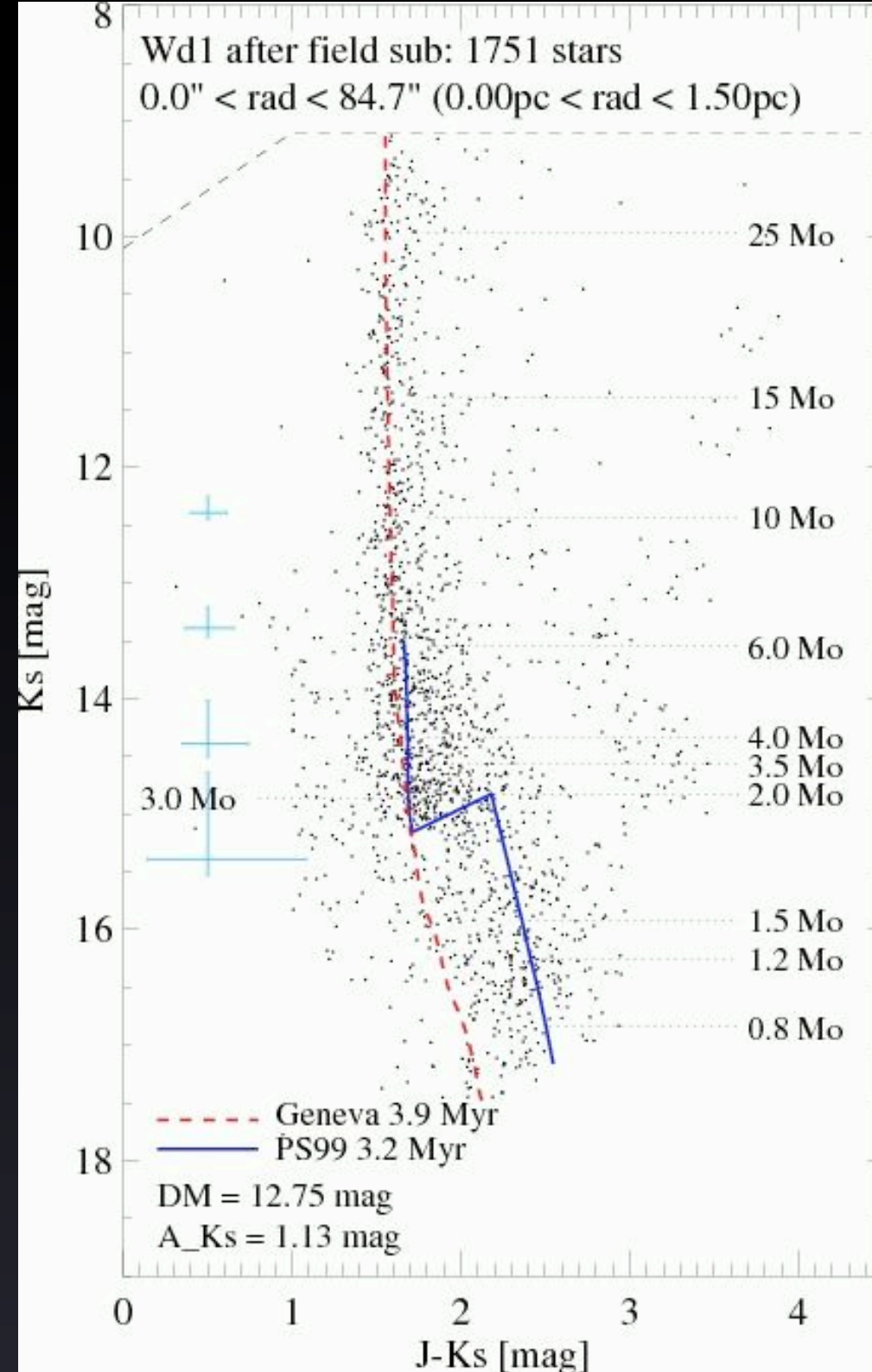
Наблюдения: Westerlund 1



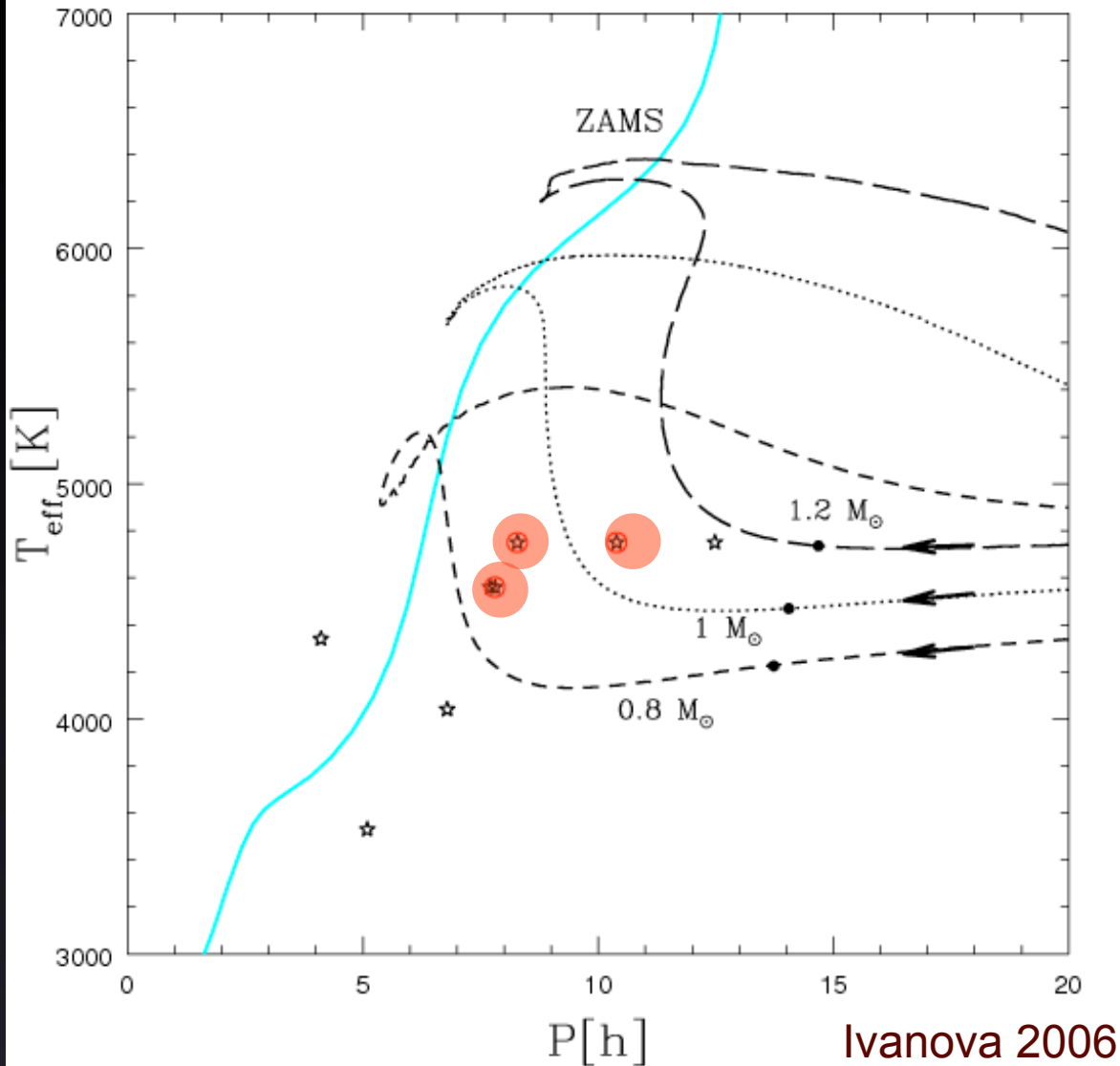
Наиболее массивное молодое скопление
в нашей галактике

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 ?!

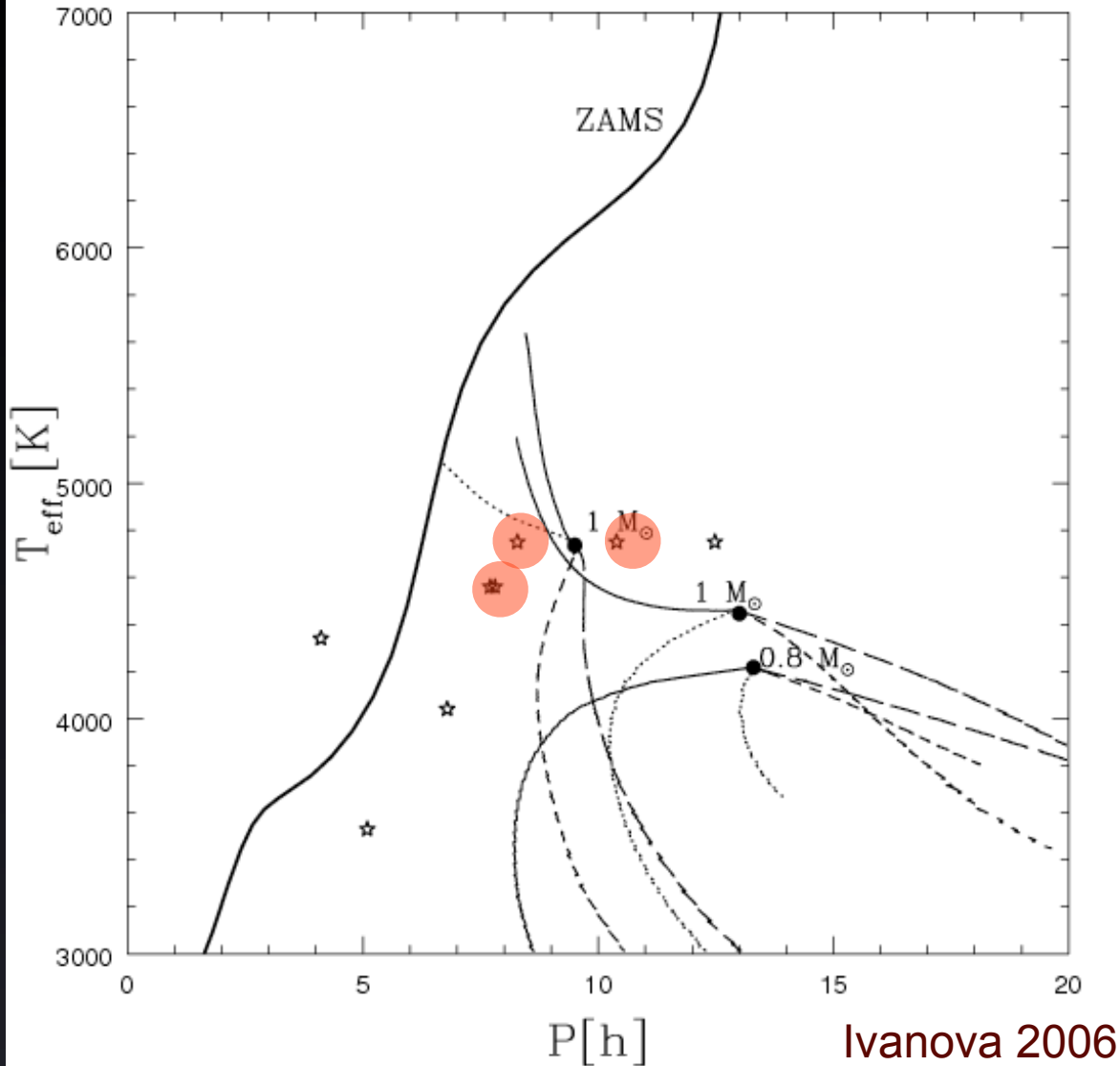


До ГП все звезды быстро сжимаются!

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,

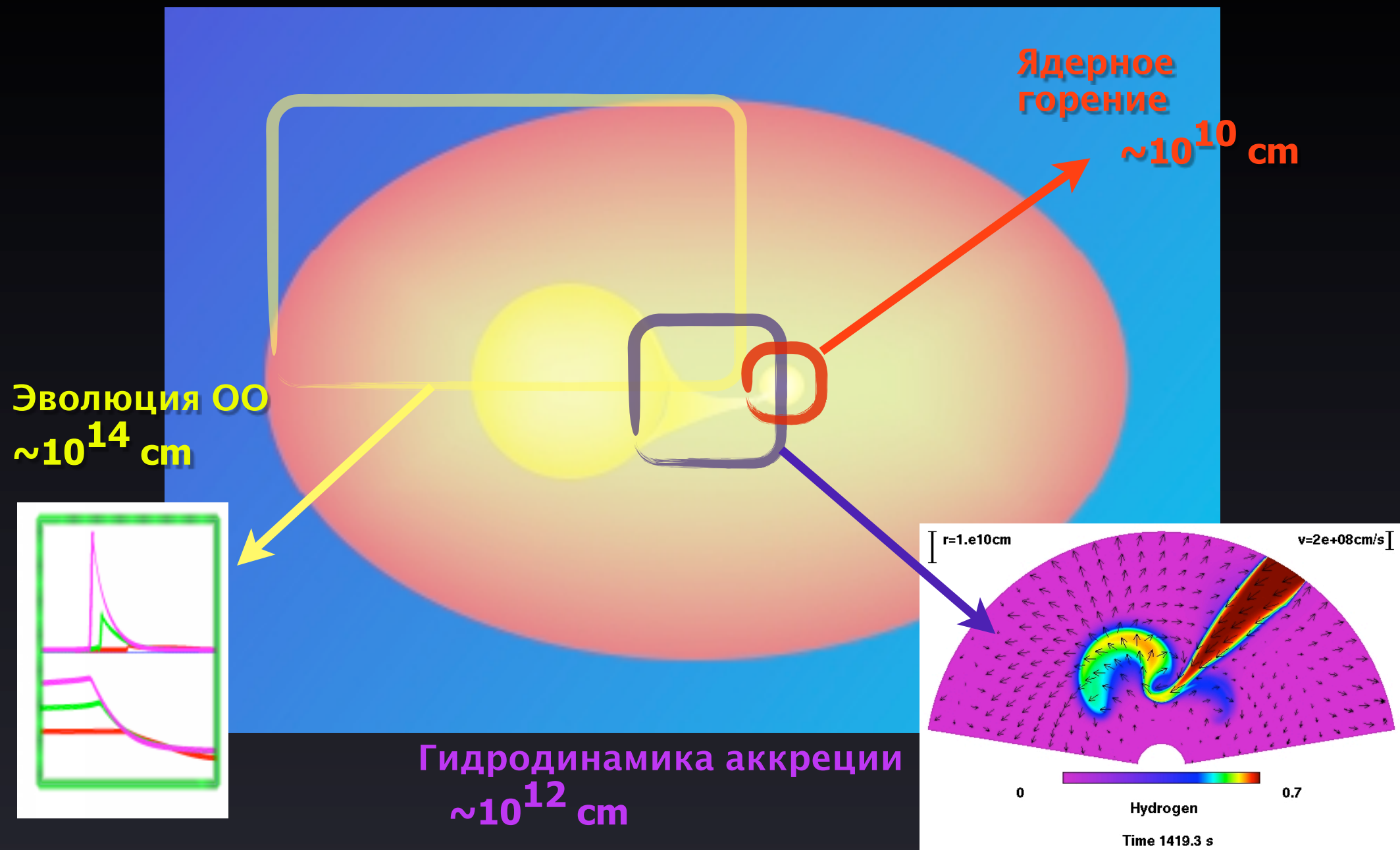
TW Hyd:

2.5 kG, возраст 2×10^7 лет

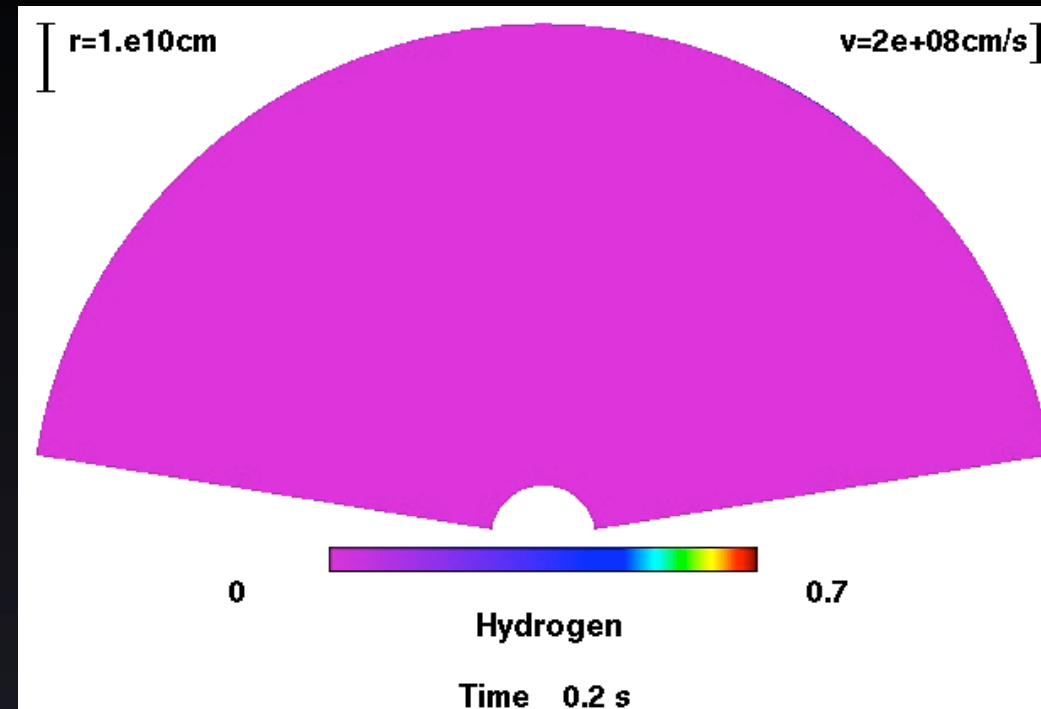
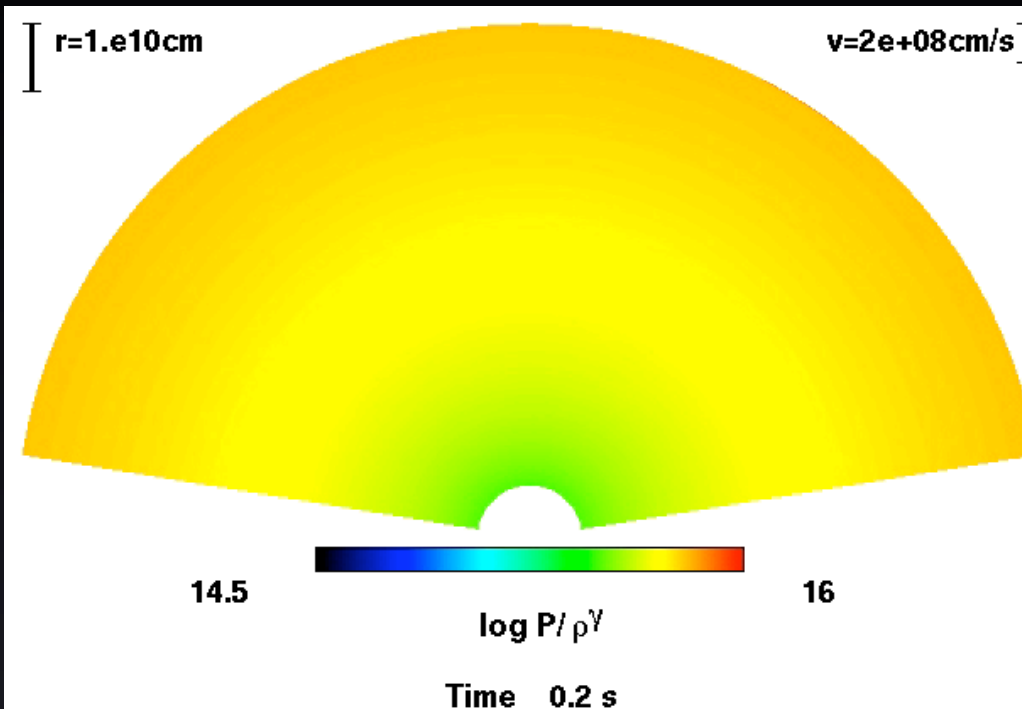
Показаны треки для звезд с разным
МП

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

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



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



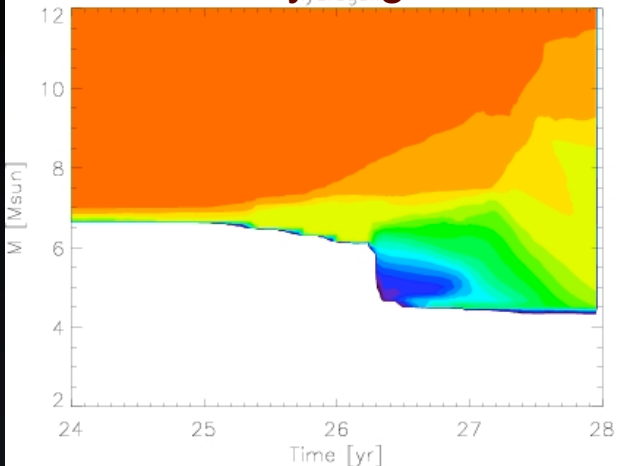
Ivanova 2002

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

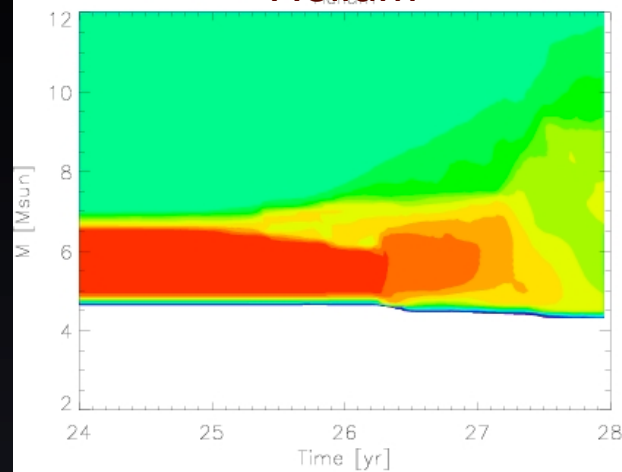
Было найдено, что один из возможных результатов ведет к взрыву водорода внутри He слоевого источника:

общая оболочка сносится за счет ядерного взрыва!

Hydrogen

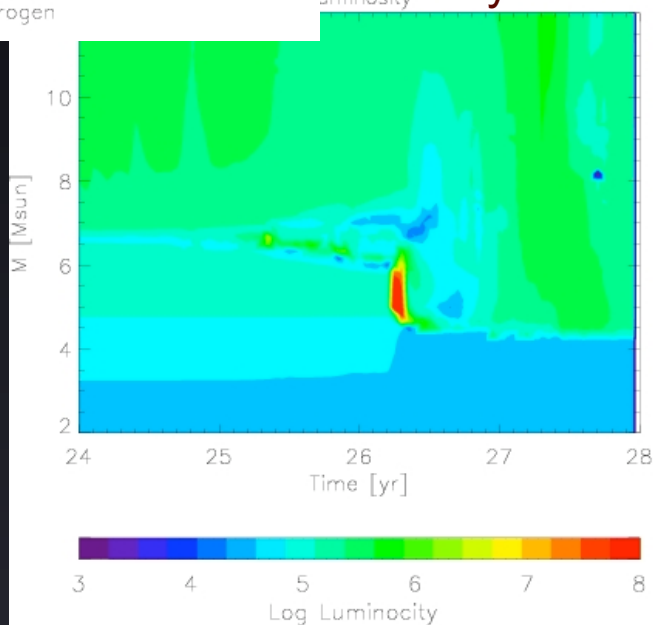


Helium

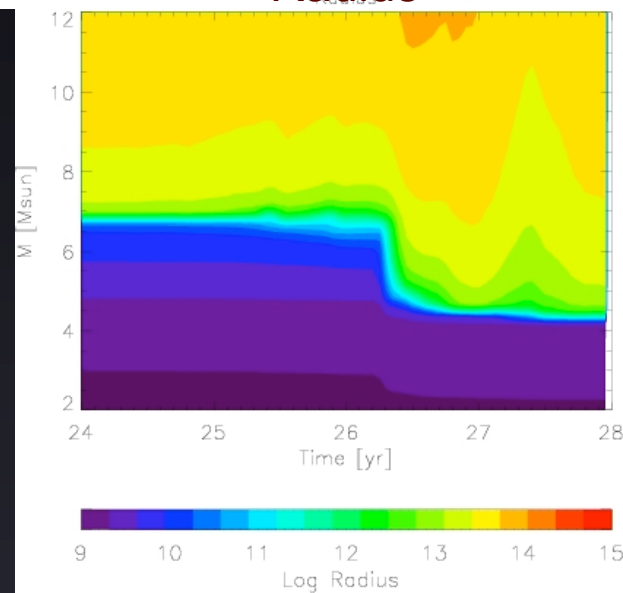


Ivanova 2002

Luminosity



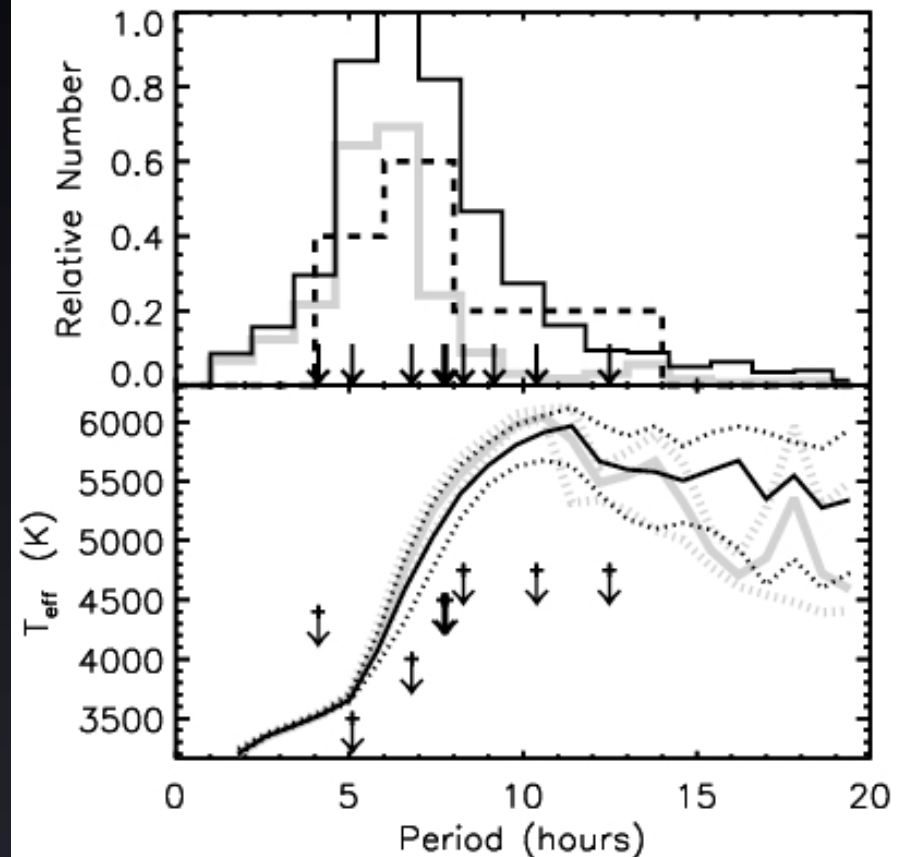
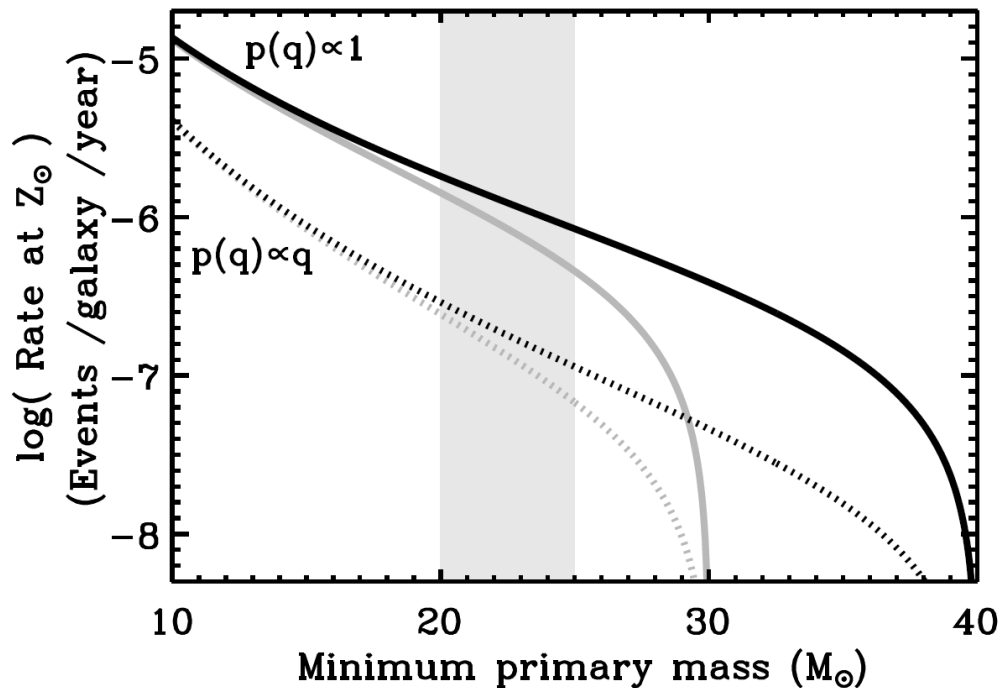
Radius



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 Ia и длинными гамма-всплесками - и H, и He 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)

- $L_X \sim 4 \times 10^{39} \text{ ergs s}^{-1}$
- сильная переменность
- сильные, широкие (2000 km/s) эмиссионные линии O III
- low $H\alpha/[O \text{ III}]$ 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



М87:
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 $\Rightarrow 2.0^{+1.5}_{-1.0} \times 10^{-9}$ per M_\odot
- Humphrey&Buote 2008: 2 в 3782 $\Rightarrow 7^{+15}_{-6} \times 10^{-10}$ per M_\odot
- Sivakoff 2010: 7 в 6776 GCs $\Rightarrow 2.2^{+1.9}_{-1.2} \times 10^{-9}$ 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 $150\text{--}200M_{\odot}$ текущей звездной массы соответствуют как минимум одной ЧД, сформированной в прошлом
- Половина сформированных ЧД имеет массу $> 10M_{\odot}$
- Вследствие кика (толчка) во время взрыва, только 30-40% останется в ШС со скоростью убегания 50 км/с (Belczynski et al. 2006)

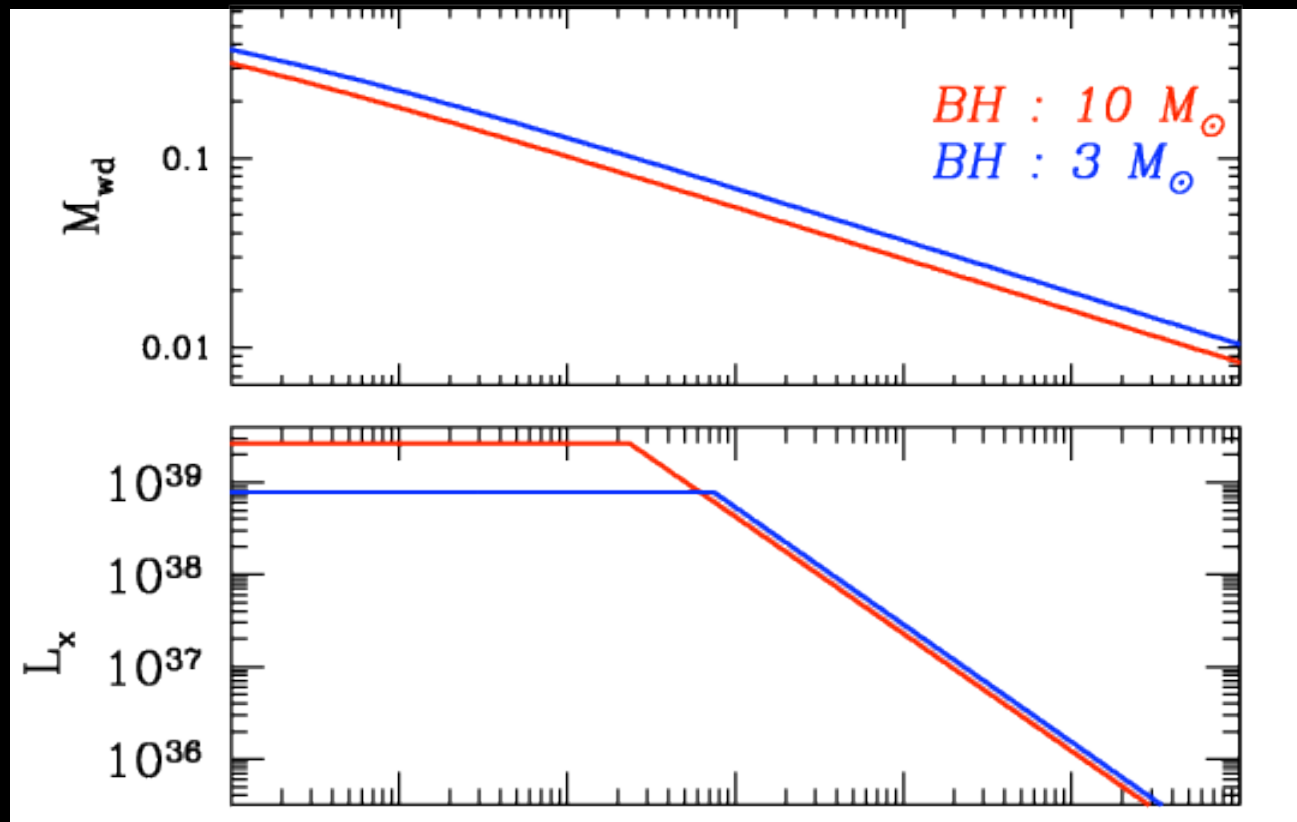
Звездная динамика:

Спитцеровская неустойчивость + 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)

НЧФ



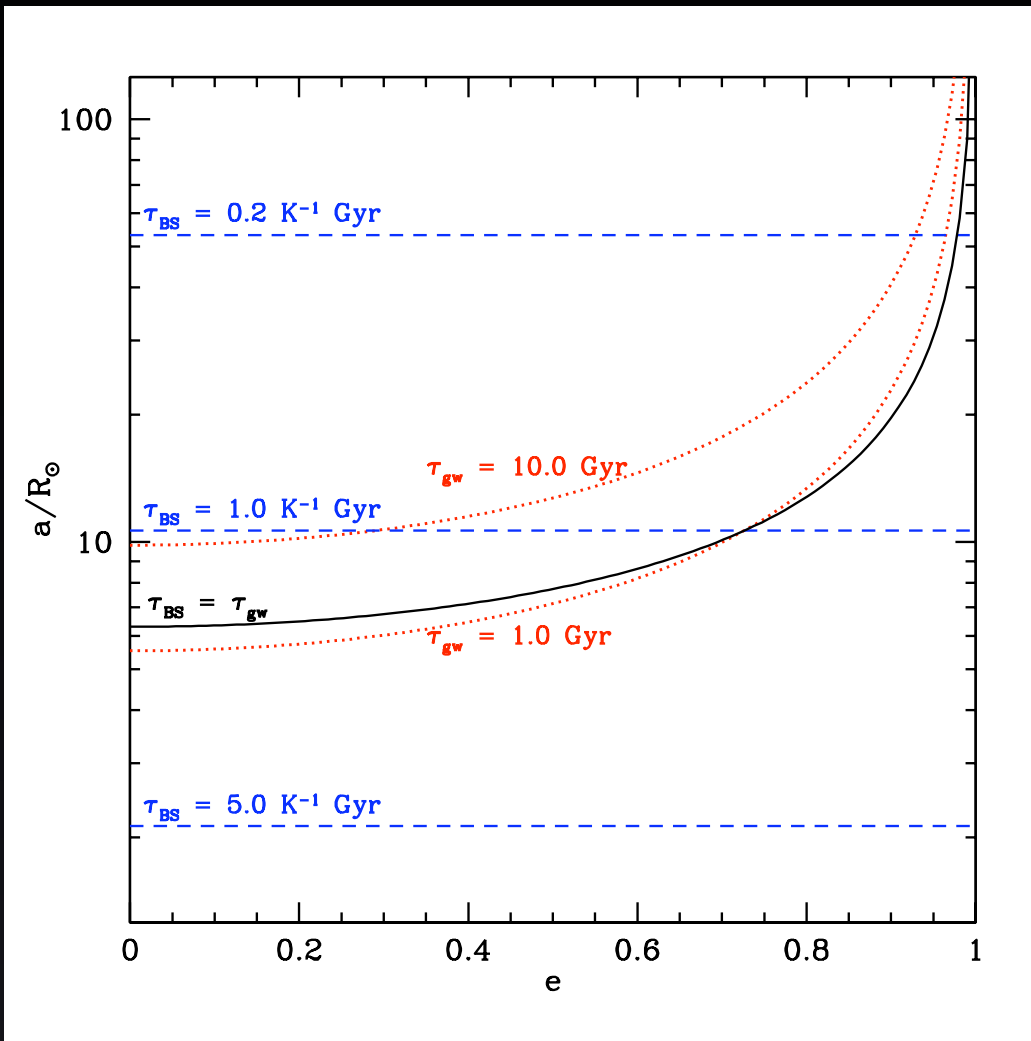
Время жизни рентгеновского источника:

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

$$\mathcal{R} = \tau / N$$

- 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



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

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

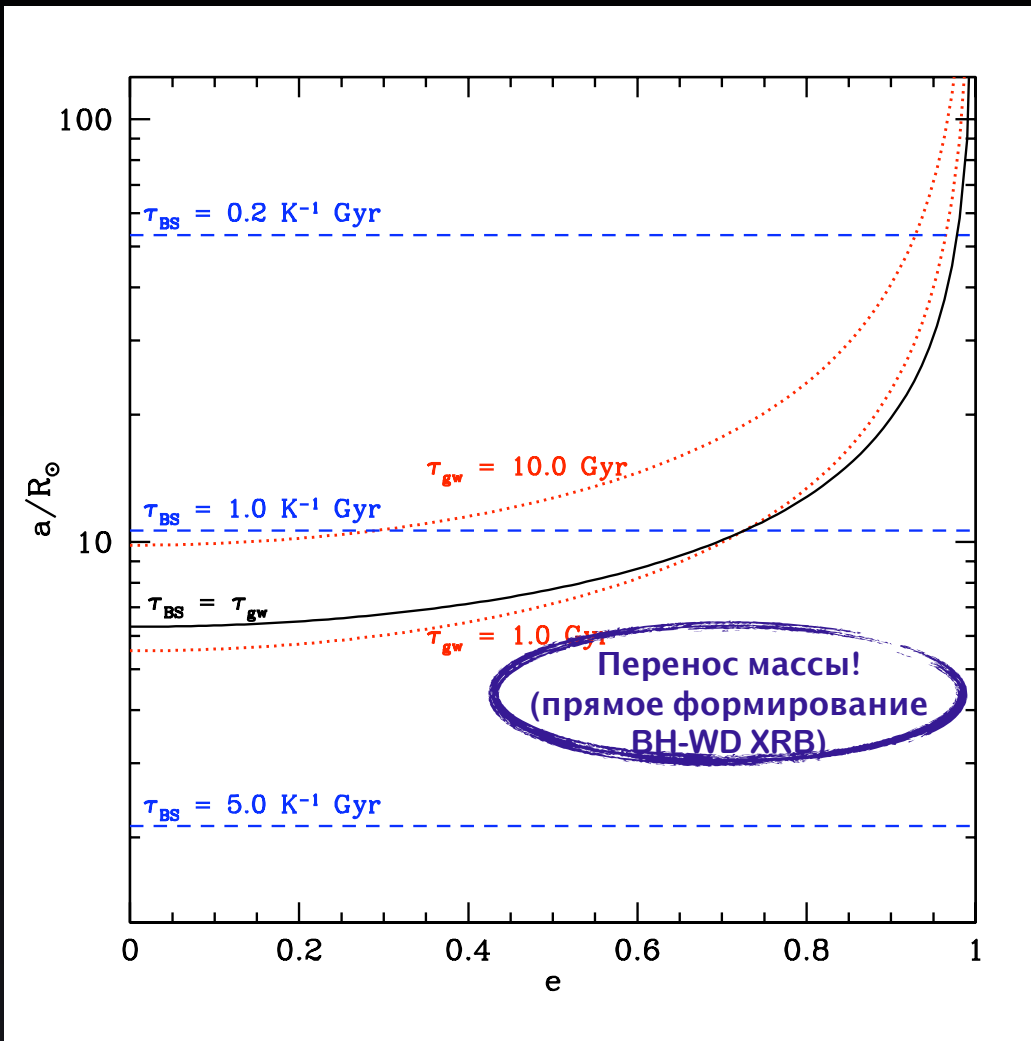
Initial a/R_{\odot} and e of a $15+0.6 M_{\odot}$ BH-WD binary.

τ_{gw} – constant gravitational merger time

τ_{BS} – encounter time

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

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

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

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 $\tau_{\text{gw}} = \tau_{\text{BS}}$

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:

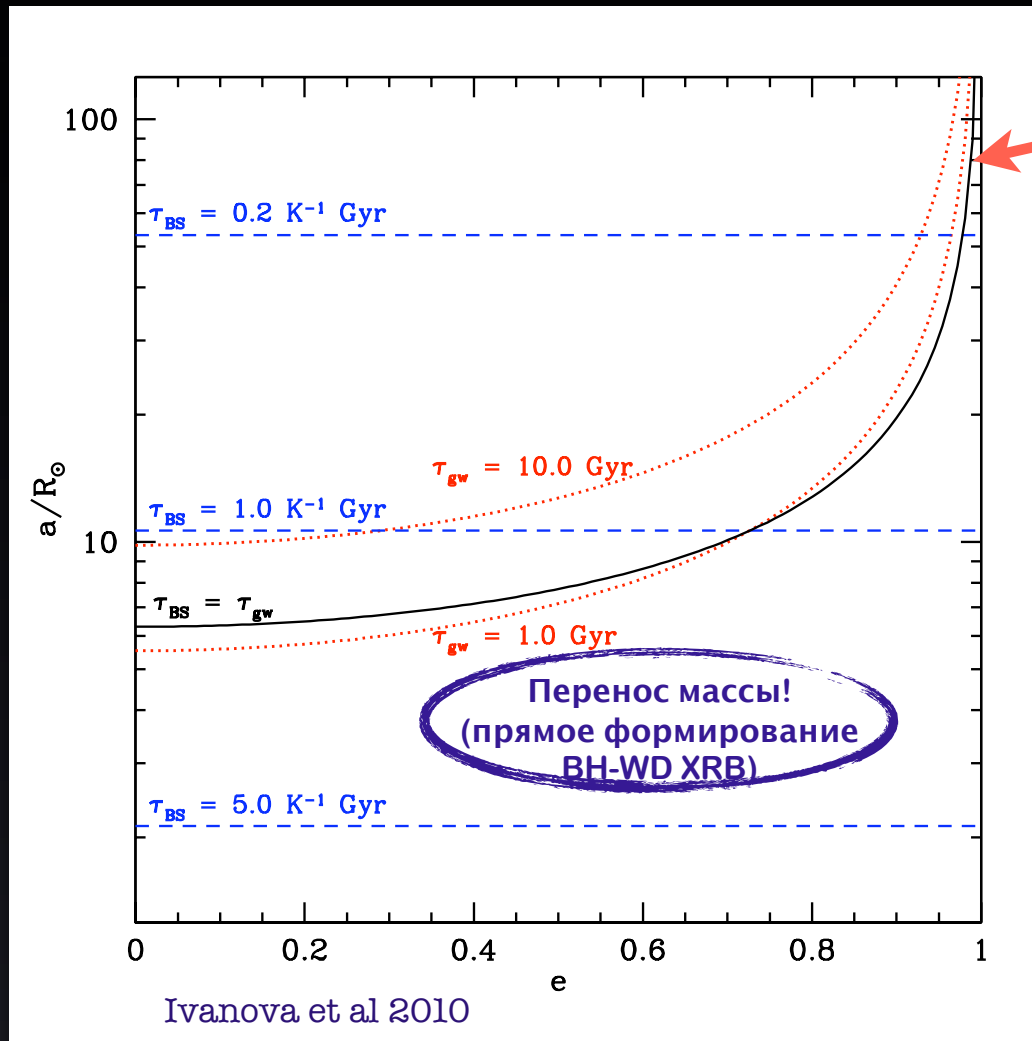
- БК составляют около 20% всех звезд в ядре ШС \rightarrow частота сильных взаимодействий в 5 раз меньше чем с ГП
- физические столкновения с БК возможны только в двойных с $a \leq 0.1 R_{\odot}$
Для двойных с $5 R_{\odot} \leq a \leq 15 R_{\odot}$ более вероятны смена партнера либо сохранение

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



$a \approx 80 R_{\odot} @$
 $e=0.99$

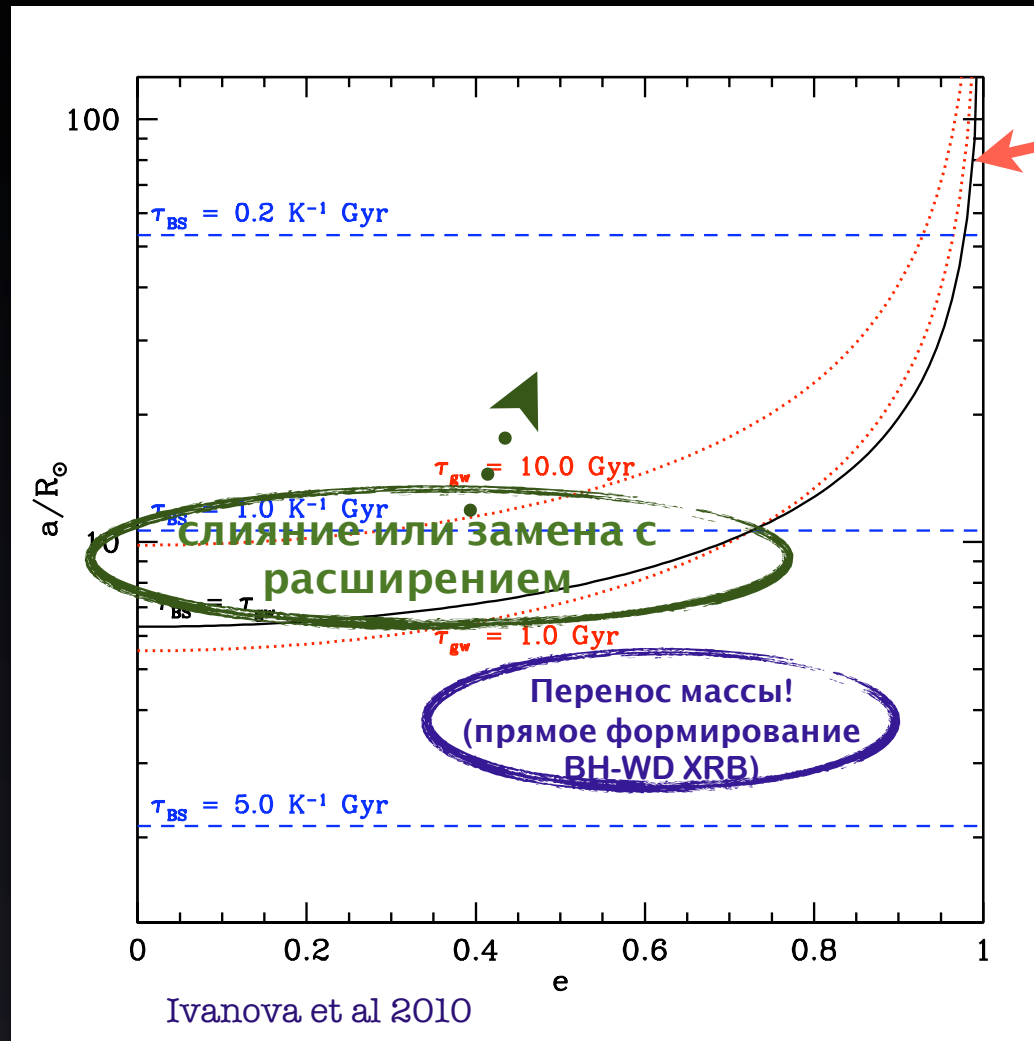
Initial a/R_{\odot} and e of a $15+0.6 M_{\odot}$ BH-WD binary.

τ_{gw} – constant gravitational merger time

τ_{BS} – encounter time

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

Шкалы времени и сценарии



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

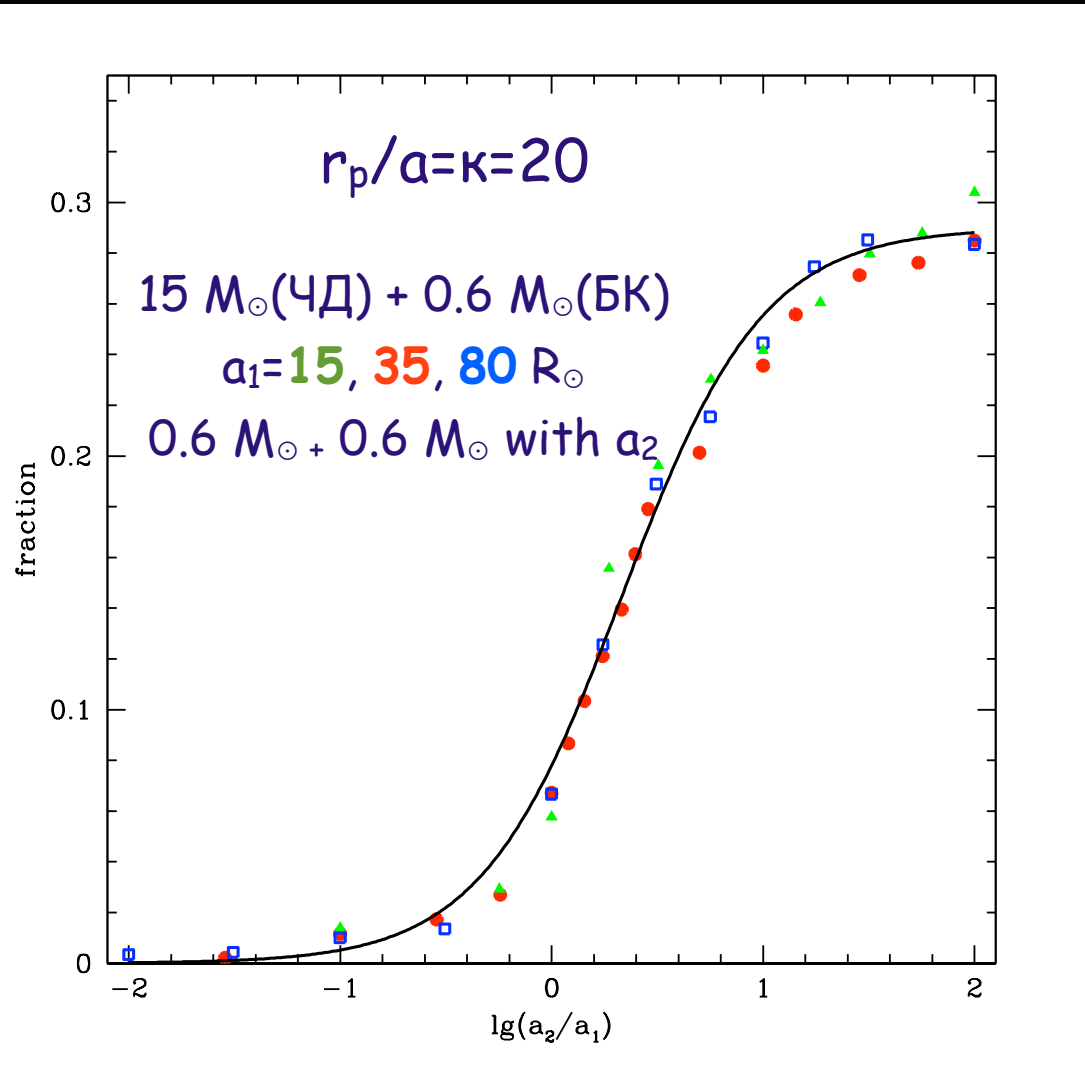
τ_{gw} – constant gravitational merger time

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
результатируют в формировании тройной



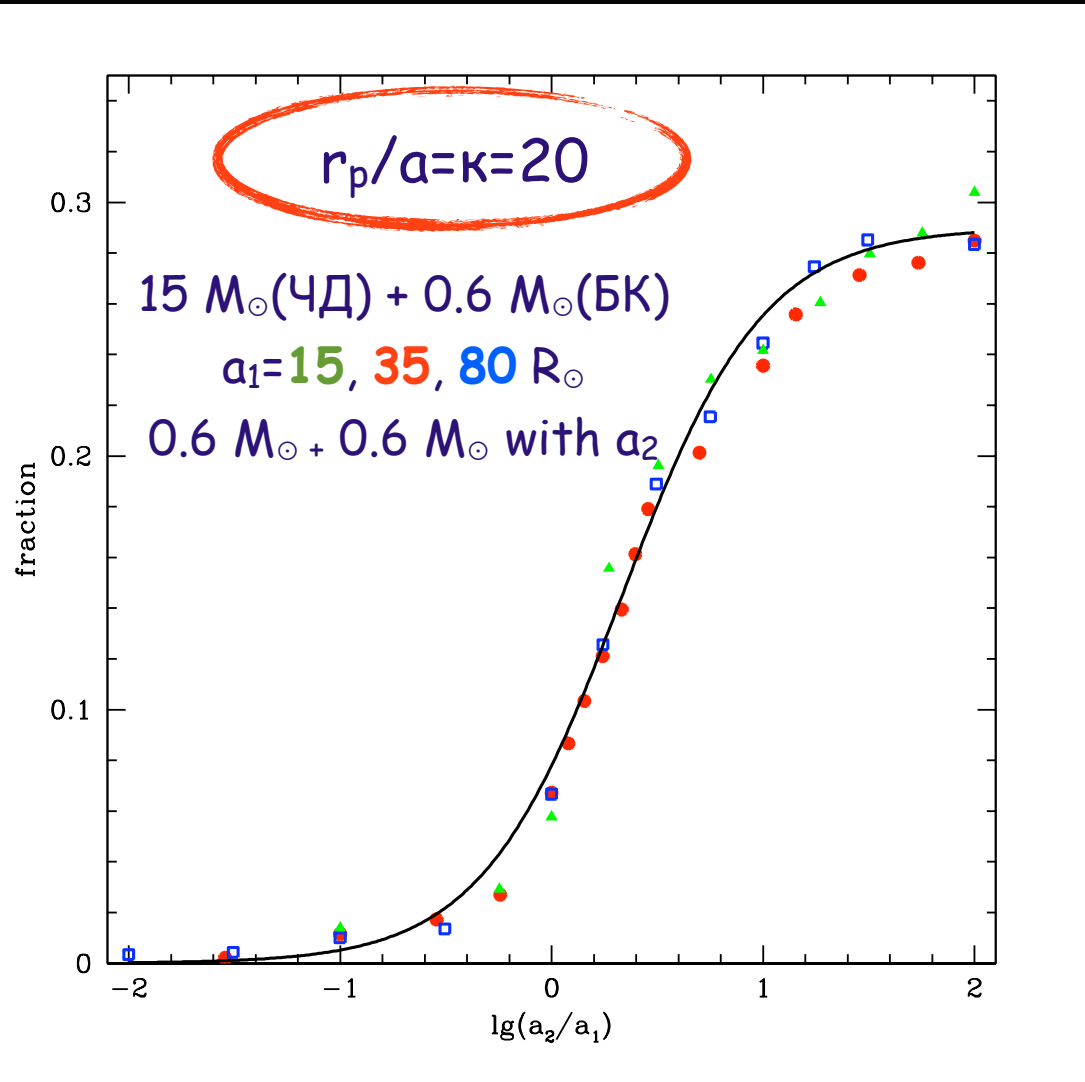
$$\frac{\Gamma_{\text{triples}}(a_1, a_2)}{\Gamma_{\text{BS}}(a_1)} \sim 3\sqrt{2}f_{\text{wb}} \left(1 + \frac{a_2}{a_1}\right).$$

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

Это превышает скорость
сильных взаимодействий
с одиночными звездами

Взаимодействия с двойными: формирование иерархически-стабильных тройных

Доля столкновений между двойными которые
результатируют 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 млрд 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)

- $a \lesssim 80 R_{\odot}$
- доля 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} .

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

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

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 | 0.4 | 0.04 | 0.004 | 0 |
| | 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] | | | | | | | |
| | 0.4 | 0.04 | 0.004 | 0 | 0.4 | 0.04 | 0.004 | 0 |
| | Corresponding $f_{\text{BH},0.1}$ | | | | | | | |
| | 10 | 1 | 0.1 | 0 | 10 | 1 | 0.1 | 0 |

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

| 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 |

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:

$$\Phi_{c1} \approx 2 \times 10^{-3} \text{ на ЧД за млрд лет}$$

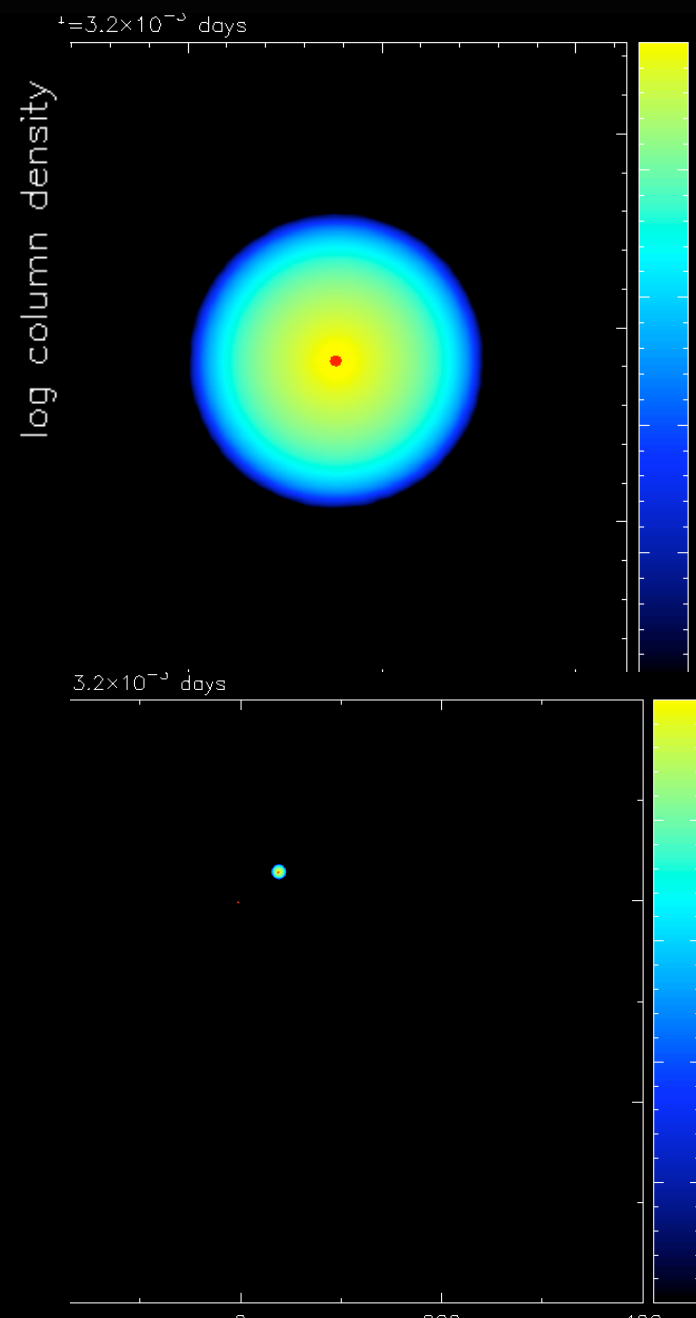
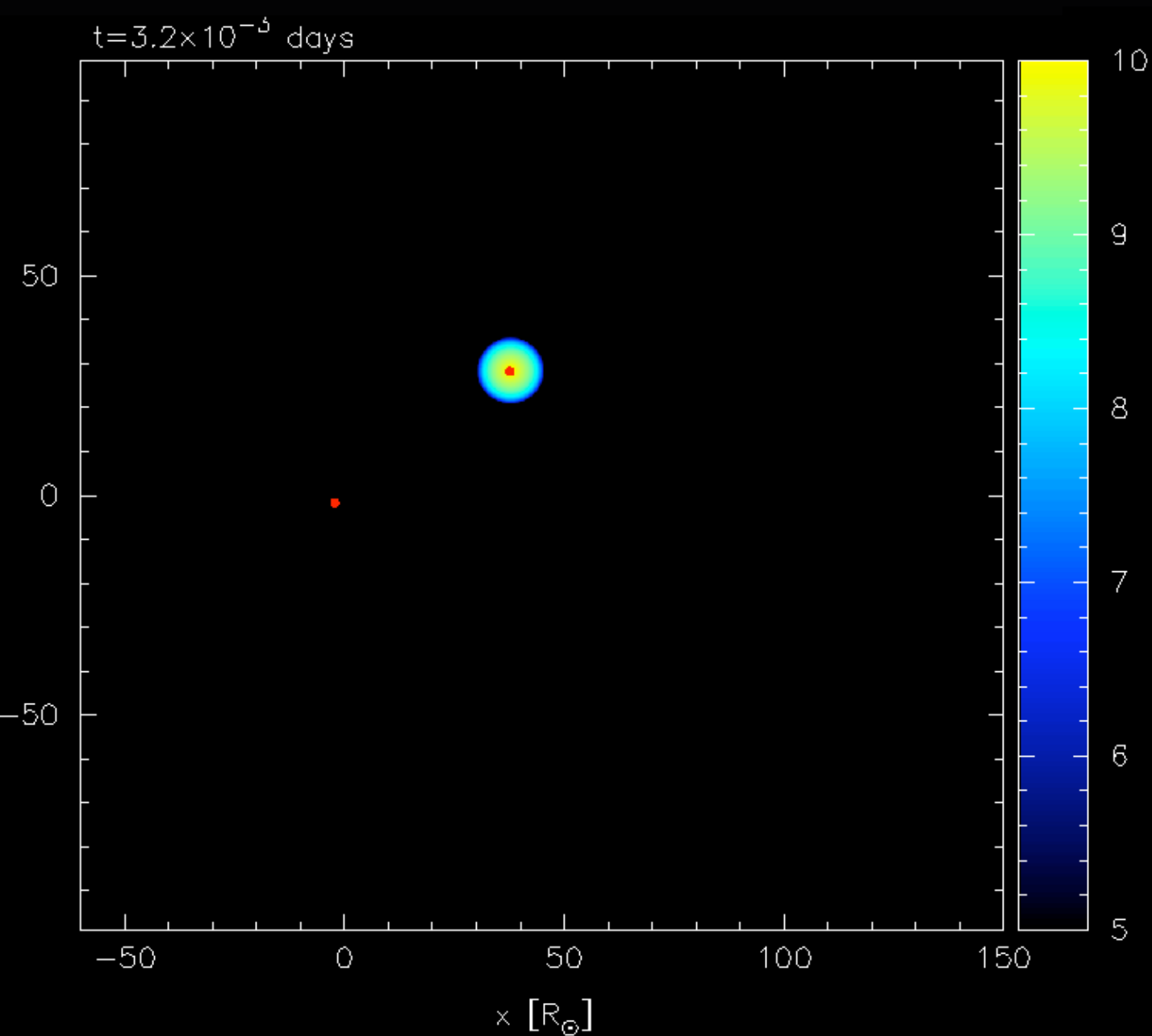
- Для создания ЧД-БК двойной с $a_{\text{post}} \sim 80-1000R_{\odot}$ срабатывают столкновения с двойными как БК-БК так и ГП-БК:

$$\Phi_{c2} \approx 0.06 f_{\text{hard}} \approx 2 \times 10^{-3} \text{ на ЧД за млрд лет}$$

- В случае оптимистичного сценария (ТИМТ работает во всех двойных с $a_{\text{post}} < 80 R_{\odot}$)

$$\Phi_{c1} \approx 6 \times 10^{-3} \text{ и } \Phi_{c2} \approx 1.5 \times 10^{-2} \text{ на ЧД за млрд лет}$$

Формирование: столкновения ЧД и КГ



Формирование: столкновения ЧД и КГ

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

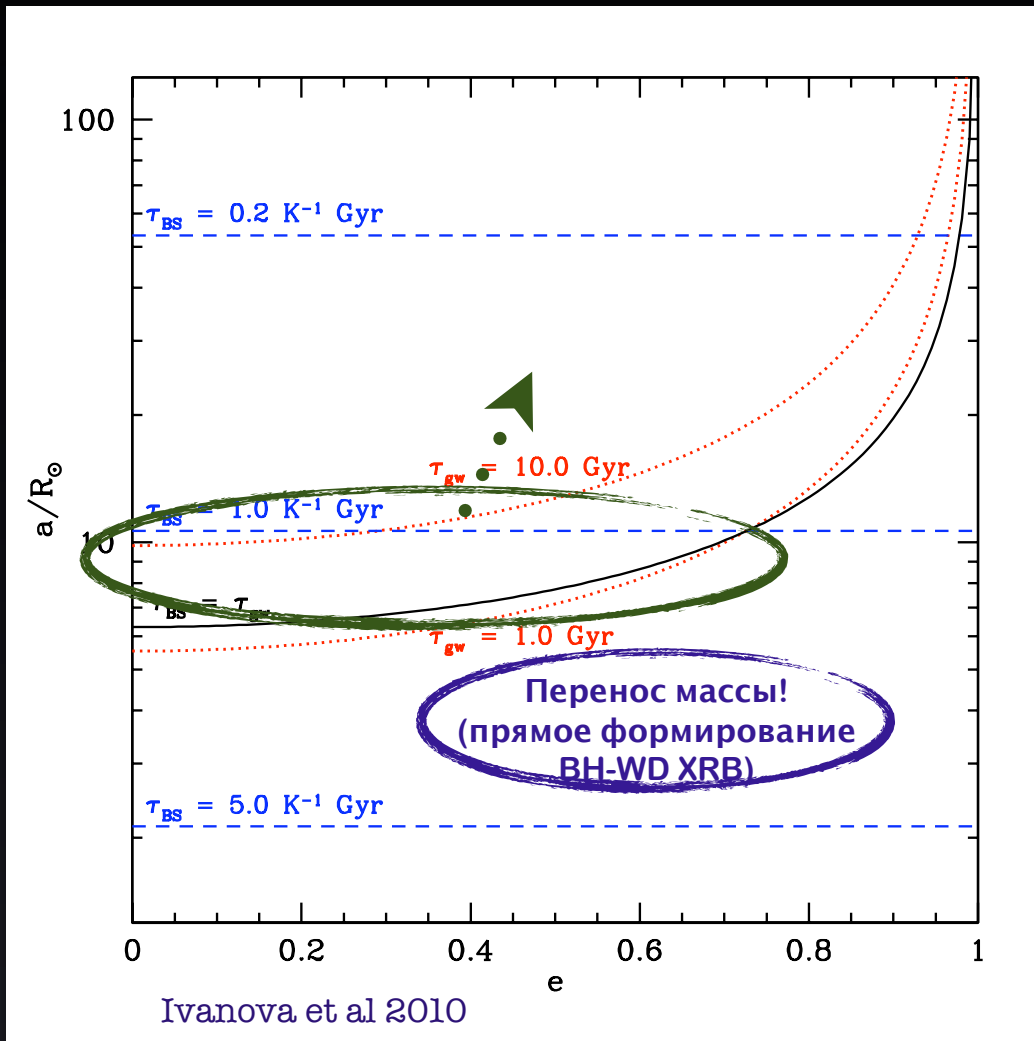
$r_p \approx R_{\text{RG}}$ граница между теми столкновениями, которые ведут к формированию двойной которая станет рентгеновским источником в изоляции и теми, которые нет

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



- Консервативная оценка:

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

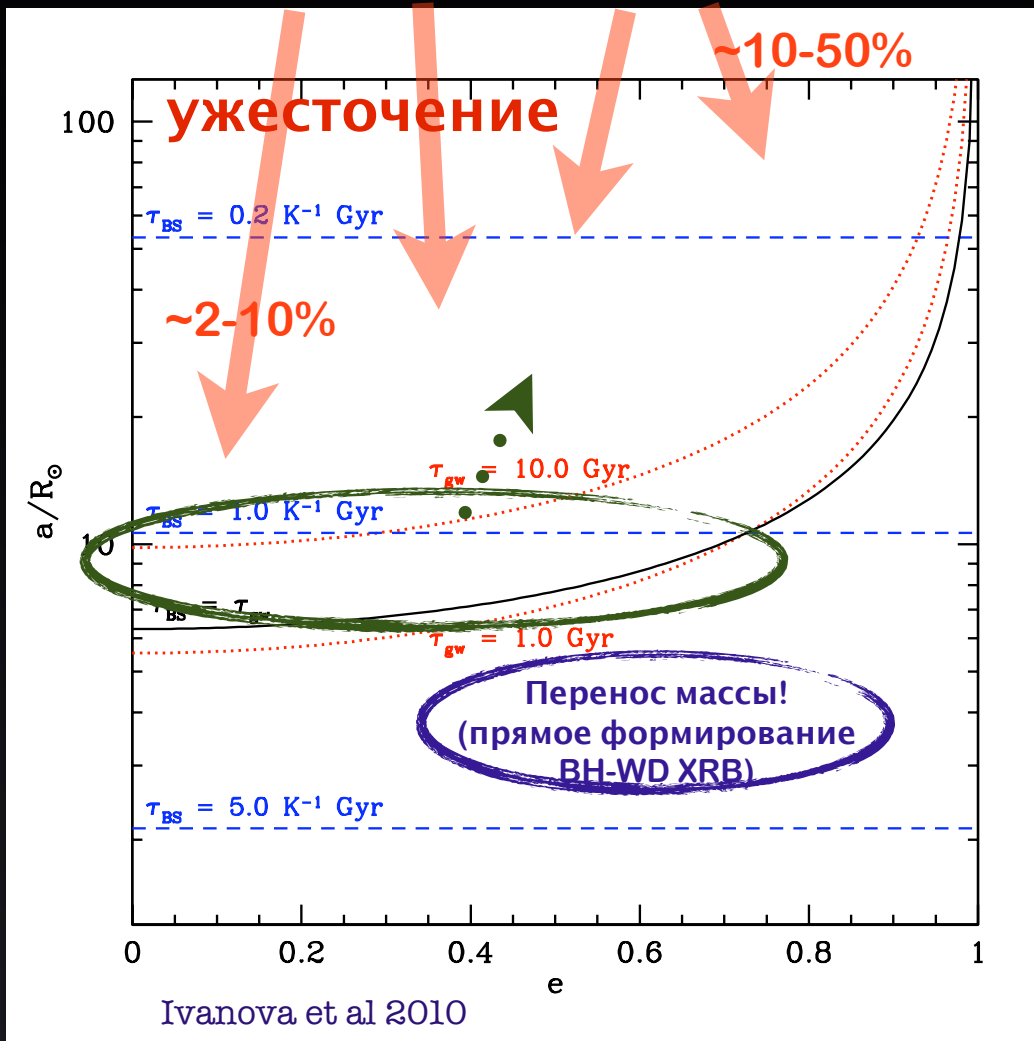
- Оптимистичная оценка

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.

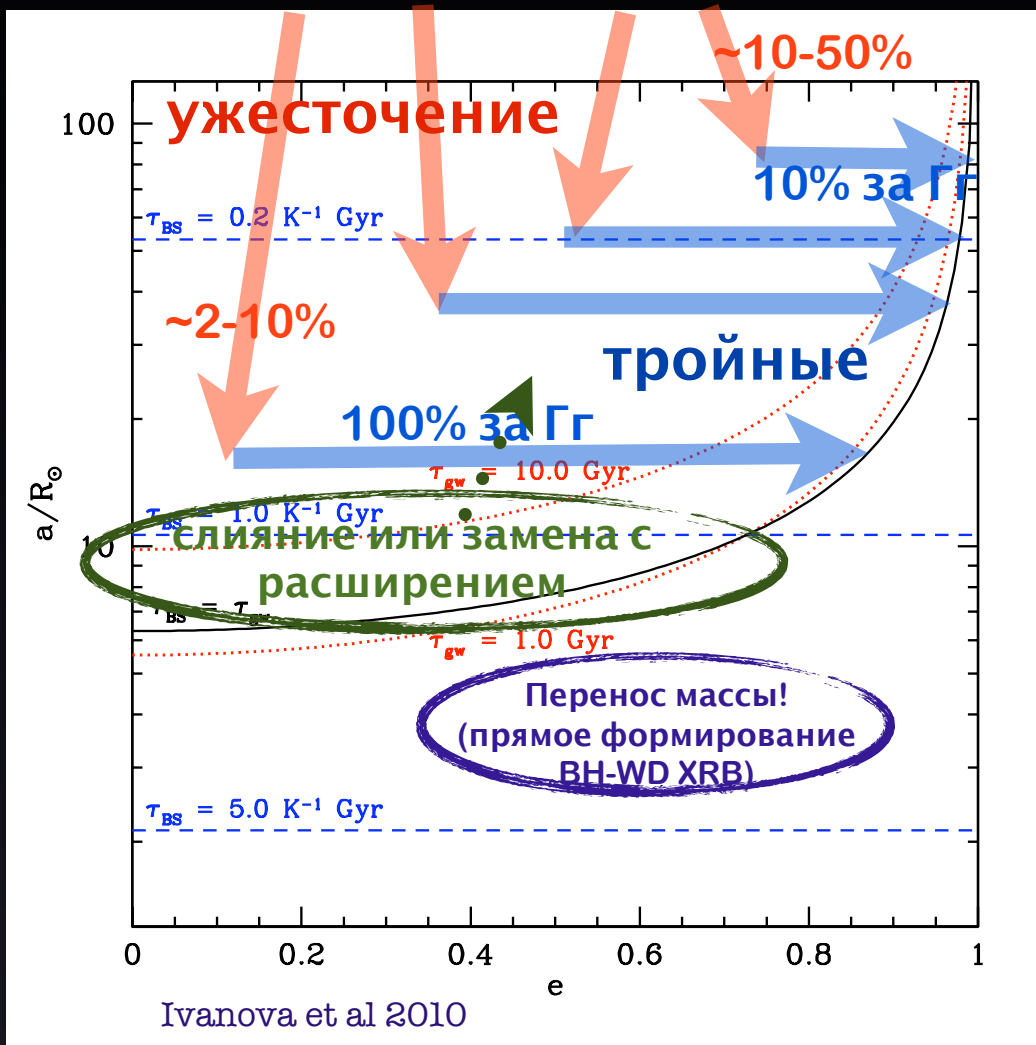
• Оптимистичная оценка

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



• 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. $f_{чд} = 0.1$ - 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.