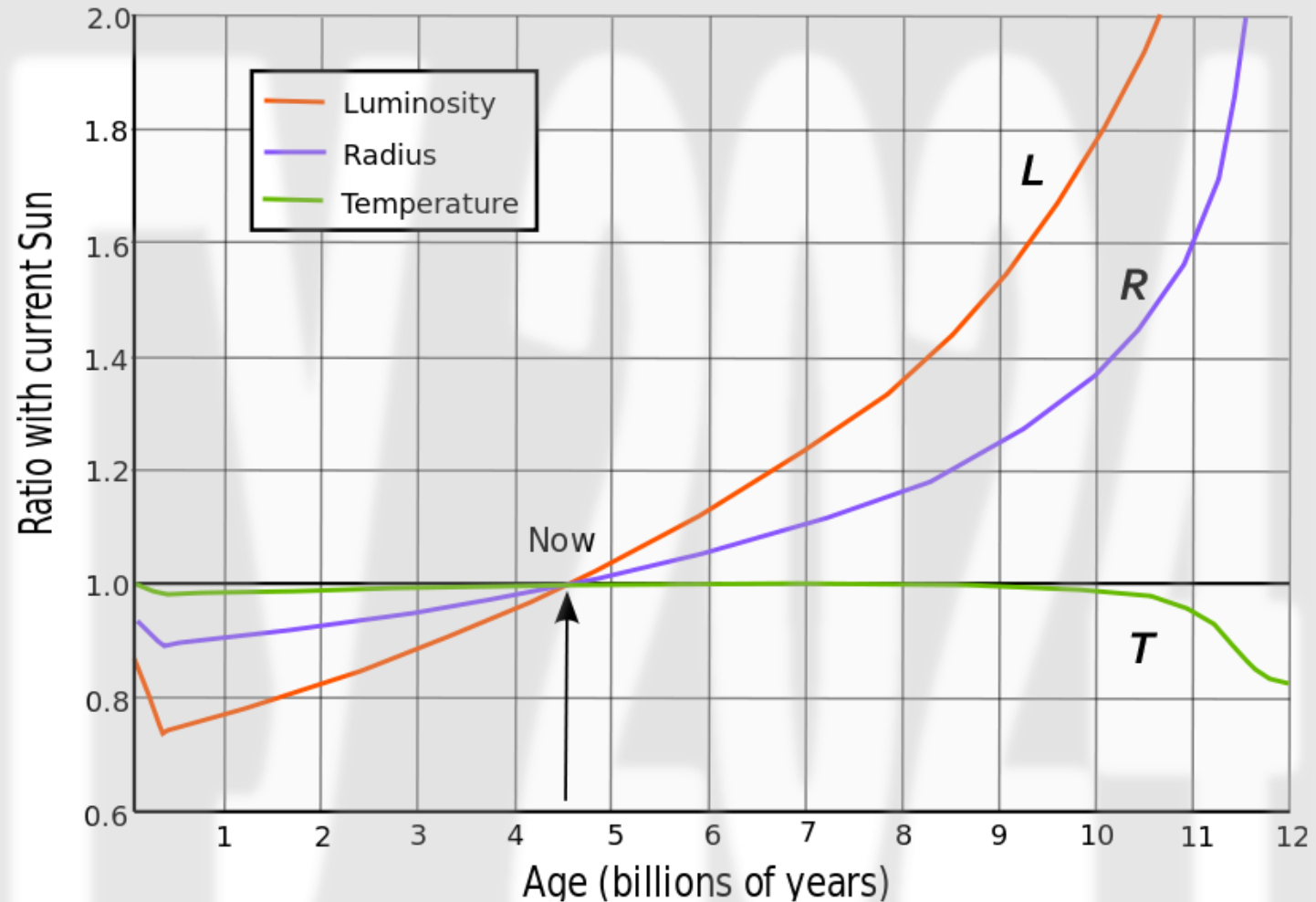


Эволюция звезд

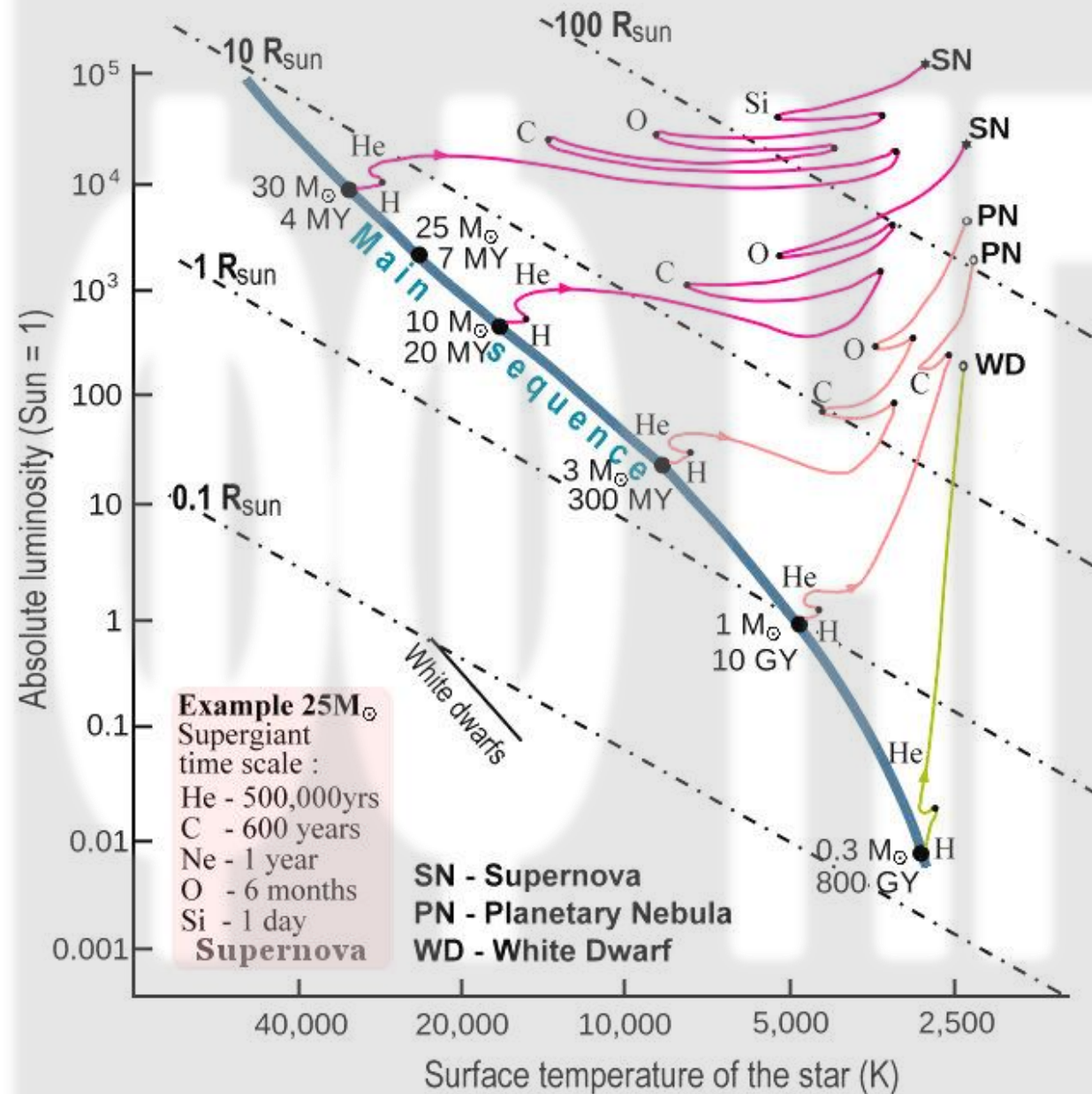
На примере Солнца мы видим, что пока звезда находится на основном этапе сжигания водорода, изменение светимости и температуры невелики – звезда находится на главной последовательности.

Наиболее драматичные изменения начинаются при исчерпании водорода в ядре звезды, теряется устойчивость. Дальнейшая судьба звезды в основном определяется ее начальной массой.



Изменение наблюдаемых параметров звезды (светимость и температура) приведет к смещению положения звезды на диаграмме Герцшпрунга – Рассела: **эволюционный трек**.

Эволюционные треки на диаграмме Г – Р



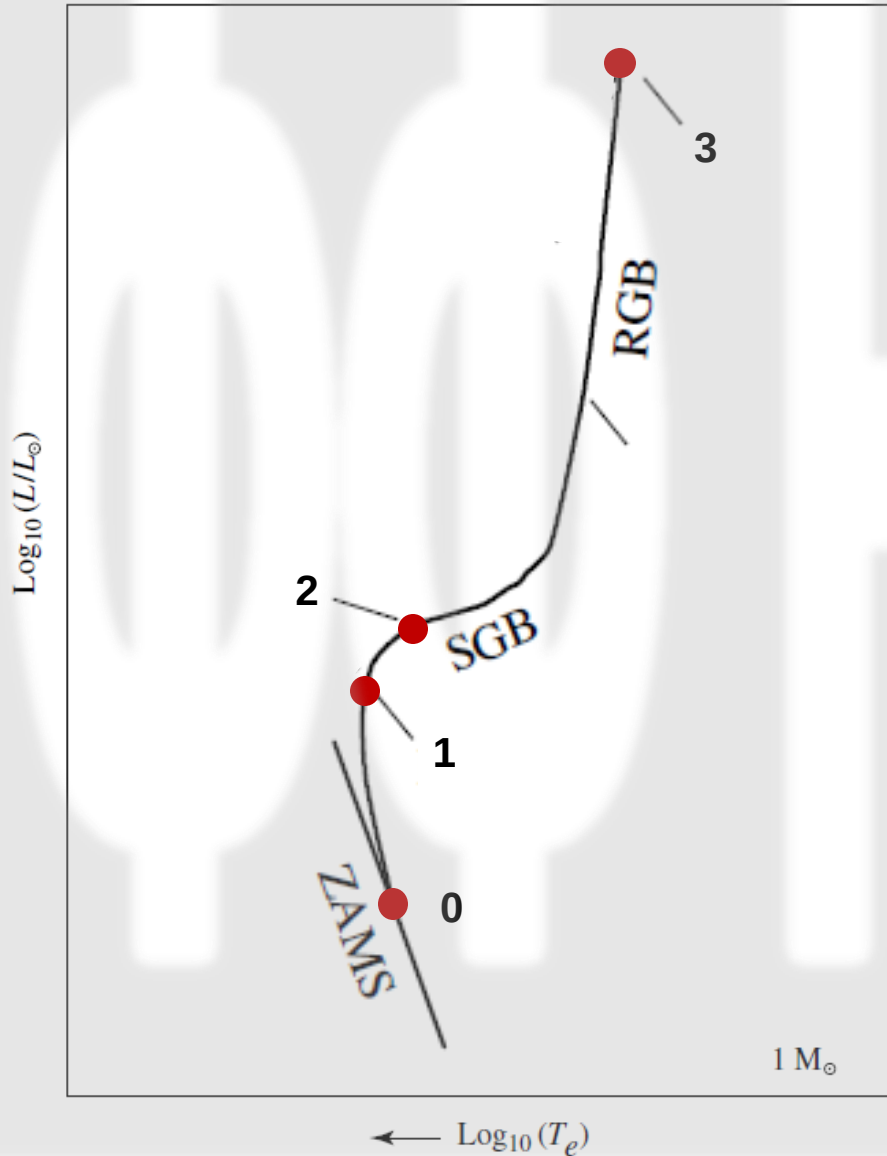
Расчеты эволюционных треков звезд различных масс впервые провел Иско Ибен (Icko Iben) в 1960-х годах.

Первые расчеты были сделаны в максимально простой модели, пренебрегая множеством факторов, таких как вращение, магнитные поля, потеря массы и т.д.

Так как время жизни звезд с массами $< 0.9 M_{\odot}$ превышает возраст Вселенной, для таких звезд расчеты треков, как правило, не делают, так как не с чем сравнивать.

Эволюционные треки

Эволюция звезды с массой $1 M_{\odot}$



0) ZAMS (Zero Age Main Sequence) – **главная последовательность нулевого возраста** – положение звезды при ее «рождении», то есть в момент начала термоядерного горения водорода в гелий.

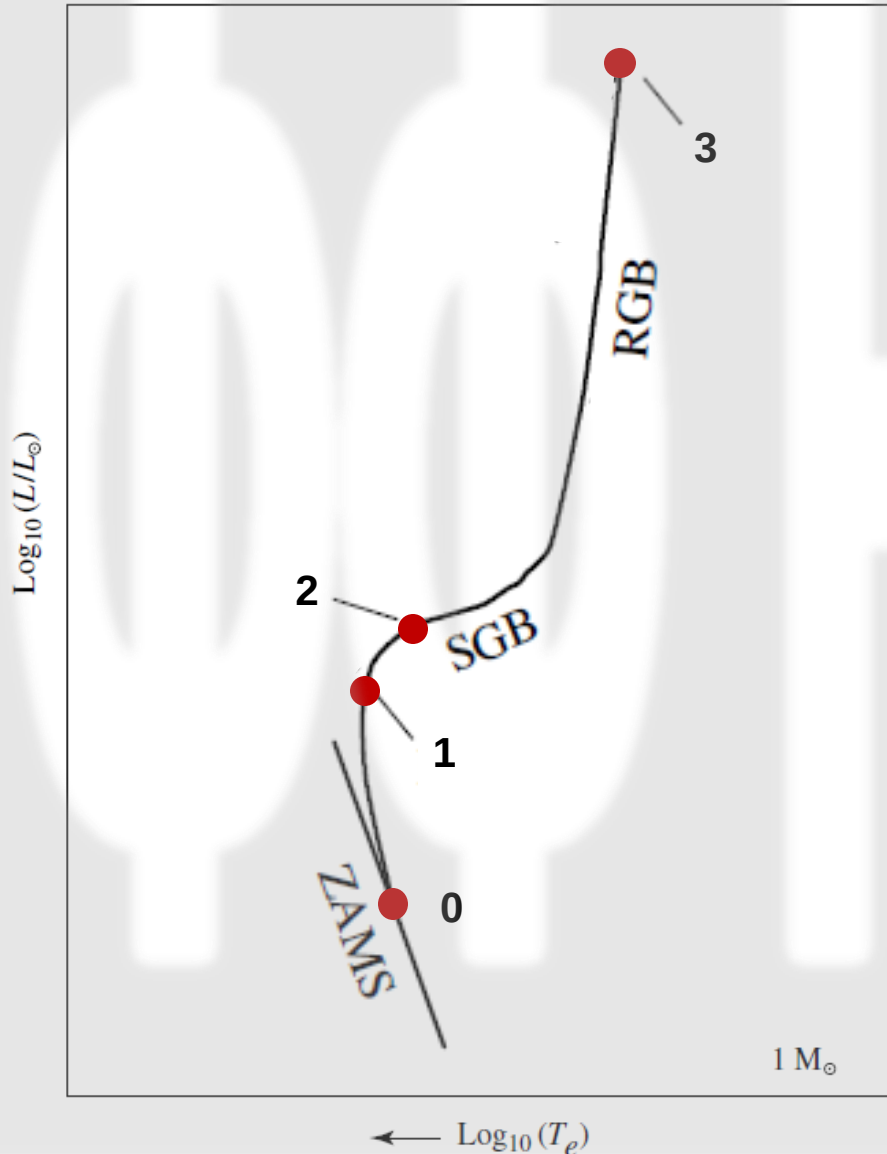
0-1) Горение водорода в ядре. Постепенное **сжатие ядра**, увеличение его температуры и светимости, **расширение внешних слоев** звезды. Температура поверхности меняется слабо.

1) 9.8 Глет. Исчерпание водорода в ядре. Сход с главной последовательности.

1-2) Сжатие ядра, повышение температуры ядра. Масса гелиевого ядра для Солнца равна примерно $0.13 M_{\odot}$.

Эволюционные треки

Эволюция звезды с массой $1 M_{\odot}$



2) 11.4 Глет. Температура недостаточна для «зажигания» гелия, но возобновляется горение водорода в оболочке вокруг ядра. Переход в стадию красного субгиганта (Sub Giant Branch).

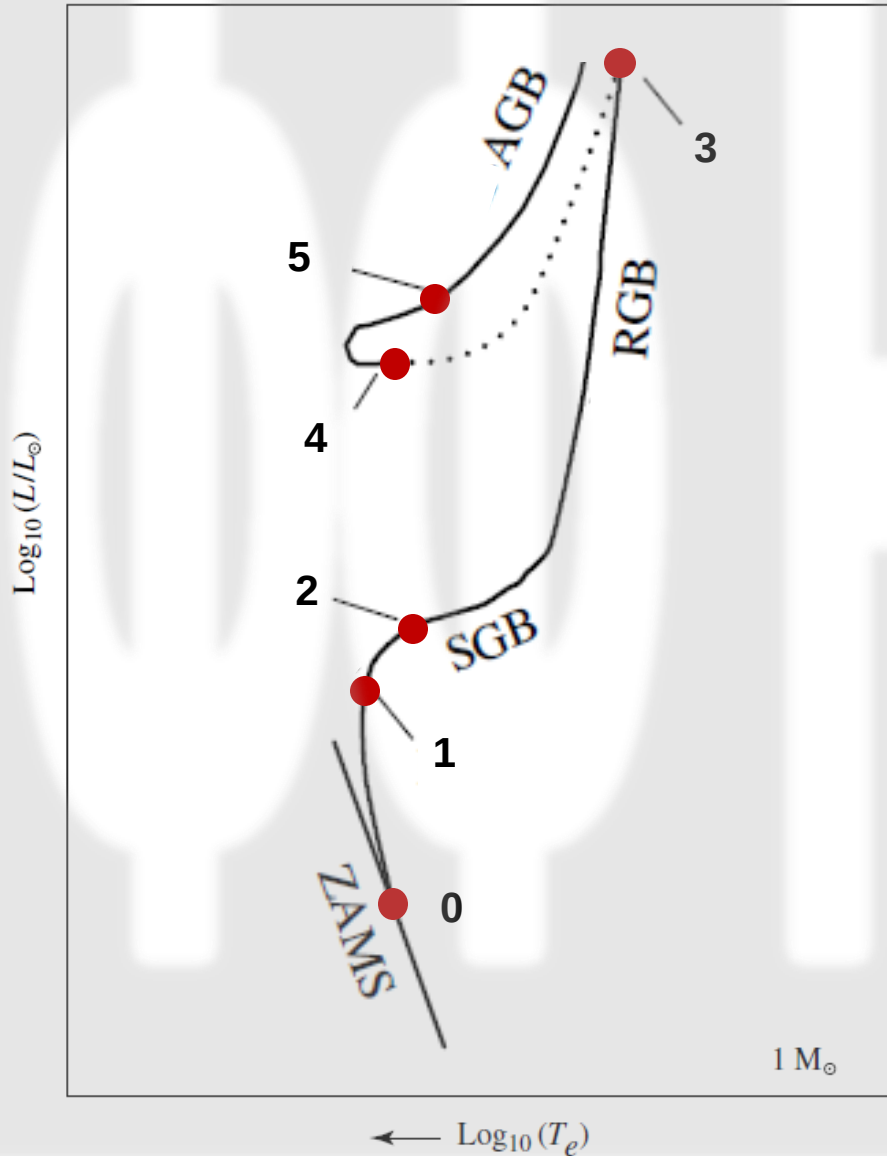
2-3) Растет глубина конвективной зоны, вплоть до горящей водородной оболочки. Интенсивное перемешивание вещества, изменение наблюдаемого хим. состава в спектре. Повышение светимости, расширение оболочки. Переход в стадию красного гиганта (Red Giant Branch).

Гелиевое ядро продолжает сжиматься, достигая электронного вырождения.

3) 12.3 Глет. Зажигание гелия в ядре (гелиевая вспышка). Ядро расширяется, расширяется и остывает горящий водородный слой, резкое падение светимости.

Эволюционные треки

Эволюция звезды с массой $1 M_{\odot}$



3-4) Очень быстрый переходный период. Сложные и множественные процессы в ядре и оболочке звезды существенно усложняют моделирование.

4) Горение гелиевого ядра с образованием C и O.

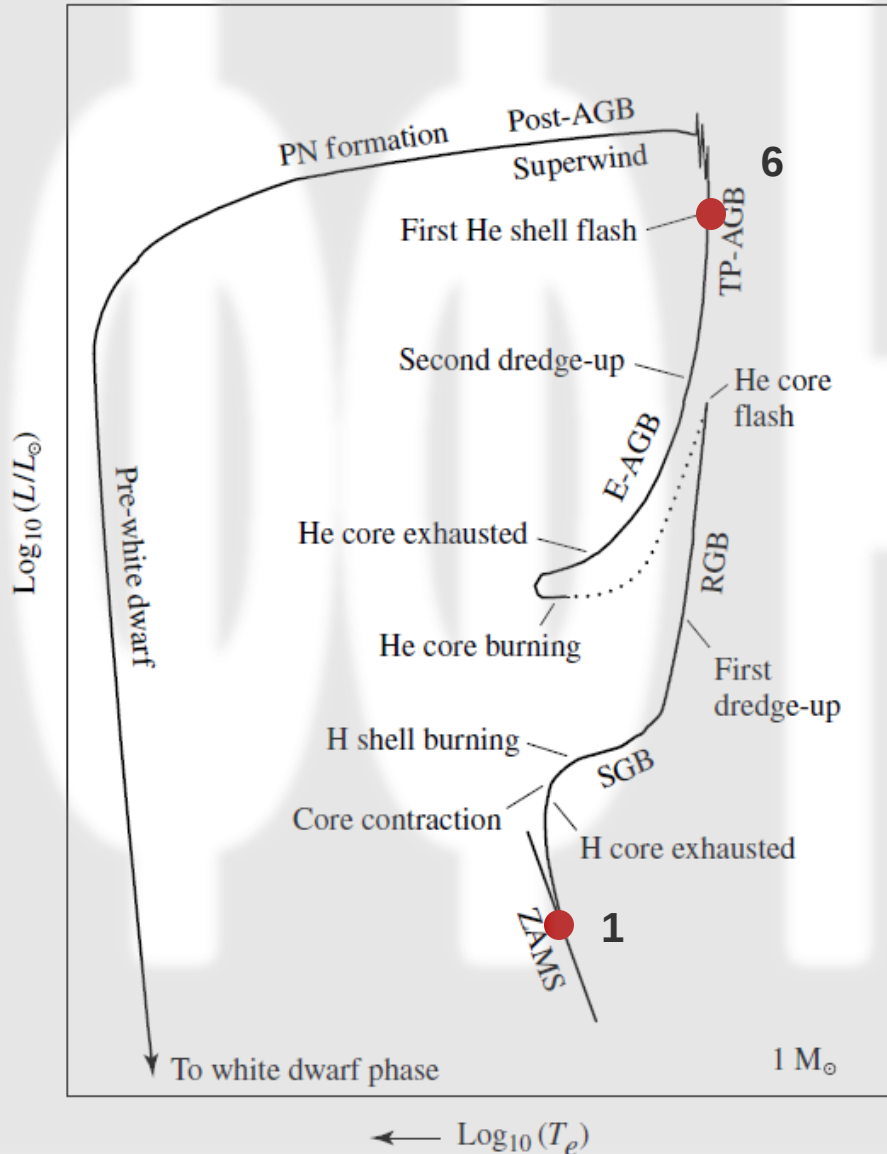
4-5) Уменьшение концентрации (давления) частиц в результате 3α синтеза. Постепенное сжатие ядра.

5) Исчерпание гелия в ядре.

5-6) Горение гелия в оболочке вокруг углерод-кислородного ядра. Увеличение конвективной зоны, перемешивание внешних, богатых водородом и внутренних гелиевых слоев существенно увеличивает светимость приводит к расширению (Asymptotic Giant Branch).

Эволюционные треки

Эволюция звезды с массой $1 M_{\odot}$



6) Периодические (тысячи – сотни тысяч лет, в зависимости от массы звезды) попеременные вспышки горения водородной и гелиевой оболочек.

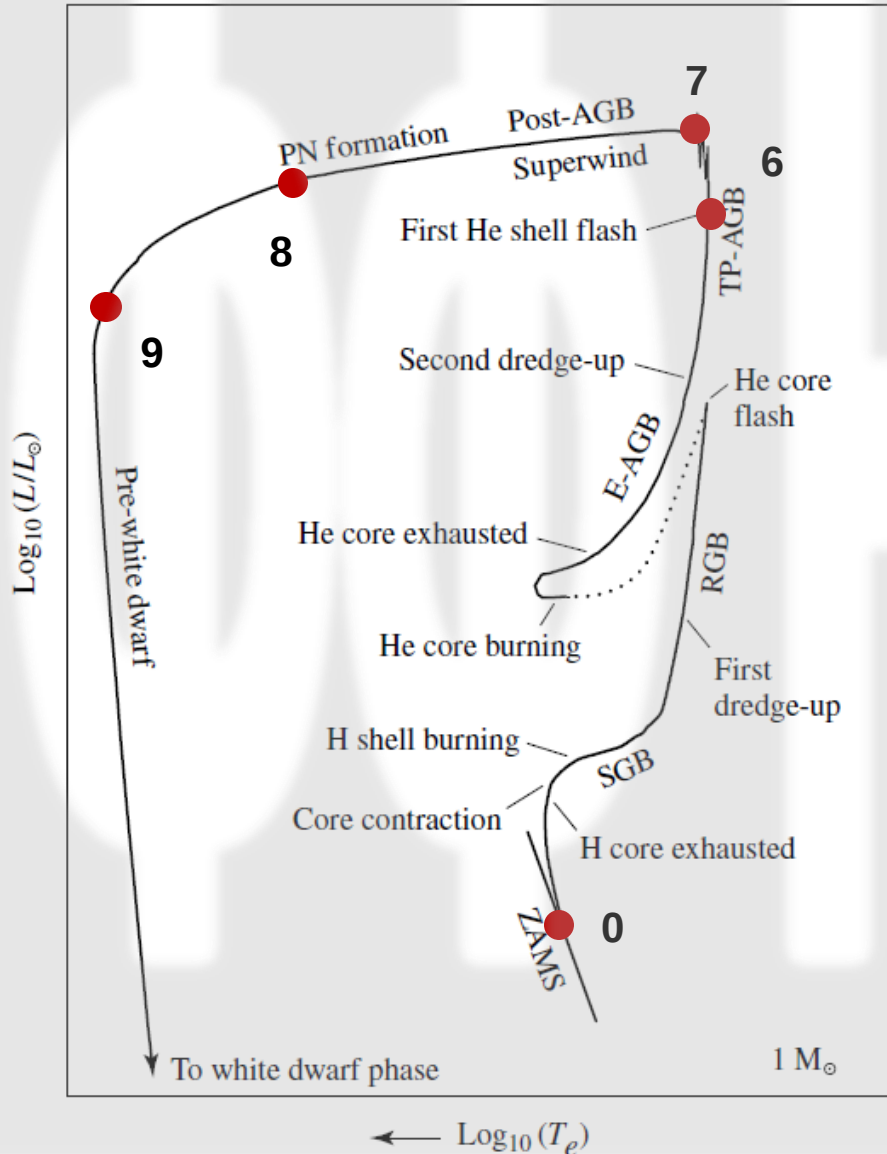
Развитие конвективной зоны вплоть до углеродно-кислородного ядра, существенное изменение хим. состава поверхности, обогащение углеродом.

Активная потеря массы ($\sim 10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$) во внешнем слое из-за большого радиуса звезды (малой поверхностной гравитации) и высокой светимости. Звезда окружена «плотным» газо-пылевым расширяющимся облаком.

Сжатие C-O ядра. Для звезд с $M \lesssim 4 M_{\odot}$ температура ядра не достигнет предела, необходимого для начала горения углерода.

Эволюционные треки

Эволюция звезд малых масс ($0.6-4 M_{\odot}$)



7-8) По мере расширения внешней газо-пылевой оболочки она становится оптически прозрачной, видимый спектр смещается в более горячую область.

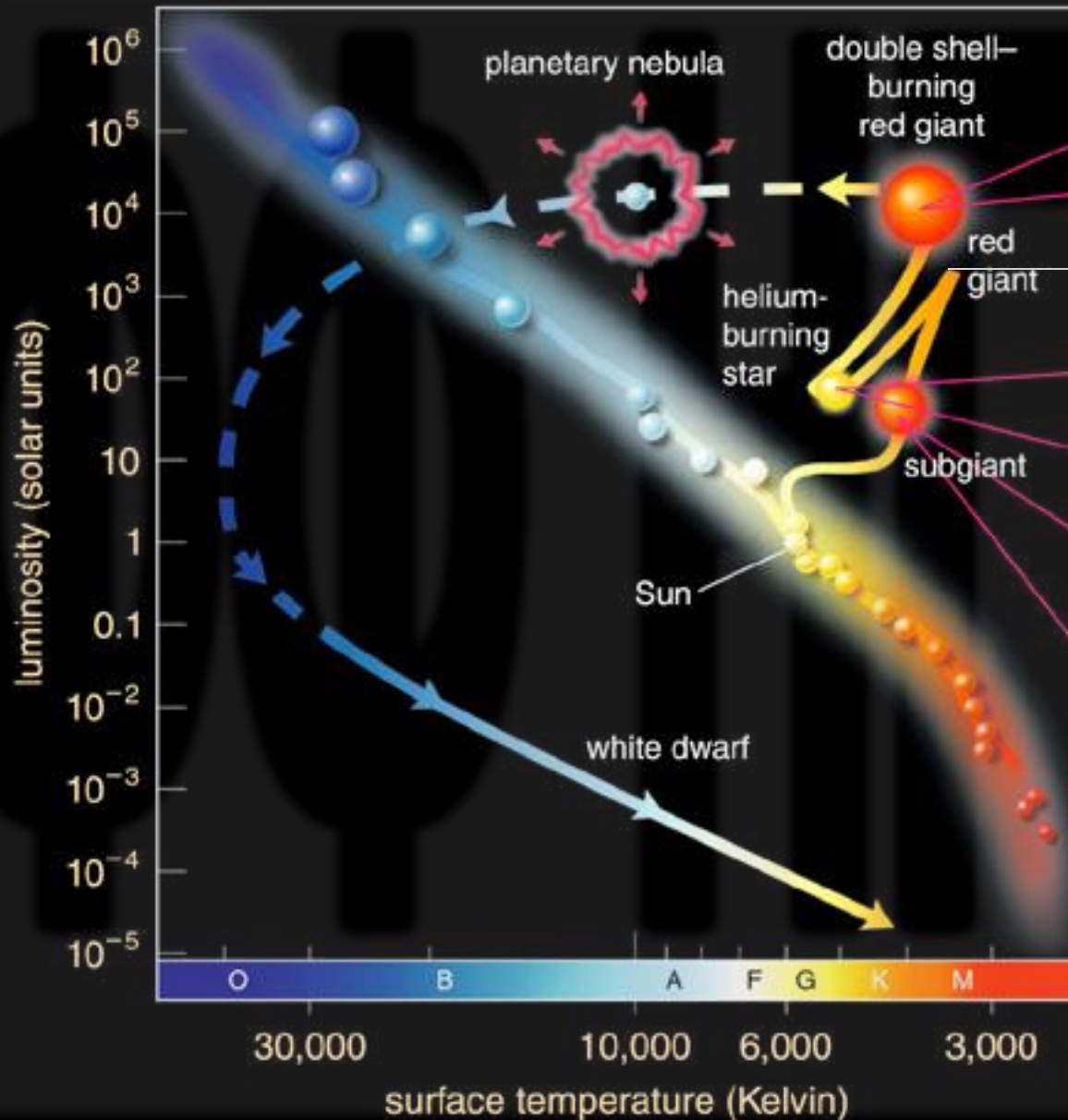
Детали механизма(-ов) потери существенной доли начальной массы надежно еще не установлены. В итоге для звезд с начальной массой $M \lesssim 4M_{\odot}$ происходит сброс внешних слоев, включая слоевые источники горения водорода и гелия.

Сброшенная оболочка звезды видна как **планетарная туманность**. Свечение туманности происходит за счет возбуждения газа УФ фотонами звезды.

9) Светимость звезды резко падает, обнажается горячее C-O ядро – **белый карлик**.

Эволюционные треки

Эволюция звезды с малых масс ($< 2 M_{\odot}$)



Инертное С-О ядро
Горение гелия в оболочке
Горение водорода в оболочке

Гелиевая вспышка

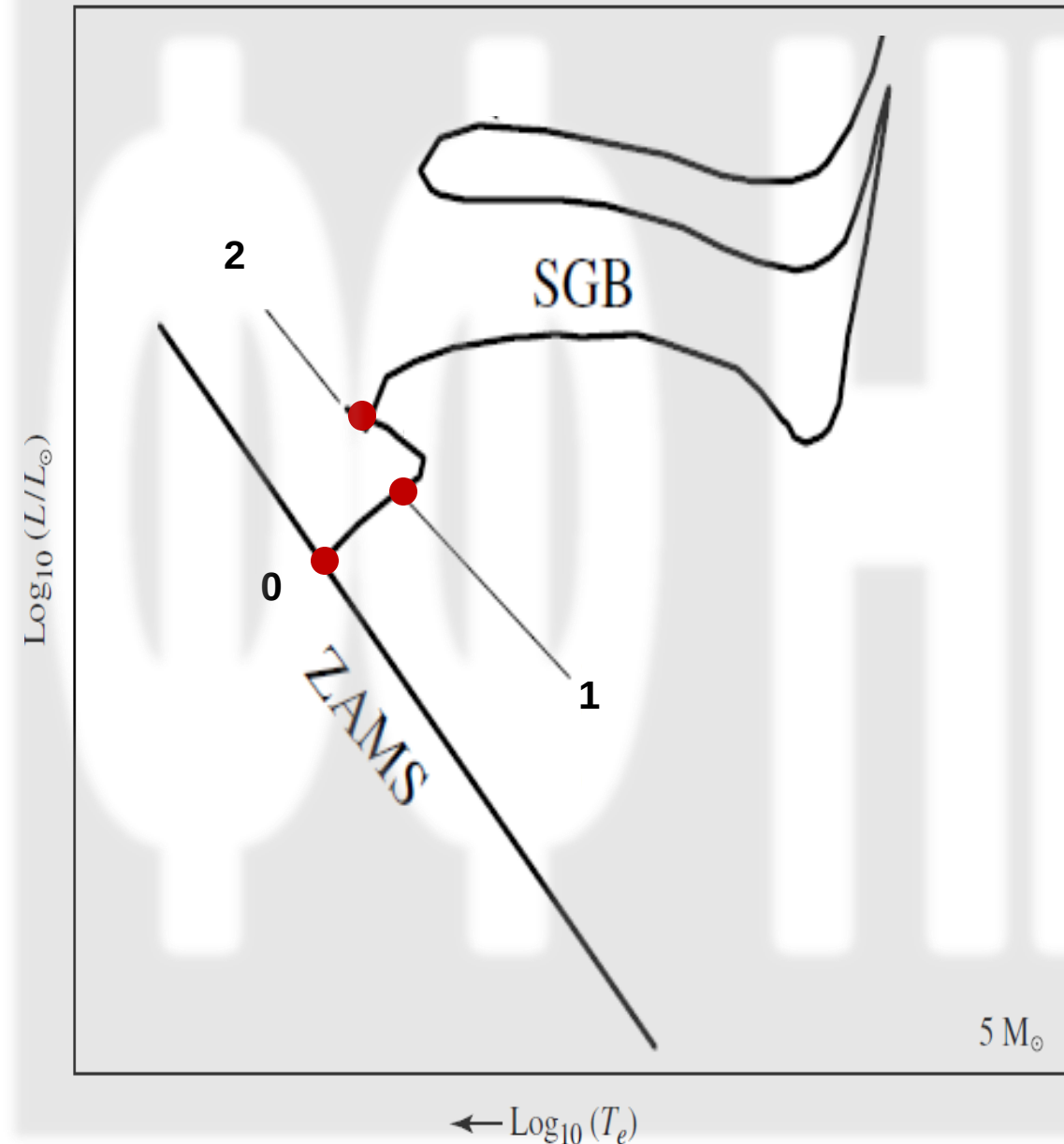
Горение гелия в ядре
Горение водорода в оболочке

Инертное гелиевое ядро
Оболочка горящего водорода

Ядро звезды

Эволюционные треки

Эволюция звезды средней массы ($4-8 M_{\odot}$)



0-1) Горение водорода в ядре. Конвекция в ядре поддерживает однородность его хим. состава. Радиус конвективной зоны постепенно уменьшается.

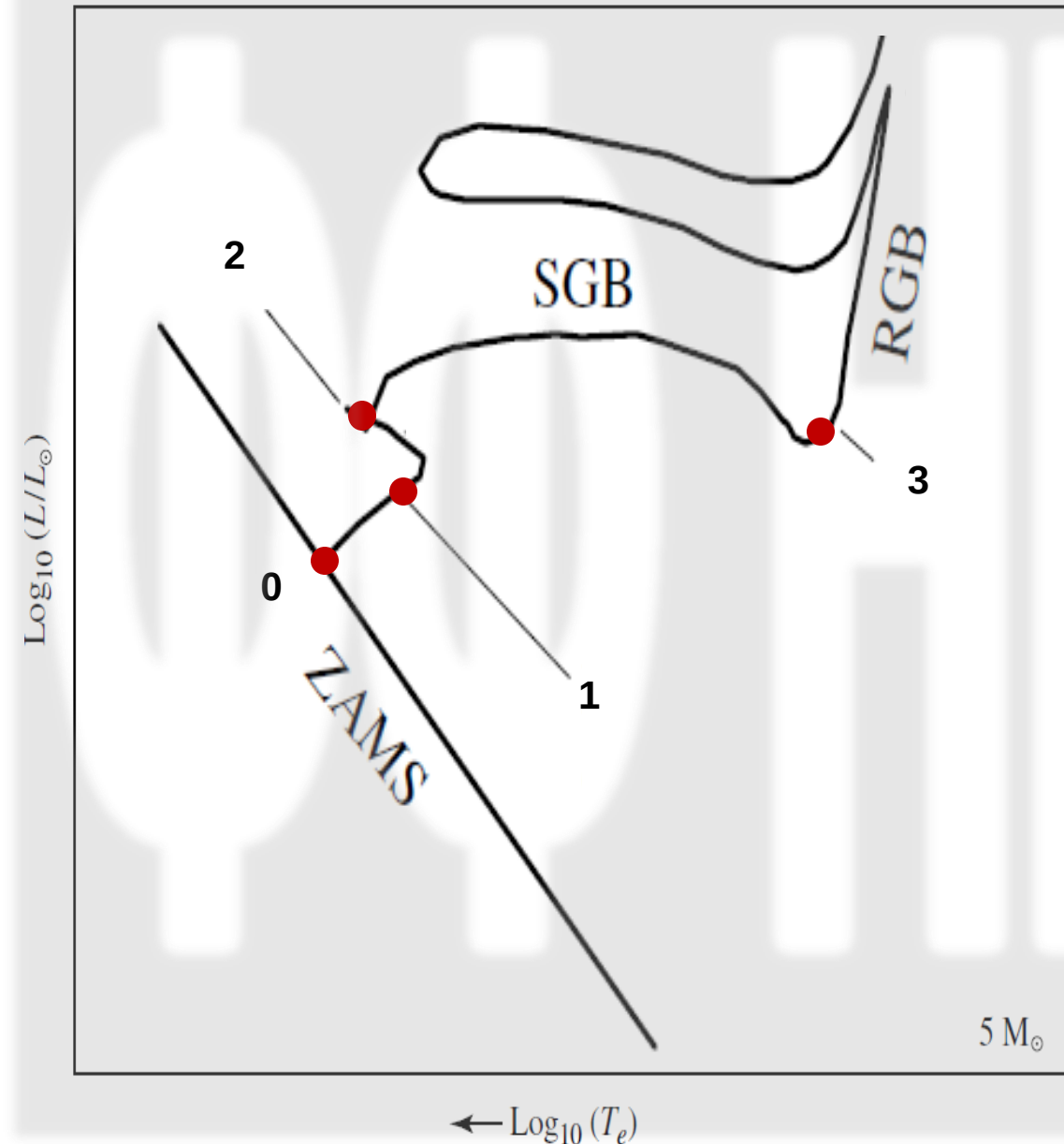
1) 93 Млет. Исчерпание водорода в ядре. Сход с главной последовательности.

1-2) Сжатие звезды, повышение температуры и светимости за счет гравитационной энергии.

2) 94.5 Млет. Включение слоевого источника – горение водорода вокруг гелиевого ядра, резкое расширение оболочки и падение температуры поверхности. Переход на ветвь субгигантов.

Эволюционные треки

Эволюция звезды средней массы ($4-8 M_{\odot}$)



2-3) Горение водорода слоевом источнике, увеличение массы гелиевого ядра. Достигается предел Ш-Ч, коллапс ядра.

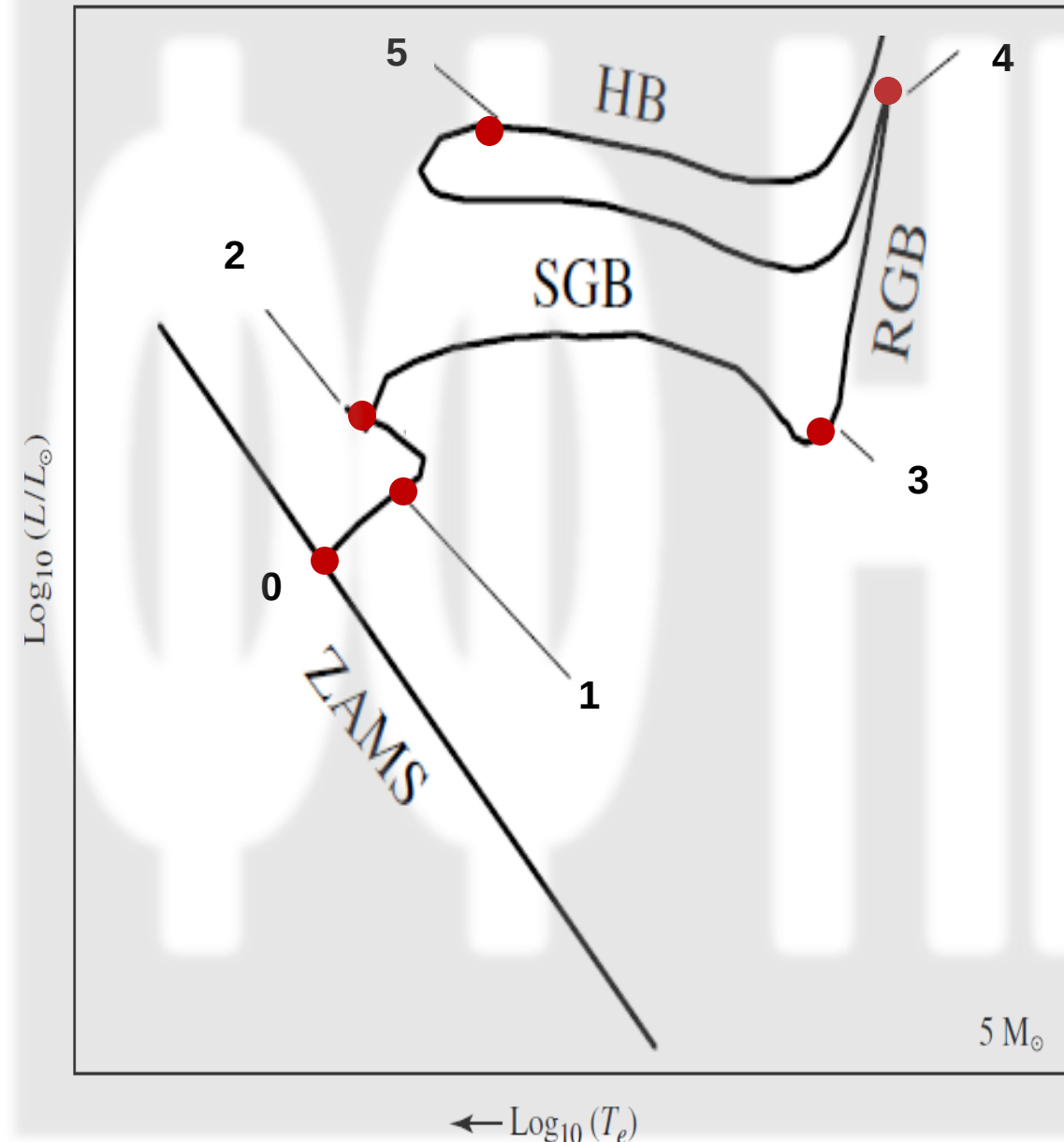
Разогрев ядра за счет гравитационного сжатия, дальнейшее расширение оболочки с поглощением энергии.

3) 94.9 Млет. Падение температуры поверхности, увеличение непрозрачности и, как следствие, образование внешнего конвективного слоя. Резкое повышение интенсивности синтеза => резкое повышение светимости.

Переход на ветвь красных гигантов.

Эволюционные треки

Эволюция звезды средней массы ($4-8 M_{\odot}$)



3-4) Максимальное расширение конвективной зоны. Вещество, обогащенное тяжелыми элементами из внутренних слоев выносится на поверхность => изменение видимого спектра поглощения (First dredge-up).

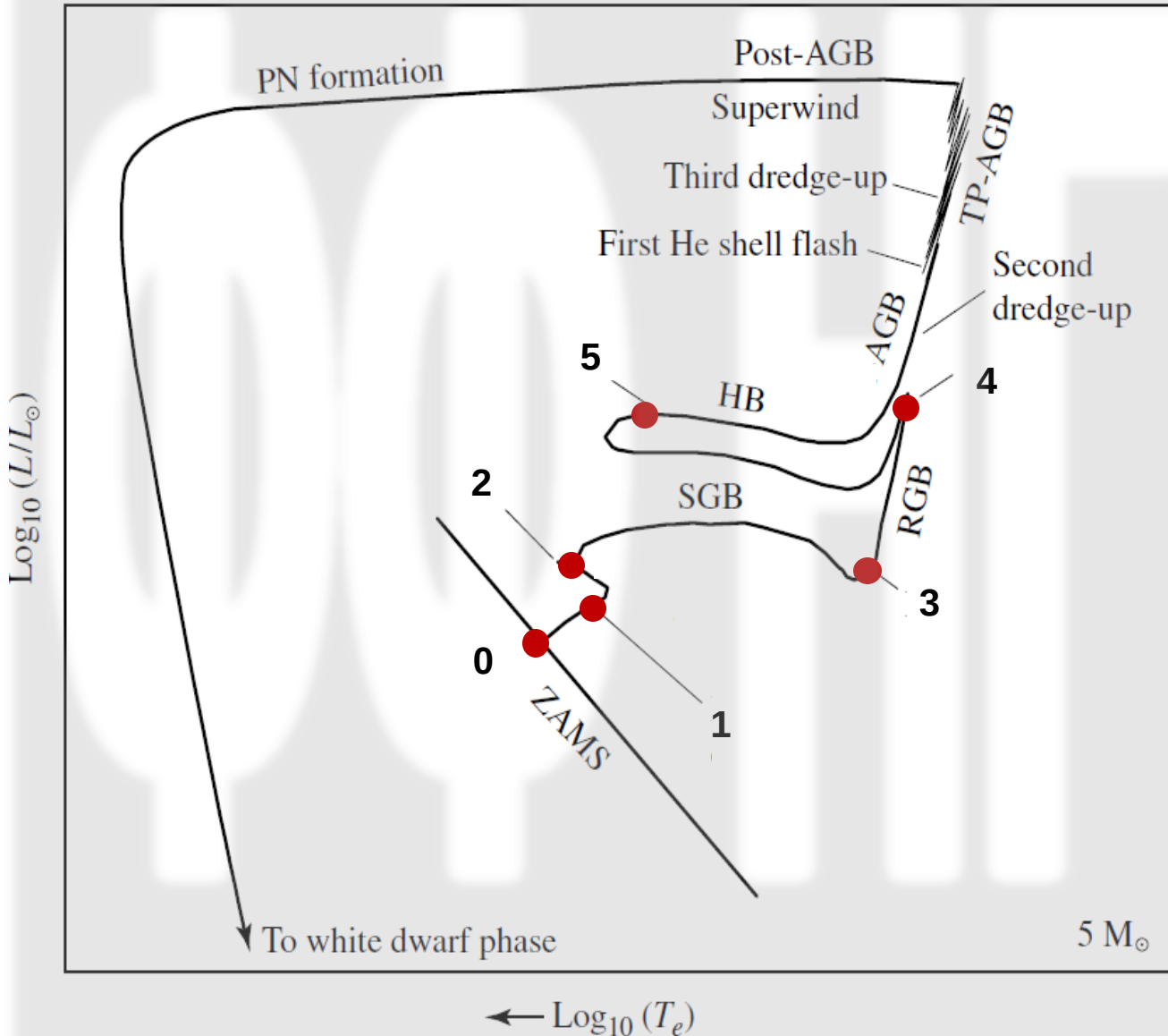
4) 95.2 Млет. Red Giant Tip. Температура и плотность ядра достигает предела для зажигания гелия (3α реакция). После переходных процессов звезда переходит на горизонтальную ветвь (Horizontal Branch).

4-5) Горение гелия.

5) Истощение гелия в ядре. Сжатие C-O ядра с одновременным расширением оболочки.

Эволюционные треки

Эволюция звезды средней массы ($4-8 M_{\odot}$)



Дальнейшие этапы эволюции аналогичны звезде с массой $1 M_{\odot}$.

Расширение оболочки, интенсивная потеря вещества. Чередка включения-выключения водородного и гелиевого слоевых источников с интенсивным перемешиванием внешних слоев (Second Dredge-up, Third Dredge-up).

Для звезд с $4 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 8 M_{\odot}$ при сжатии C-O ядра достигаются условия для горения углерода в неон и магний с образованием O-Ne-Mg ядра.

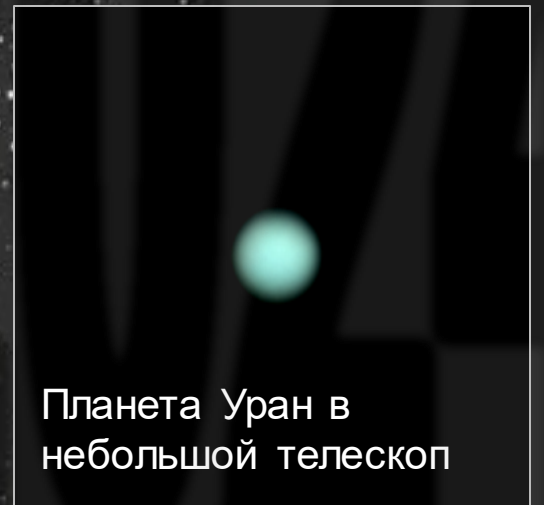
В итоге образуется **планетарная туманность** и O-Ne-Mg белый карлик.

Планетарные туманности

Планетарные туманности, несмотря на название, к планетам не имеют никакого отношения!

Названы так лишь потому, что при визуальных наблюдениях в небольшие телескопы часто видны как достаточно резко очерченные диски, очень похожие (особенно M57) на диски планет, хоть и гораздо менее яркие.

Планетарная туманность M57



Планета Уран в
небольшой телескоп



Планетарные туманности

Разнообразие и сложность форм планетарных туманностей, по всей видимости обусловлено влиянием вращения звезды (угловой момент), поэтапным выбросом вещества оболочки звезды (множественные вспышки слоевых источников), магнитным полем звезды, наличием второй звезды и т.д.

Зелено-голубой цвет туманностей, как правило, обусловлен «запрещенными» линиями [O III] (500.68 нм и 495.89 нм), а также [O II] и [Ne III]. В красную область дает вклад излучение водорода (линия H_{α}) и азота.

Типичная скорость расширения планетарных туманностей составляет 10 – 30 км/с. Через 50 – 100 тысяч лет вещество планетарной туманности растворяется в межзвездном пространстве.

Продолжительность стадии планетарной туманности ничтожно мала по сравнению с временем эволюции звезды. В настоящее время в Млечном Пути известно всего около 1500 планетарных туманностей. Полное число ПТ оценивается в 15000. Нередко новые слабые ПТ обнаруживаются любителями астрофотографами при (очень) длительных экспозициях (десятки-сотни часов).

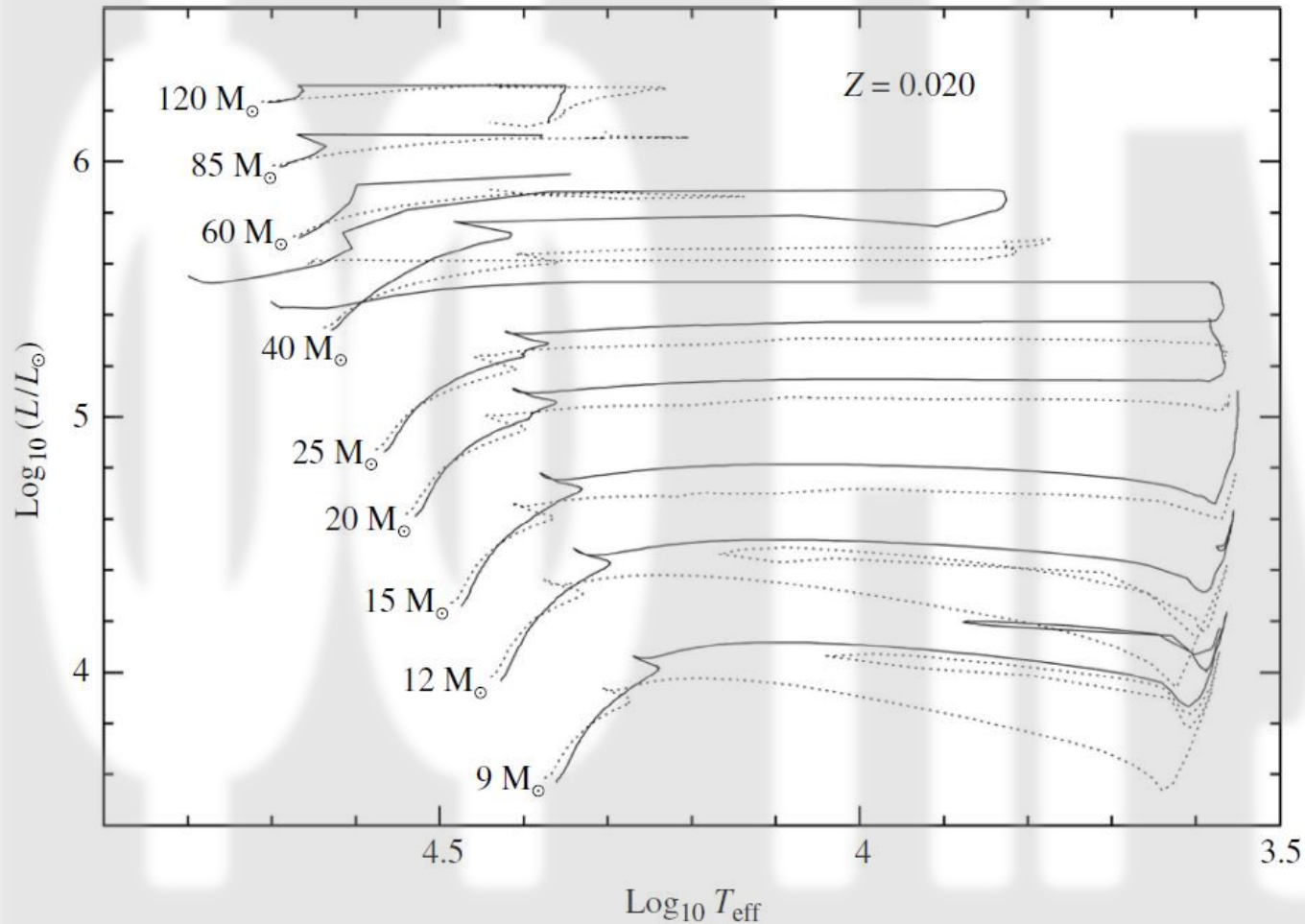
Масса ПТ в среднем составляет $0.5M_{\odot}$, что соответствует темпу обогащения межзвездного вещества тяжелыми элементами с интенсивностью около $1M_{\odot}$ в год.

Планетарные туманности



Эволюционные треки

Эволюция звезды массивных звезд ($>8 M_{\odot}$)



Эволюция массивных звезд протекает за очень короткий (по астрономическим меркам) промежуток времени.

Для звезды с $M \simeq 25 M_{\odot}$ весь жизненный цикл длится всего около 7 Млет.

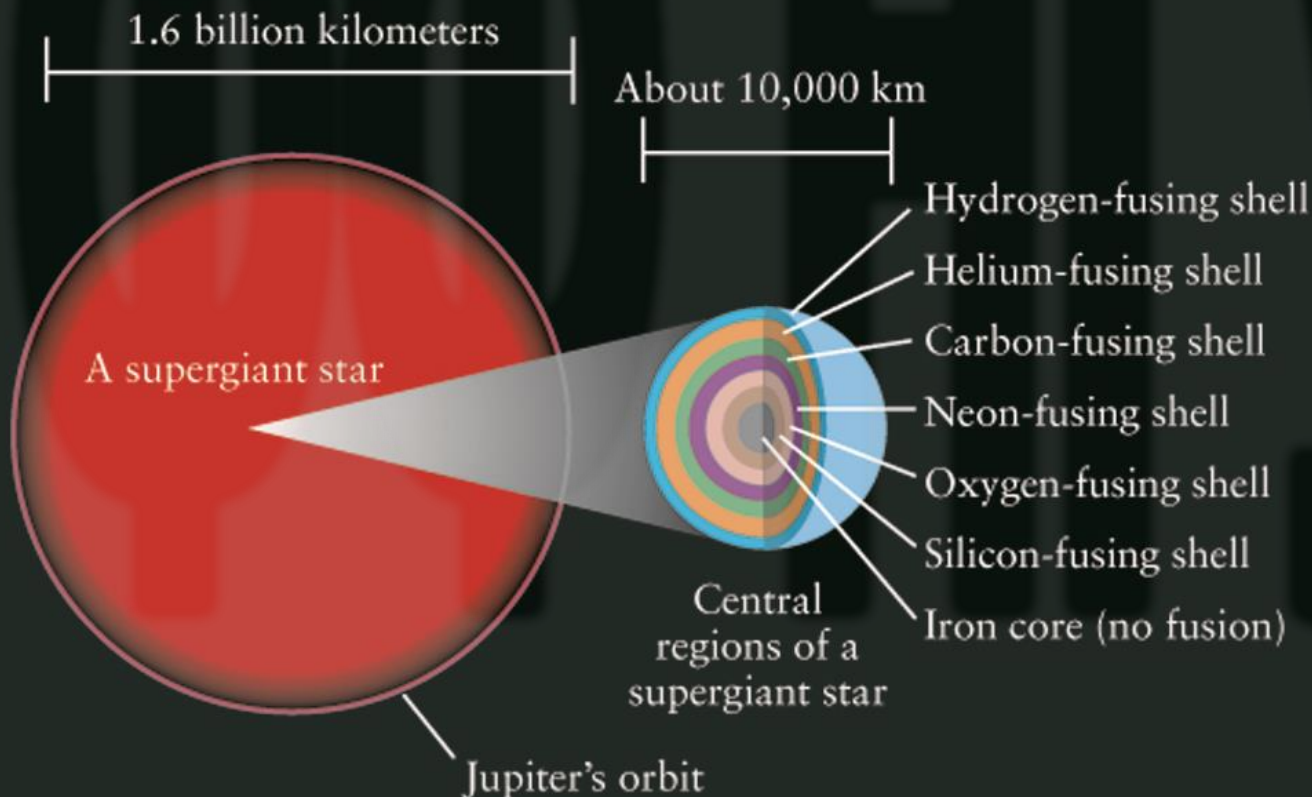
Самые массивные звезды ($M \simeq 100 M_{\odot}$) успевают закончить свой жизненный цикл еще на стадии формирования звезд малых и средних масс.

Эволюционные треки

Эволюция звезды массивных звезд ($>8 M_{\odot}$)

Для массивных звезд история с зажиганием все более тяжелых элементов повторяется вплоть до синтеза элементов группы железа из кремния.

К заключительному этапу эволюции образуется слоистая структура внутренней области звезды.

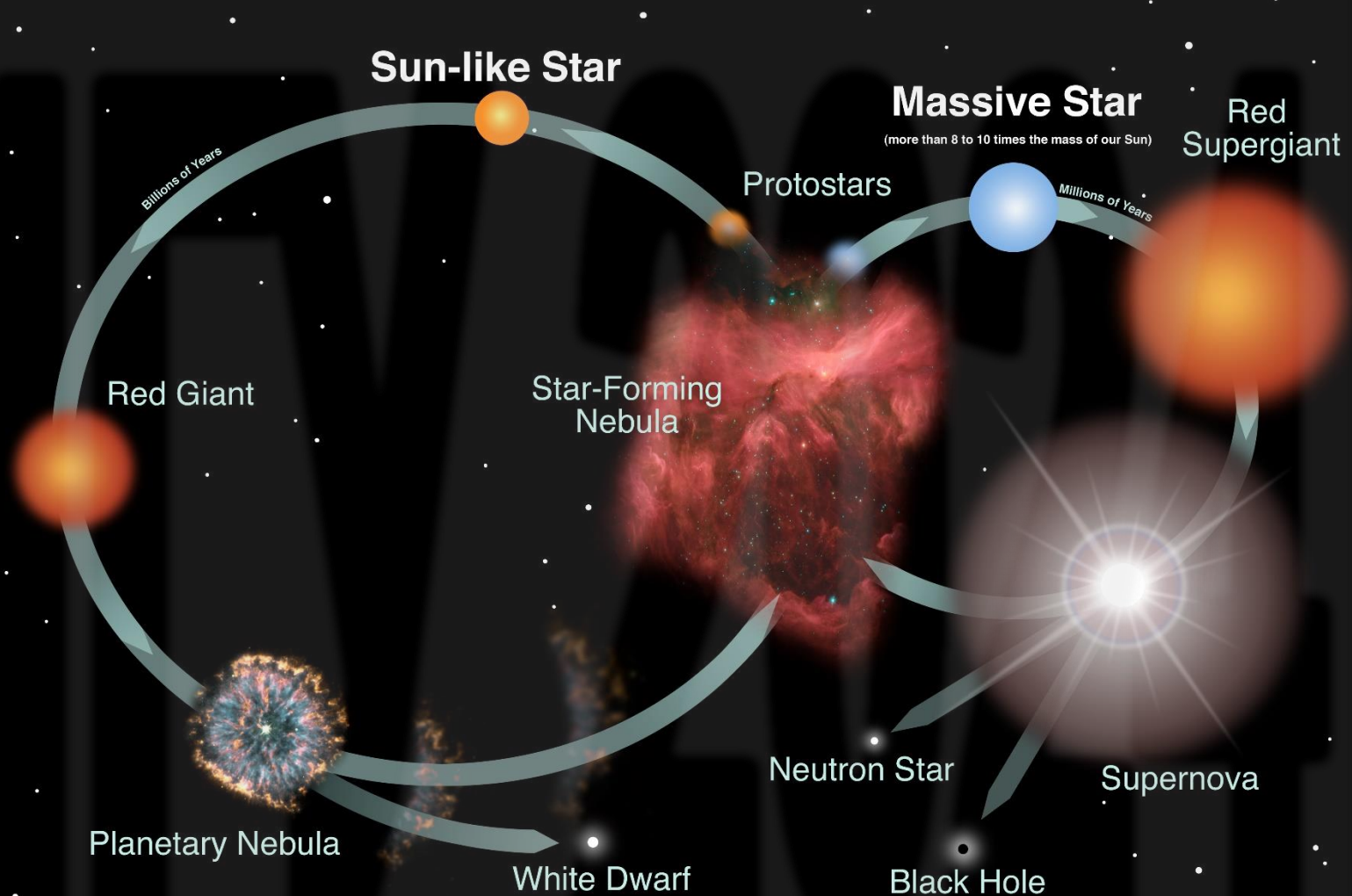
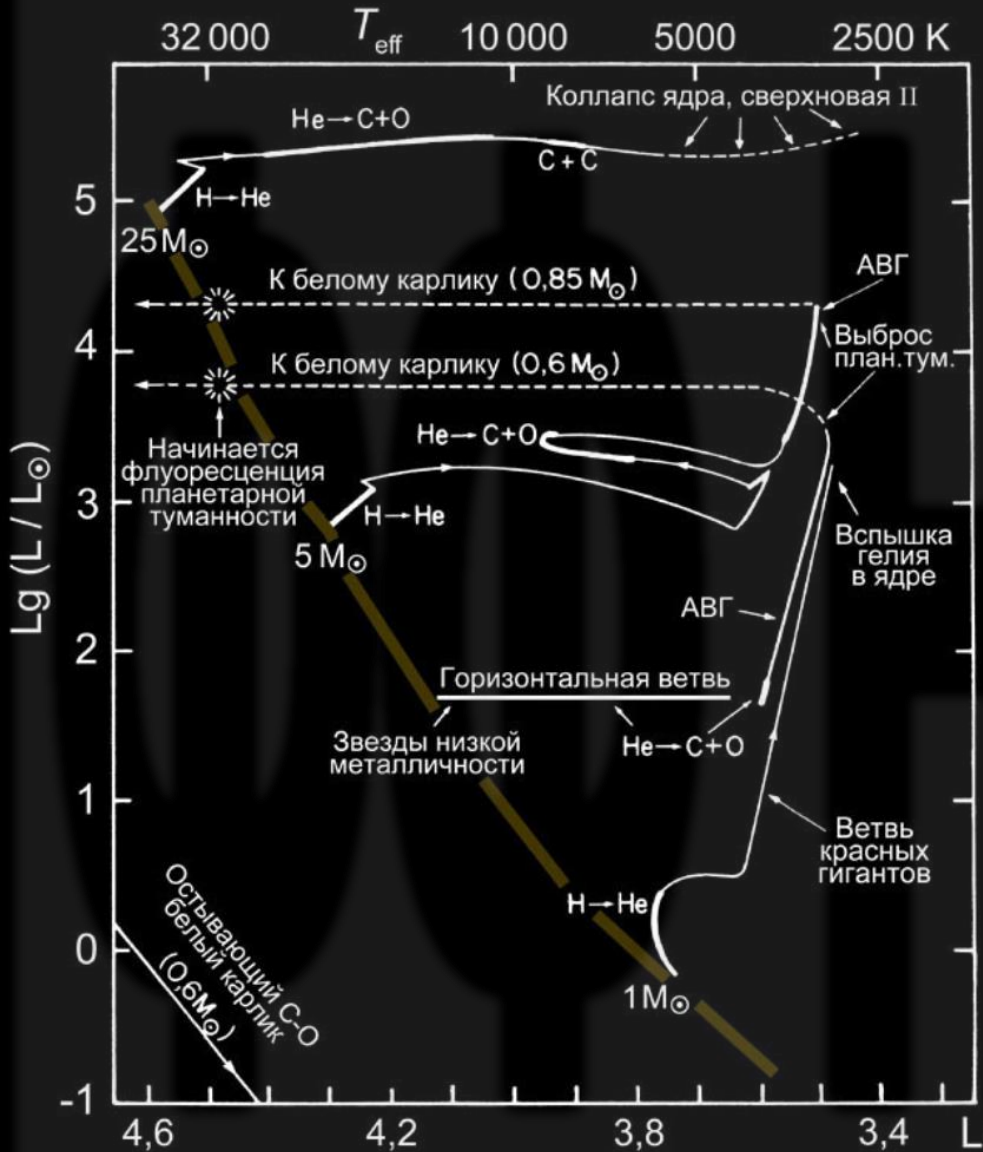


Синтез элементов тяжелее железа энергетически невыгоден.

Стабильность железного ядра еще некоторое время поддерживается давлением вырожденного эл. газа.

При достижении массы ядра $1.4M_{\odot}$ (предел Чандрасекара) происходит его коллапс и взрыв сверхновой.

Эволюционные треки



На заключительных этапах эволюции большая часть исходной массы звезды сбрасывается обратно в межзвездную среду, обогащая ее «тяжелыми» элементами.

Переменные звезды

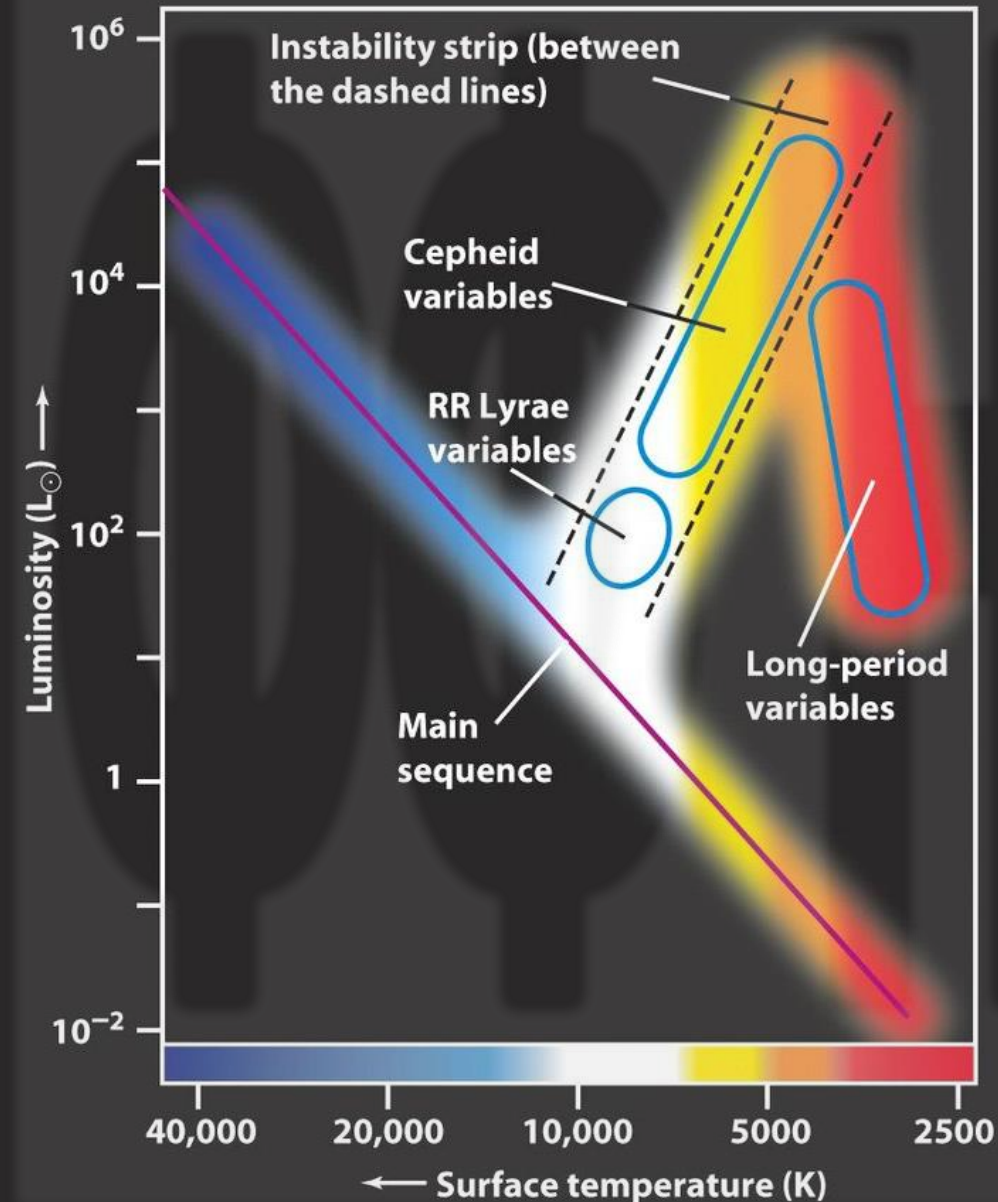
Как и в большинстве сложных (многопараметрических) систем, в звездах могут создаваться неустойчивости, приводящие к (более или менее) периодическим вариациям параметров – колебаниям, в частности – к вариациям светимости звезды.

Наблюдаемая переменность блеска звезды может быть вызвана реальным изменением ее физических параметров или вариациями потока, достигающего наблюдателя из-за (частичной) блокировки (затменно-переменные звезды). Переменность блеска некоторых звезд заметили еще в древности.

Классификация переменных звезд проводится по тому, как яркость звезды меняется со временем (кривая блеска). Как обычно, пока физические причины изменения светимости были не поняты, классификация состояла в распределении всех переменных звезд по группам по степени похожести их кривых блеска.

При этом название группе давалось по имени первой обнаруженной переменной звезды данного типа. Например переменные типа β Персея, типа **δ Цефея (цефеиды)**, типа o Кита (мириды), и т.д.

Диаграмма Г-Р: область неустойчивости



На диаграмме Г-Р одна из таких областей называется полосой неустойчивости и имеет важнейшее значение в астрофизике.

Звезды, находящиеся в полосе неустойчивости имеют периодические изменения физических параметров (светимости, температуры, размеров).

В настоящее время выделяют несколько типов (классов) таких переменных звезд под общим названием Цефеиды.

- классические цефеиды (тип I)
- цефеиды типа II
- типа RR Lyr

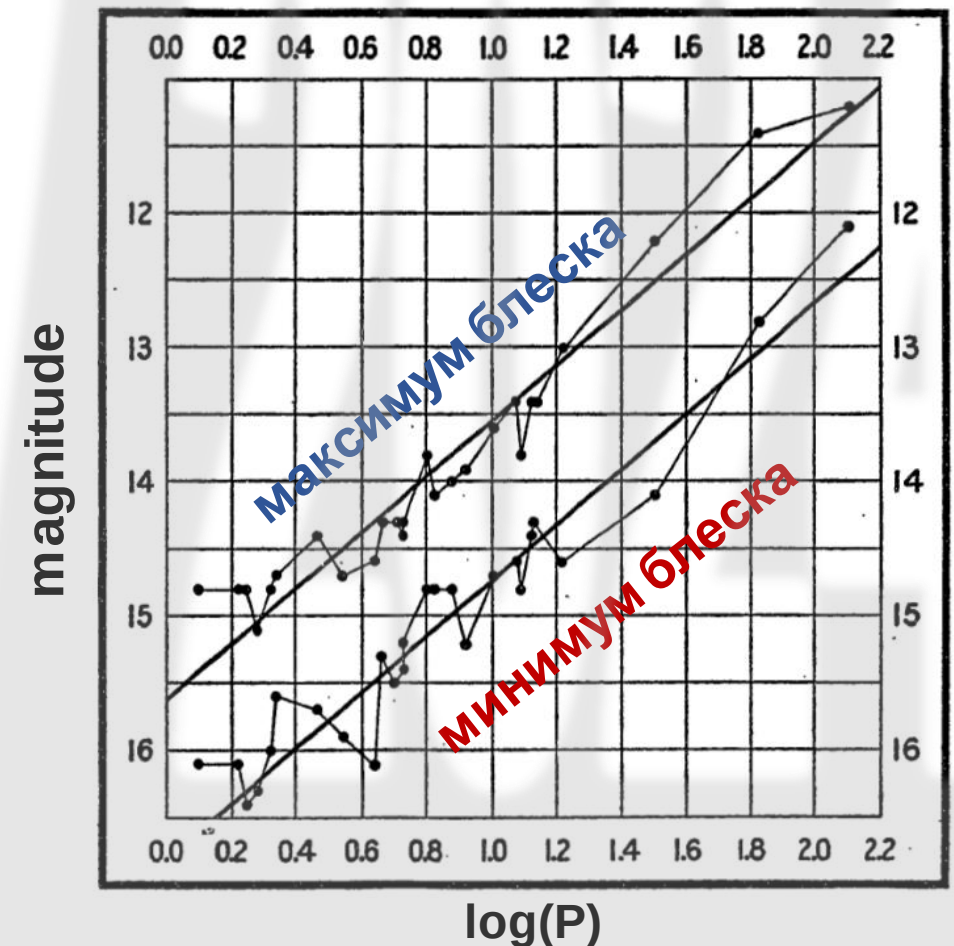
Цефеиды



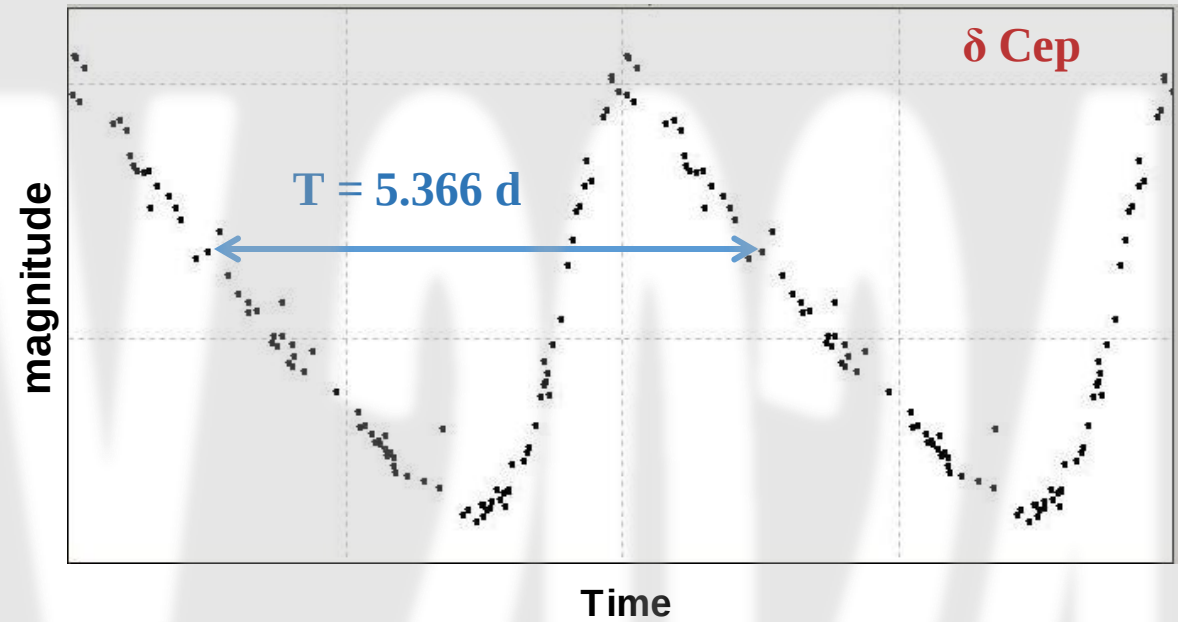
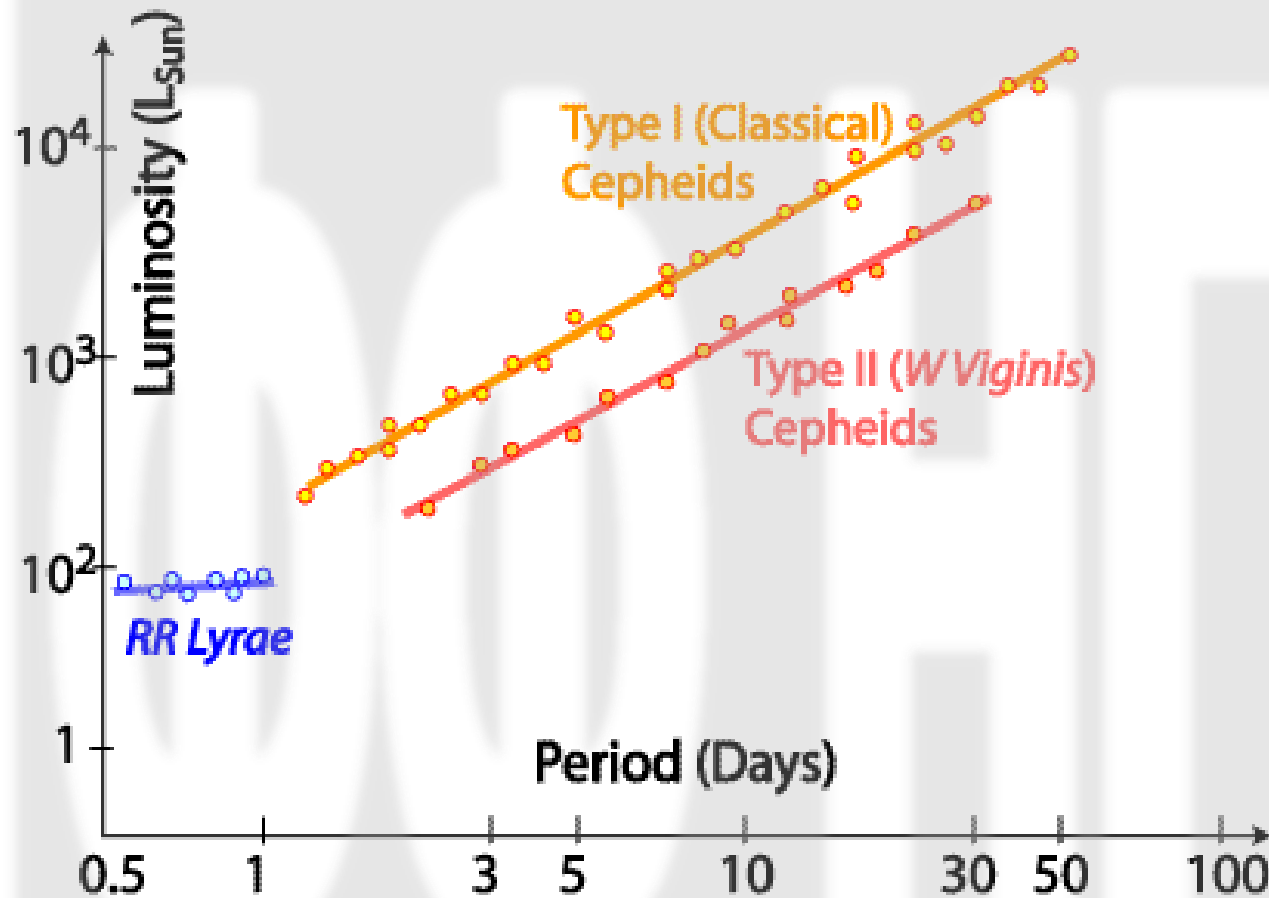
Генриетта Левитт (Henrietta Leavitt) – из команды Пиккеринга – занималась фотометрией (измерением видимой звездной величины) звезд. В процессе работы она обнаружила множество новых переменных звезд.

При изучении звезд Малого Магелланового Облака (карликовая галактика – спутник Млечного Пути), она обнаружила, что видимая звездная величина некоторого типа переменных звезд коррелирует с периодом колебания.

Поскольку расстояние до всех этих звезд можно считать примерно одинаковым, это означает физическую связь параметров.



Цефеиды



Измерение периода пульсаций — простая задача наблюдательной астрономии. Сильная корреляция позволяет с достаточно высокой точностью определить **абсолютную** звездную величину.

Всё это + высокая светимость классических цефеид (гиганты и сверхгиганты) позволяет выделять их на больших расстояниях, что делает эти звезды мощным инструментом измерения расстояний на масштабах до десятков Мпк.

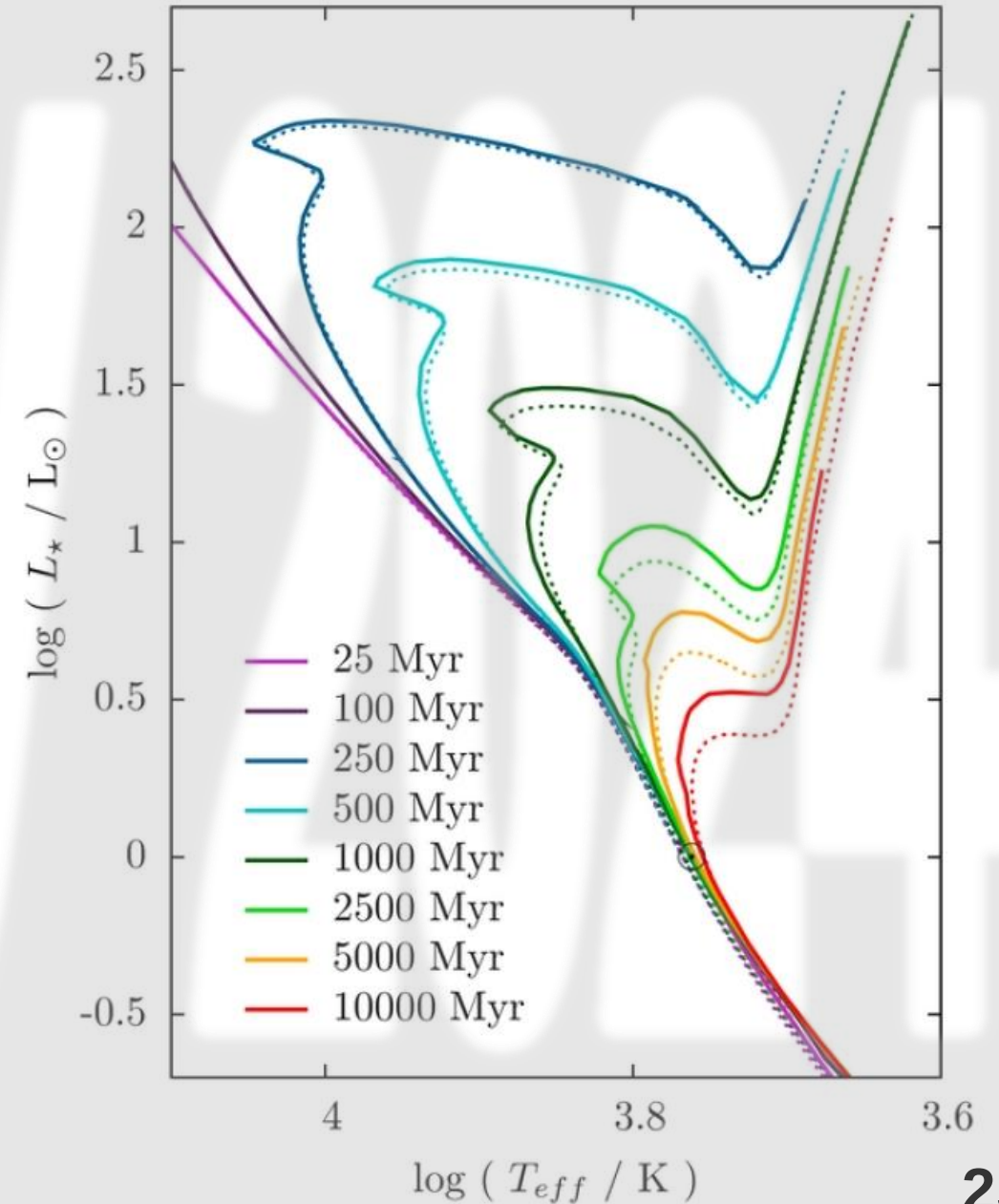
Изохроны

У нас нет возможности проверить эволюционные модели для отдельных звезд, т.е. проследить эволюционный трек отдельной звезды.

Однако мы можем рассчитать, на какой стадии эволюции находятся звезды, родившиеся в одно время (т.е. имеющие одинаковый возраст), но имеющие разные массы – изохрона.

Поскольку скорость эволюции сильно зависит от массы звезды, то разные звезды будут находиться на разных стадиях.

Такую возможность предоставляют звездные скопления, где можно считать, что все звезды образовались примерно в одно время.



Изохроны

Для звезд одного скопления с хорошей точностью можно считать, что они образовались примерно в одно время с распределением звезд по массам в широком диапазоне.

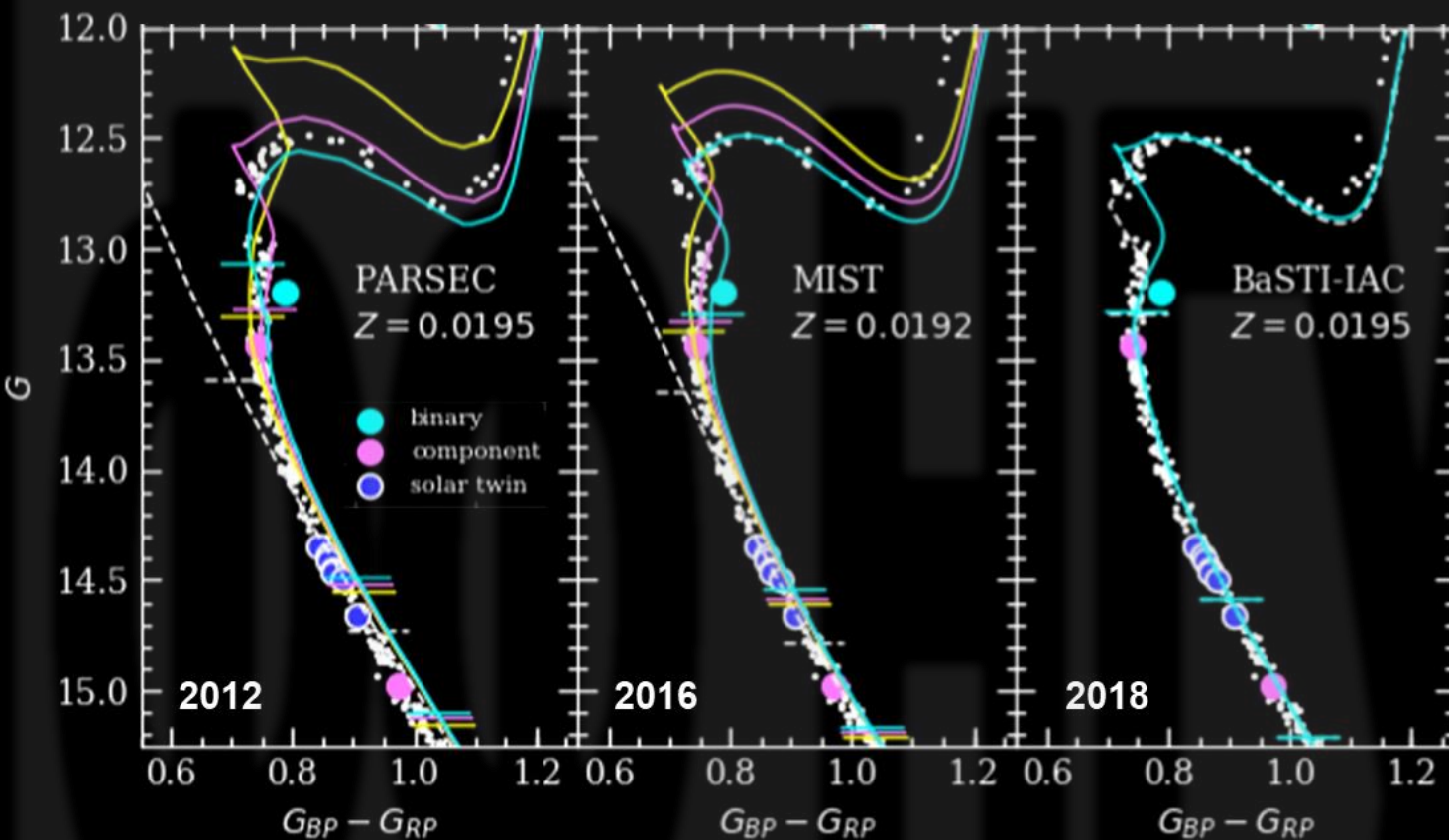
Выделить звезды, принадлежащие скоплению (исключить случайные наложения можно по их общему собственному движению и расстоянию (если удастся измерить параллакс) по данным спутника GAIA.

Рассеянные (галактические) звездные скопления содержат от десятков до десятков тысяч звезд.



NGC2682 (M67)

Изохроны



Существует несколько программ моделирования эволюционных треков, которые постоянно уточняются добавлением все более «тонких» эффектов (взаимодействие на границе лучистой и конвективных зон, металличность и распределение хим. состава и т.д.).

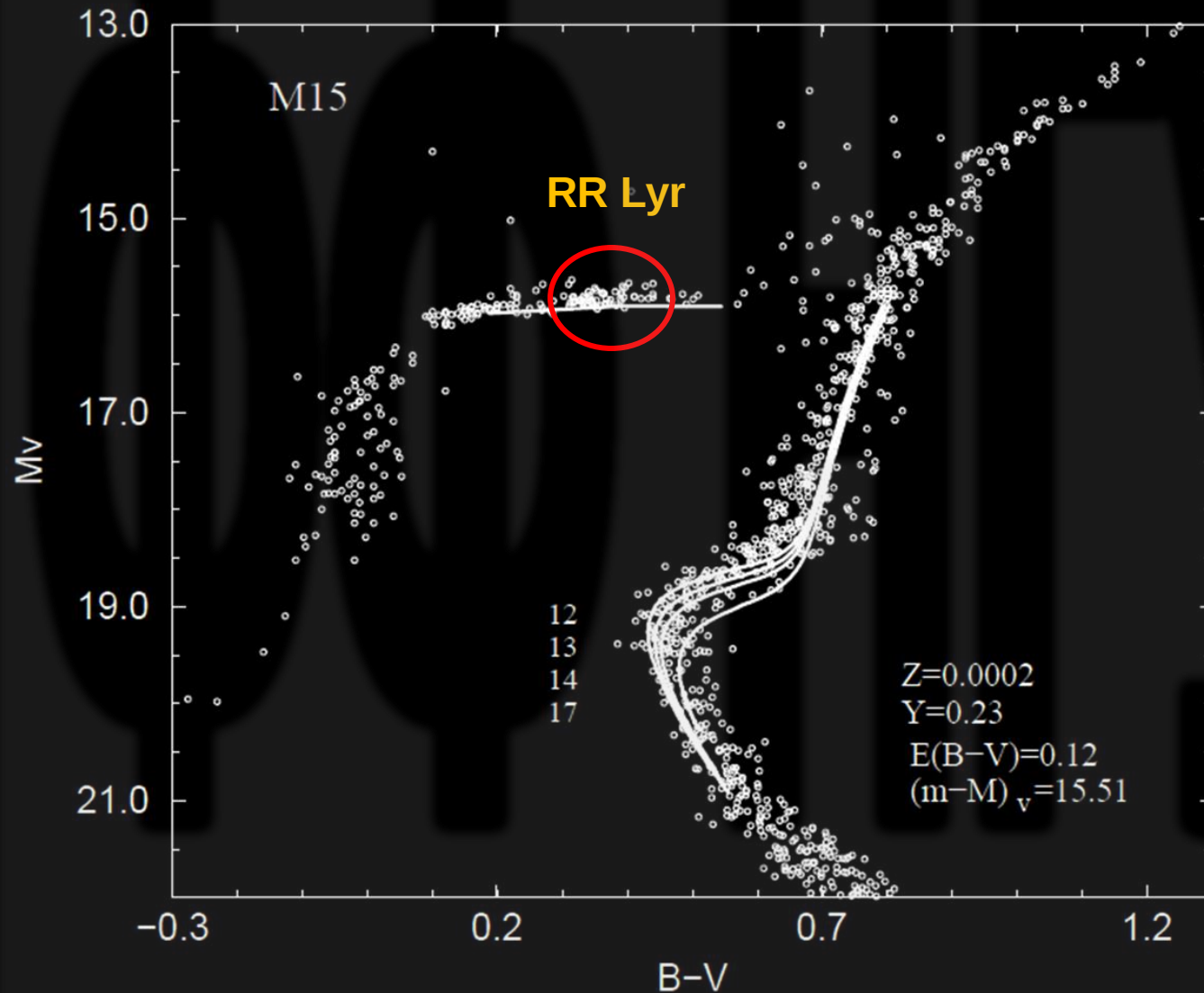
Возраст скопления 4.0 ± 0.6 Глет.



NGC2682 (M67)

Диаграмма цвет-зв. величина для скоплений

В шаровых скоплениях может содержаться от сотен тысяч до миллионов звезд.



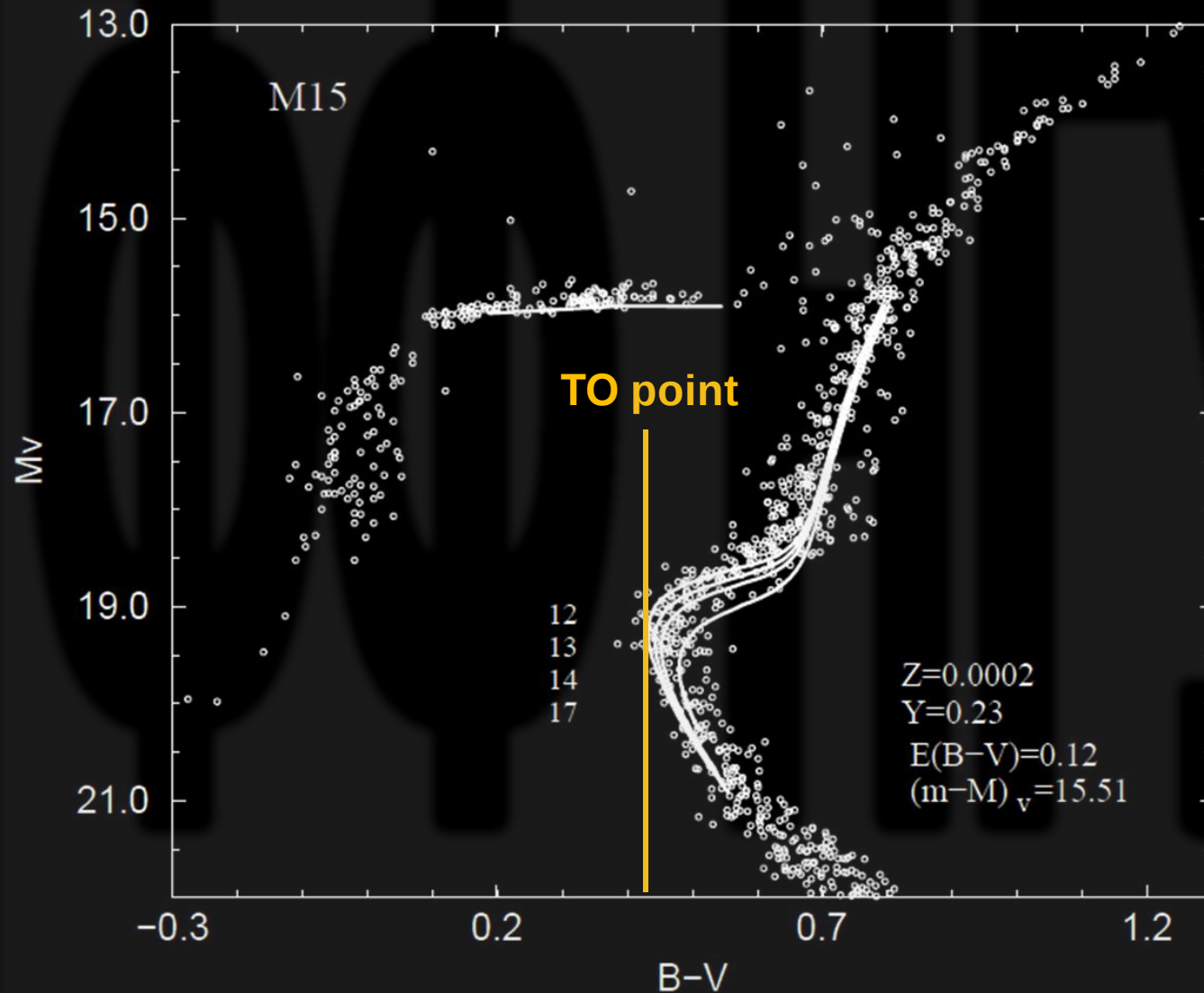
NGC7078 (M15)

Звезды типа RR Lyr в шаровых скоплениях



Диаграмма цвет-зв. величина для скоплений

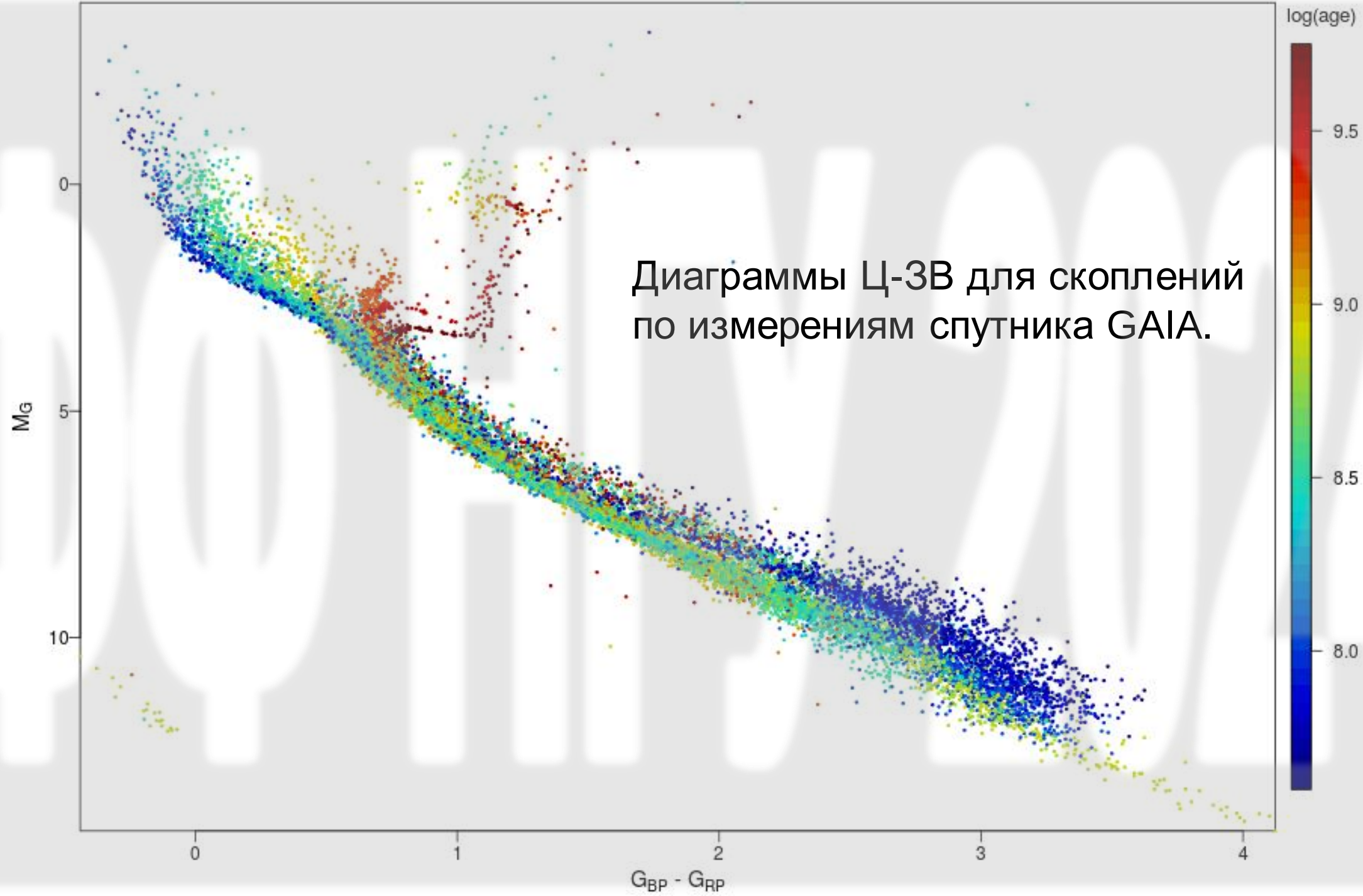
В шаровых скоплениях может содержаться от сотен тысяч до миллионов звезд.



По диаграмме Г-Р для скопления можно установить, звезды какой предельной массы еще находятся на ГП, и пользуясь моделями эволюции оценить возраст скопления.

Шаровые звездные скопления (ШЗС) – более старые структуры. Во время их формирования средняя концентрация тяжелых элементов в межзвездной среде была существенно ниже => низкая металличность звезд в ШЗС.

Возраст большинства ШЗС Галактики примерно одинаков – около 13 Глет.



Диаграммы Ц-ЗВ для скоплений
по измерениям спутника GAIA.

Рождение звезд

Процесс формирования звезд – один из фундаментальных и вопросов современной астрофизики. Большая часть ЭМ излучения, регистрируемая нашими телескопами, происходит из звезд, кроме того звезды – основная видимая составляющая галактик, источник тяжелых элементов во Вселенной из которых составлены планетные системы и, в конечном итоге – жизнь.

Для понимания механизма образования звезд необходимо учитывать множество процессов, таких как гравитация, турбулентное движение вещества, магнитные поля на различных масштабах, термодинамику и процессы переноса энергии, химию газо-пылевых облаков и т.д.

Все это делает описание процесса рождения звезд чрезвычайно сложным. Только в последнее время вычислительные мощности достигли уровня, когда моделирование образования звезд стало возможным, хоть и все еще с большим количеством упрощающих предположений и отбрасывая, как представляется сегодня, второстепенные факторы.

В то же время, развитие новых методов наблюдений и возможность получения данных практически во всем ЭМ спектре позволяет проводить сравнение результатов модельных расчетов с данными.

Рождение звезд

Гипотеза о формировании Солнца из вращающегося облака газа и пыли, центральная часть которого под действием гравитации коллапсирует в звезду, а из вещества диска образуются планеты была впервые высказана в 1734 году Emanuel Swedenborg и получила дальнейшее развитие в работах Канта и Лапласа. Эта идея до сих пор является базовой для понимания процесса образования звезд.

Несмотря на огромный прогресс, современное понимание процесса формирования звезд далеко от полного:

Образование молекулярных облаков. Звездообразование происходит в облаках размером десятки парсек и массой $\sim 10^6 M_{\odot}$ с существенными флуктуациями плотности (турбулентностью). Каков механизм образования облаков и неоднородностей в них?

Начальная функция масс. Из наблюдений следует, что НФМ имеет универсальный характер. Каковы причины этой универсальности?

Кратные системы. Какие факторы влияют на распределение образующихся звезд по множественности и по расстояниям между их компонентами?

И т.д. и т.п.

Межзвездное вещество

Основная составляющая (~70%) межзвездного вещества – водород в различных состояниях: H II (ионизованный), H I (нейтральный), H₂ (молекулярный). Большую часть оставшейся доли составляет гелий. На более тяжелые элементы приходится менее 3% массы.

Облака H I наблюдаются на длине волны 21 см (сверхтонкое расщепление – переворот спина электрона). Наблюдать облака молекулярного водорода напрямую очень сложно, обычно для этого используются колебательные и вращательные уровни возбуждения сопутствующих молекул (tracers), чаще всего CO, а также CN, OH и другие.

Гигантские молекулярные облака (ГМО) – огромные (десятки парсек) и холодные (T~10K) газопылевые комплексы с концентрацией ~10⁸ и полной массой 10⁵ – 10⁶ M_☉ с большими локальными неоднородностями.

Темные туманности – области ГМО с повышенной концентрацией 10⁹ и массой 10⁴ M_☉.

Глобулы (Bok globules, Bart Bok) компактные темные туманности с большой плотностью >10¹⁰ и сравнительно малой массой 1 – 1000 M_☉. Наблюдаются как в составе ГМО, так и изолированно.

Гигантские облака

Гигантский газо-пылевой комплекс в созвездии Киля.

10 light-years

4 parsecs

3 arcminutes

Гигантские облака

Гигантский газо-пылевой комплекс в созвездии Киля.

10 light-years

4 parsecs

3 arcminutes

η Car

Туманность "Homunculus"

"Finger of God"

Глобула

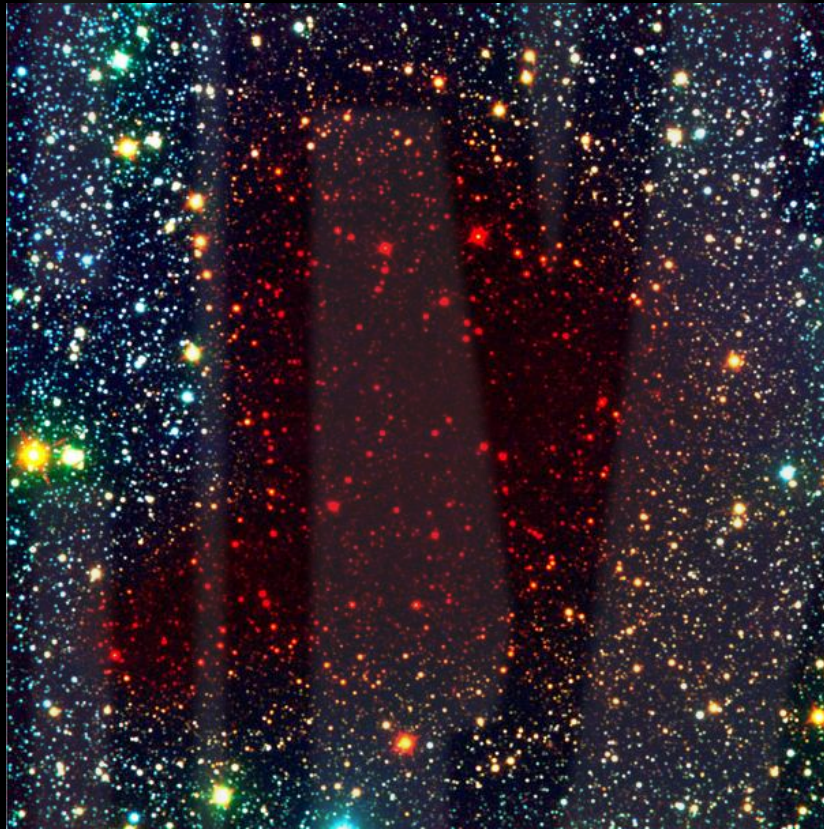
Глобулы

Туманность Барнард 68 – изолированная глобула. Размер кадра 7'x7'

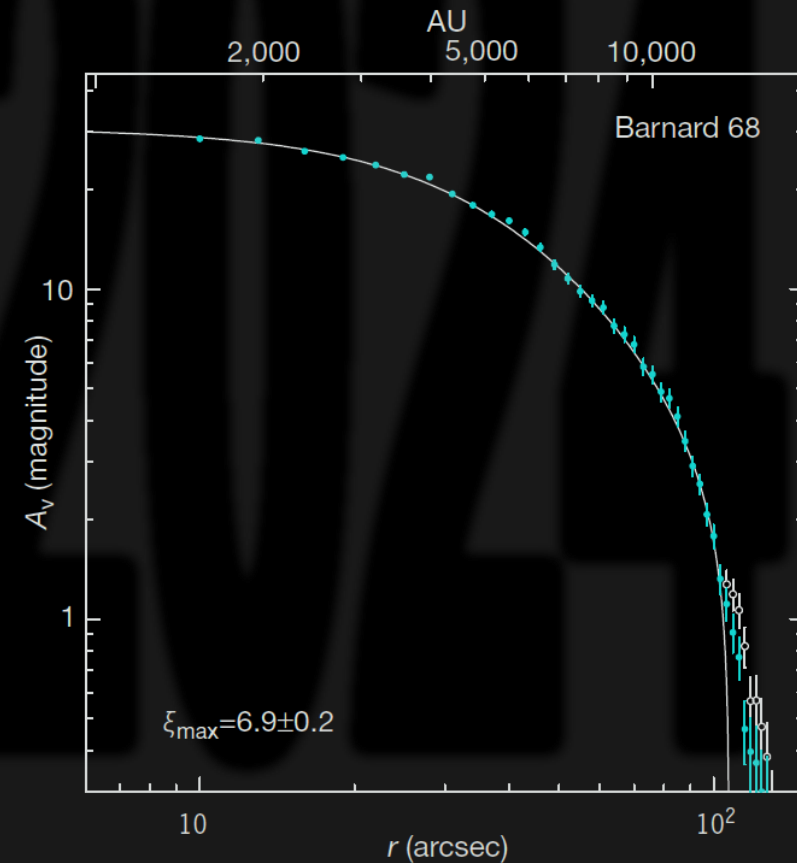
В видимом свете



В инфракрасном свете



Распределение лучевой плотности вещества в туманности Барнард 68.



Линейный размер туманности примерно соответствует размеру облака Оорта для Солнечной системы, масса облака – около $2M_{\odot}$.

Рождение звезд: критерий Джинса

Теорема вириала:

$$E = 2K + U$$

Предполагая сферическое облако постоянной плотности, гравитационная потенциальная энергия равна:

$$U \simeq -\frac{3}{5} \frac{GM_{\text{обл}}^2}{R_{\text{обл}}}; \quad M_{\text{обл}} = \frac{4\pi}{3} \rho_0 R_{\text{обл}}^3$$

Кинетическая энергия при этом, это тепловая энергия газа:

$$K \simeq \frac{3}{2} N k_B T_{\text{обл}} = \frac{3}{2} \frac{M_{\text{обл}}}{m_{\text{ср}}} k_B T_{\text{обл}}$$

Система является гравитационно связанной, если $E \leq 0$, то есть:

$$\frac{3M_{\text{обл}} k_B T_{\text{обл}}}{m_{\text{ср}}} \leq \frac{3}{5} \frac{GM_{\text{обл}}^2}{R_{\text{обл}}}$$

$$M_{\text{Дж}} = c \left(\frac{k_B}{Gm_{\text{ср}}} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{T^3}{\rho_0}}; \quad R_{\text{Дж}} = \left(\frac{k_B}{Gm_{\text{ср}}} \frac{T}{\rho_0} \right)^{1/2}$$

В таких оценках $c = c_{\text{Дж}} \simeq 5.5$.

В более полной теории

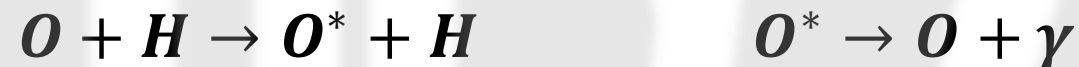
W.Bonnor и R.Ebert $c = c_{\text{БЕ}} \simeq 1.2$.

Рождение звезд: критерий Джинса

Таким образом, для эффективного коллапса вещества и образования протозвезды, исходное облако должно быть холодным и достаточно плотным.

$$M_{\text{Дж}} \simeq \left(\frac{k_B}{Gm_{\text{ср}}} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{T^3}{\rho_0}}$$

Молекулы и «тяжелые» элементы, входящие в состав облака имеют критически важное значение для охлаждения облака:



а также аналогичные процессы возбуждения и переизлучения с участием углерода и молекул CO.

В результате, по крайней мере на начальной стадии, сжатие можно считать изотермическим.

Рождение звезд: критерий Джинса

Таким образом, при выполнении критерия Джинса, облако теряет устойчивость и начинается коллапс. Пренебрегая вращением, турбулентностью, наличием галактического магнитного поля и отсутствием градиента плотности, можно построить (очень) простую модель изотермического коллапса, т.е. нет градиента давления (по сути свободное падение).

Уравнение движения для тонкого сферического слоя радиуса r :

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -G \frac{M_r}{r^2} \quad M_r - \text{масса внутри слоя}$$

Поскольку масса вещества внутри выбранной сферы не меняется, можем выразить ее через начальные значения плотности и радиуса:

$$M_{r0} = \frac{4\pi}{3} \rho_0 r_0^3$$

Перепишав $\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dr} \frac{dr}{dt} = v \frac{dv}{dr}$, уравнение движения может быть проинтегрировано:

$$\frac{v^2}{2} = \frac{4\pi}{3} G \rho_0 r_0^2 \left(\frac{r_0}{r} - 1 \right)$$

$$\frac{dr}{dt} = - \left[\frac{8\pi}{3} G \rho_0 r_0^2 \left(\frac{r_0}{r} - 1 \right) \right]^{1/2}$$

Рождение звезд: критерий Джинса

$$\frac{dr}{dt} = - \left[\frac{8\pi}{3} G \rho_0 r_0^2 \left(\frac{r_0}{r} - 1 \right) \right]^{1/2}$$

$$\frac{dr/r_0}{dt} = - \left[\frac{8\pi}{3} G \rho_0 \left(\frac{r_0}{r} - 1 \right) \right]^{1/2}$$

$$\frac{dx}{dt} = -A \left[\frac{1}{x} - 1 \right]^{1/2}, \text{ где}$$

$$x = r/r_0 \quad \text{и} \quad A = \left(\frac{8\pi}{3} G \rho_0 \right)^{1/2}$$

Дальнейшее интегрирование также может быть выполнено заменой $x = \cos^2 y$.

В результате получим **оценку** для времени коллапса:

$$t_{\text{сп}} = \left(\frac{3\pi}{32} \frac{1}{G \rho_0} \right)^{1/2}$$

Заметим, что время свободного падения оболочки не зависит от ее начального радиуса. То есть при равномерной начальной плотности вещества, в процессе коллапса плотность остается равномерной. Такой коллапс называется **гомологическим**.

Расчетная задача

Для примера рассмотрим типичные значения параметров молекулярного H_2 облака:

$$T = 10 \text{ К}, \quad n_0 = n_{H_2} \simeq 10^{10} \text{ м}^{-3}$$

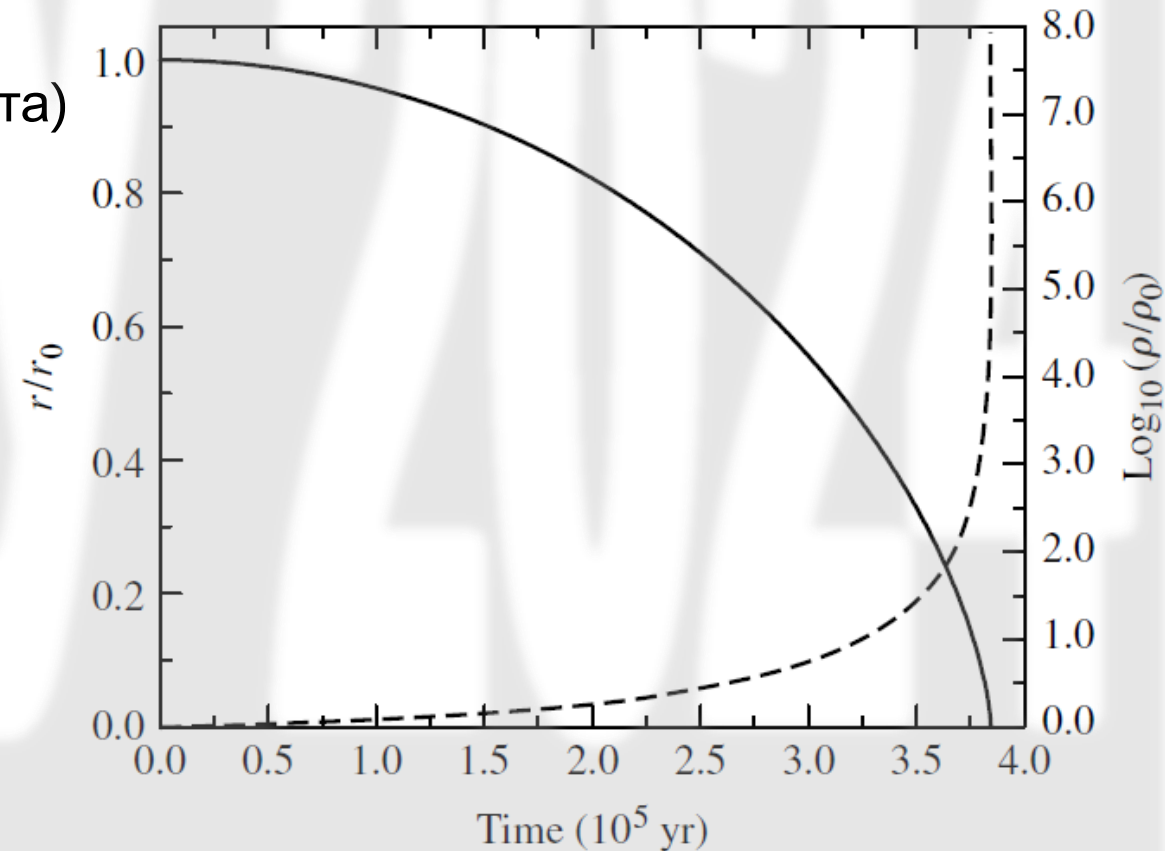
$$\rho_0 = n_{H_2} m_{H_2} \simeq 3 \times 10^{-17} \text{ кг м}^{-3}$$

Тогда масса Джинса (на самом деле Боннора – Эккерта) равна:

$$M_{\text{Дж}} = c_{\text{БЭ}} \left(\frac{k_B}{G m_{\text{ср}}} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{T^3}{\rho_0}} \simeq 1.5 M_{\odot}$$

Время свободного падения:

$$t_{\text{сп}} = \left(\frac{3\pi}{32} \frac{1}{G \rho_0} \right)^{1/2} \simeq 4 \times 10^5 \text{ лет}$$



Рождение звезд: фрагментация

В рассмотренном (сильно упрощенном) примере коллапс исходного облака будет продолжаться как целое, приводя, в конечном итоге, к рождению звезды произвольно большой массы, что противоречит наблюдениям. С другой стороны, из наблюдений следует, что звезды преимущественно рождаются группами. Можно сделать вывод, что на некоторой стадии коллапса происходит фрагментация облака на более мелкие коллапсирующие части.

В процессе коллапса плотность облака меняется на несколько порядков. Пока коллапс можно считать изотермическим, масса Джинса существенно падает. При наличии неоднородностей в исходном облаке это приведет к неустойчивости – выполнению критерия Джинса для фрагмента, и начнется его локальный коллапс.

$$M_{\text{Дж}} = c \left(\frac{k_B}{G m_{\text{ср}}} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{T^3}{\rho_0}}$$

Понятно, что с увеличением плотности, среда перестанет быть прозрачной для излучения и условие изотермичности нарушится. Можно рассмотреть другой предельный случай – адиабатное сжатие. Температура будет повышаться, что остановит дальнейшую фрагментацию облака.

Рождение звезд: фрагментация

Для идеального газа в термодинамическом равновесии при адиабатном процессе температура газа связана с его плотностью соотношением:

$$T \sim \rho^{\gamma-1}$$

где $\gamma = C_p/C_v$ – показатель адиабаты. Тогда

$$M_{\text{Дж}} \sim \frac{T^{3/2}}{\rho^{1/2}} \sim \rho^{(3\gamma-4)/2}$$

Для атомарного водорода $\gamma = 5/3$ и $M_{\text{Дж}} \sim \rho^{1/2}$, то есть **растет** с увеличением плотности, останавливая дальнейшую фрагментацию.

Конечно, эти два предельных случая являются грубым упрощением, в реальности, по-видимому, реализуются некоторые промежуточные условия. Тем не менее такое рассмотрение позволяет получить оценку на минимальное значение массы Джинса при фрагментации.

Рождение звезд: фрагментация

При коллапсе половина высвобождающейся гравитационной потенциальной энергии должно излучиться (теорема вириала):

$$\Delta E \simeq \frac{3}{10} \frac{GM_{\text{Дж}}^2}{R_{\text{Дж}}} \quad t_{\text{сп}} = \left(\frac{3\pi}{32} \frac{1}{G\rho_0} \right)^{1/2}$$

Тогда среднюю светимость за время коллапса можно оценить как:

$$L_{\text{сп}} \simeq \frac{\Delta E}{t_{\text{сп}}} \simeq \frac{1}{3} G^{3/2} \left(\frac{M_{\text{Дж}}}{R_{\text{Дж}}} \right)^{5/2}$$

Непрозрачное облако в (почти) термодинамическом равновесии излучает как (почти) АЧТ:

$$L_{\text{рад}} = 4\pi R^2 \varepsilon \sigma T^4$$

где параметр $0 \leq \varepsilon \leq 1$ характеризует степень отклонения от АЧТ:

Рождение звезд: фрагментация

Приравнивая $L_{\text{рад}} = L_{\text{сп}}$ получаем:

$$M_{\text{Дж, мин}} = \left(\frac{4\pi\epsilon\sigma}{G^{3/2}} R_{\text{Дж}}^{9/2} T^4 \right)^{2/5} \quad M_{\text{Дж, мин}} = 0.03 \left(\frac{T^{1/4}}{\epsilon^{1/2} \mu^{9/4}} \right) M_{\odot}$$

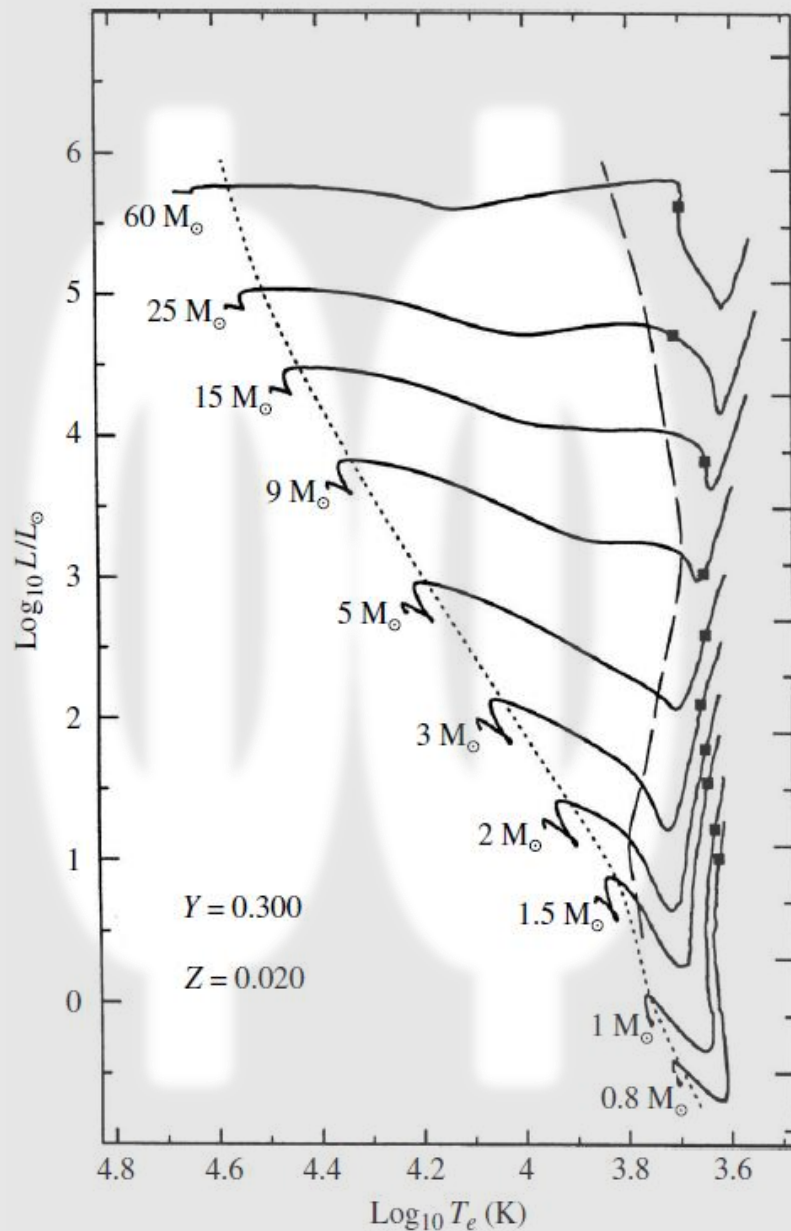
Полученные оценки слабо чувствительны к значениям параметров ϵ и T . Для облака атомарного водорода H I ($\mu \simeq 1$) и «разумных» значений $\epsilon \simeq 0.5$ и $T \simeq 1000$ К получаем:

$$M_{\text{Дж, мин}} = 0.03 \left(\frac{T^{1/4}}{\epsilon^{1/2} \mu^{9/4}} \right) M_{\odot} \simeq 0.25 M_{\odot}$$

Дальнейшее развитие модели должно учитывать присутствие магнитного поля, перенос энергии, турбулентность (момент импульса), «химию» облака, внешнее давление и т.д. Современные модели коллапса понижают оценку минимальной массы до $0.01 M_{\odot}$.

Переход к адиабатическому режиму существенно замедляет коллапс – оценка времени по свободному падению становится оценкой лишь начальной изотермической стадии.

Рождение звезд: треки Хаяши



На этапе перехода к адиабатическому режиму сжатия протозвезду уже можно наблюдать в инфракрасном свете со спектром АЧТ. Основной источник светимости – потенциальная энергия.

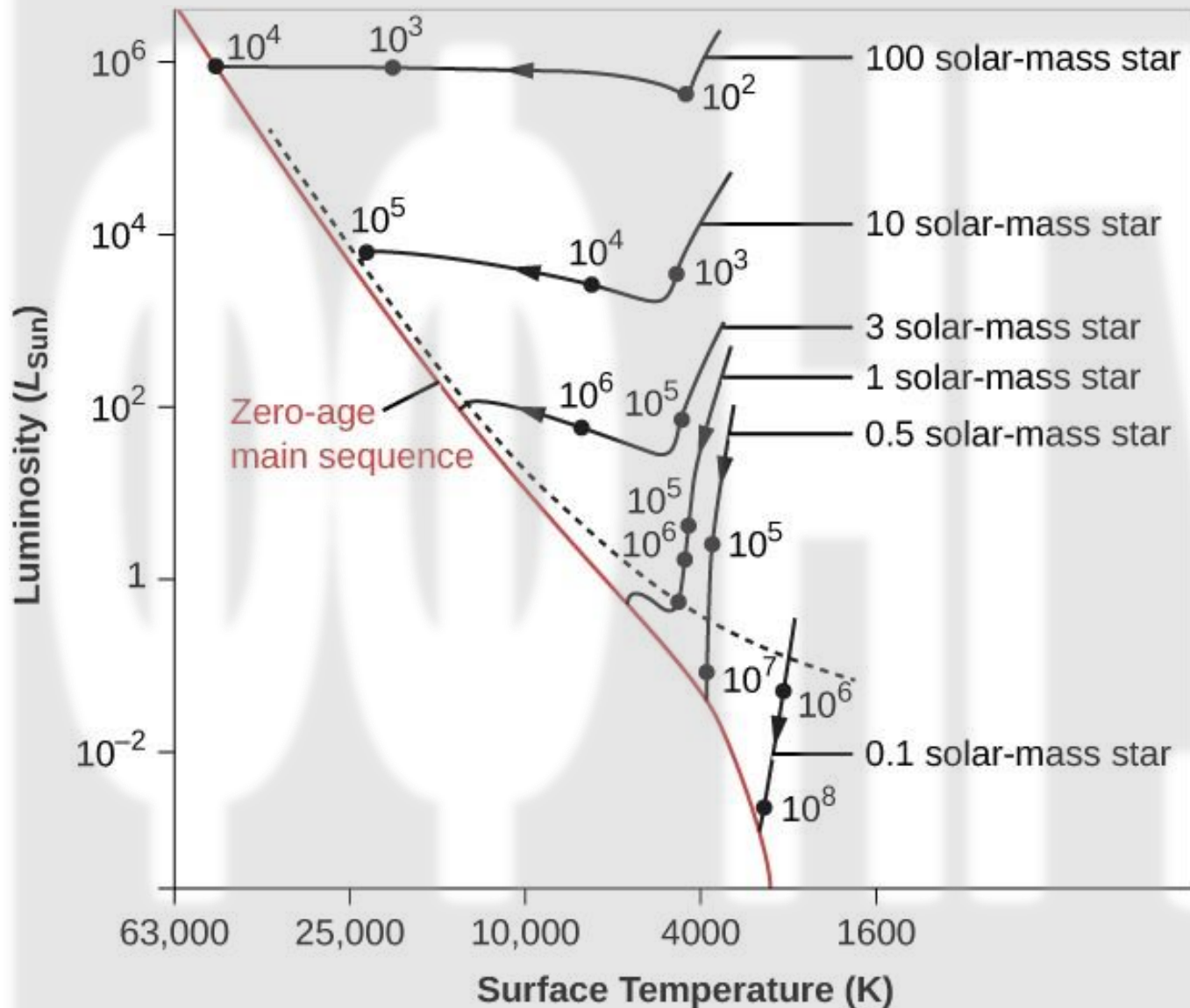
При дальнейшем сжатии и разогреве ядра, достигается температура, достаточная для начала термоядерного горения дейтерия (точки на треках), однако его вклад в светимость мал.

После этапа дальнейшего сжатия и разогрева ядра, достигается температура, достаточная для протекания **некоторых** реакций из ppI цепочки и реакции $^{12}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$ из CNO цикла.

После переходного этапа (цепочка сжатий и расширений, перестройка внутренней структуры) в ядре устанавливается стабильное горение водорода.

Звезда «вышла» на главную последовательность.

Рождение звезд: треки Хаяши



Детальные расчеты эволюции протозвезды с массой $1M_{\odot}$ дают время сжатия, согласующееся с оценкой временной шкалы Кельвина – Гельмгольца.

$$t_{\text{KH}} \simeq \frac{U_{\odot}}{L_{\odot}} \simeq \frac{GM_{\odot}^2}{R_{\odot}L_{\odot}} \simeq 30 \times 10^6 \text{ лет}$$

За время формирования звезды типа Солнце, сверхмассивные звезды успевают полностью сформироваться, пройти весь путь эволюции и взорваться, дополнительно обогатив среду тяжелыми элементами.

Протозвезда в глобуле В335



Протозвезда в глобуле В335

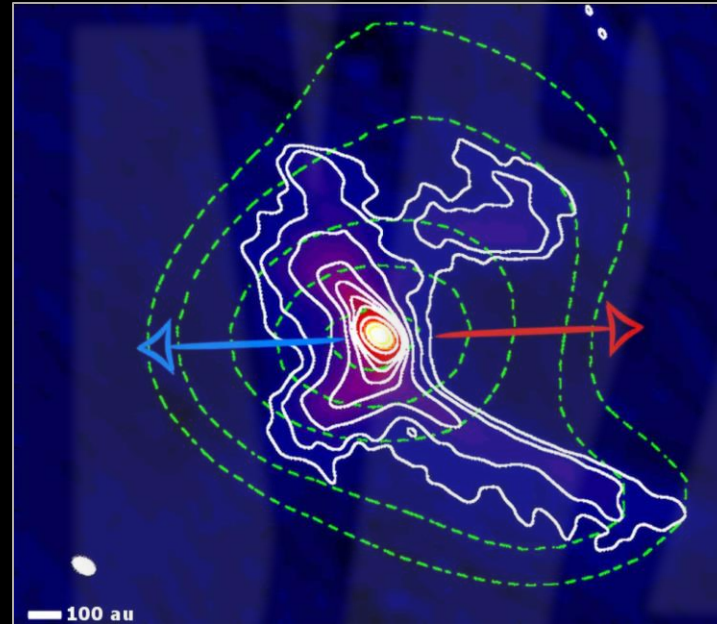
Темная туманность (глобула) Барнард 335 в Орле.

В видимом свете



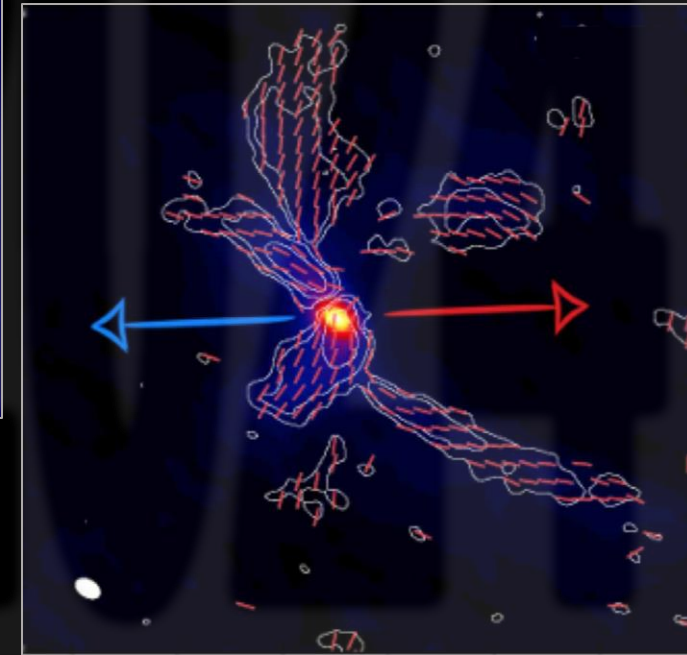
0.1 пк (20,000 а.е.)

В радиодиапазоне (1.9мм) с помощью
интерферометра ALMA



Объекты Хербига – Харо вдоль
оси вращения протозвезды.

Магнитное поле в
окрестности протозвезды



2,000 а.е.

50

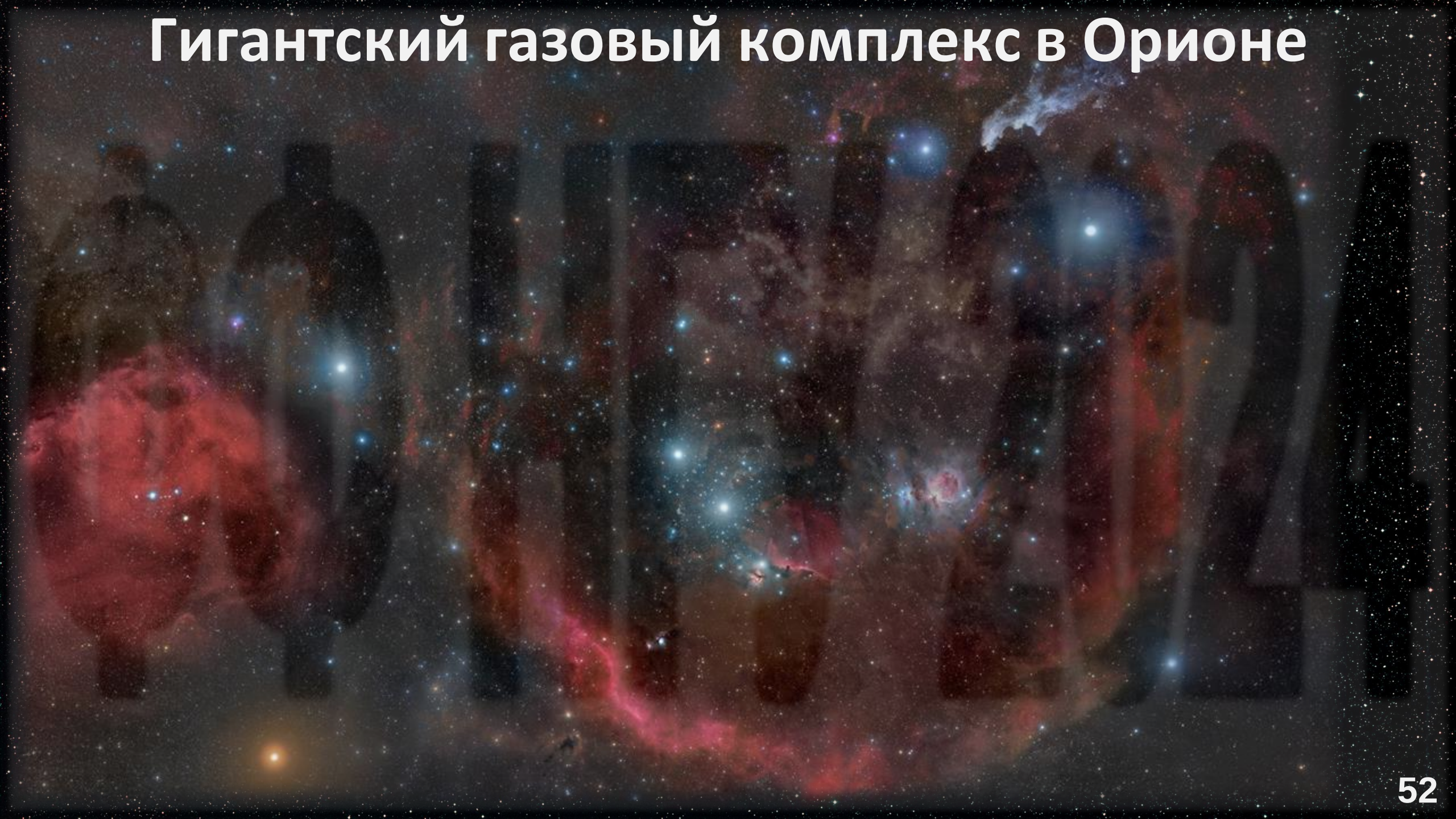
Рождение звезд: ОВ и Т ассоциации

По-видимому наблюдаются примеры рождения одиночных звезд в изолированных глобулах. Однако более типичным является рождение групп звезд в гигантских молекулярных облаках.

Ассоциации, как правило не связанных гравитационно звезд (10 – 100), и имеющих схожий химический состав и возраст, что указывает на общность их происхождения (из одного молекулярного облака).

Различают ОВ ассоциации, где большая доля звезд – массивные голубые гиганты спектральных классов О – В, и Т ассоциации – группы менее массивных молодых звезд.

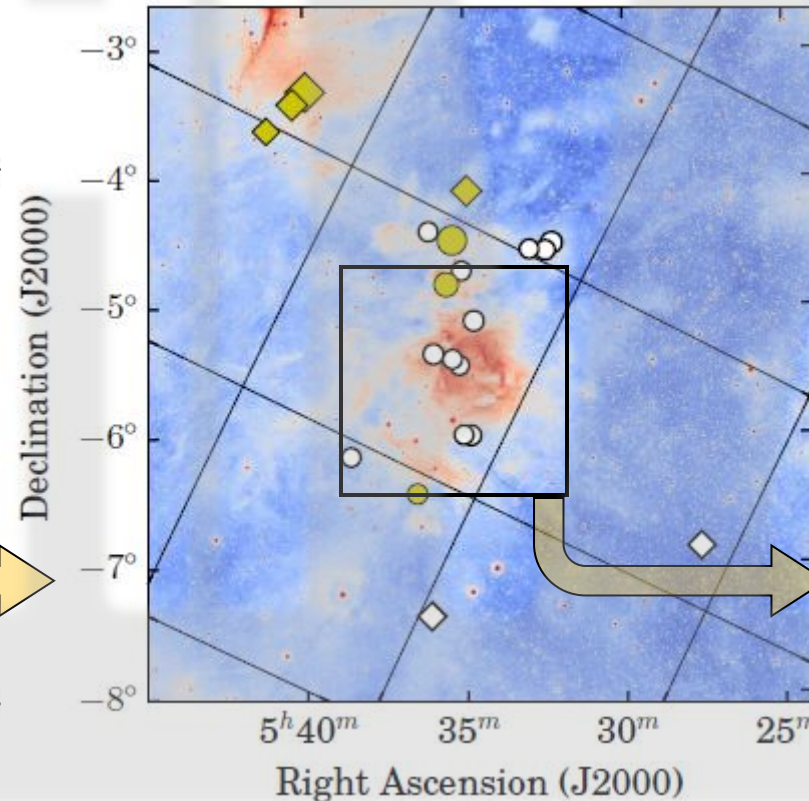
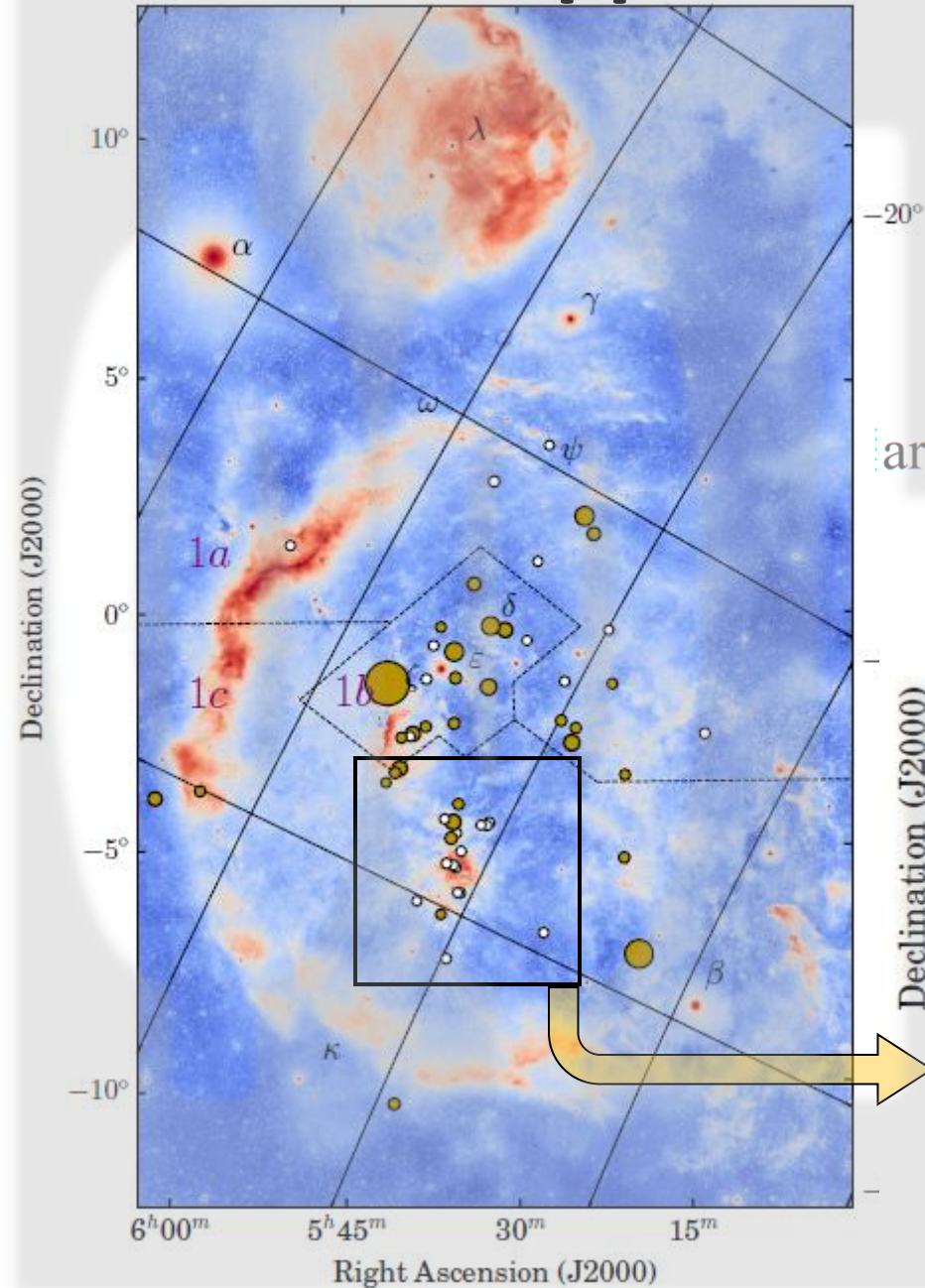
Гигантский газовый комплекс в Орионе



Рождение звезд: ОВ и Т ассоциации

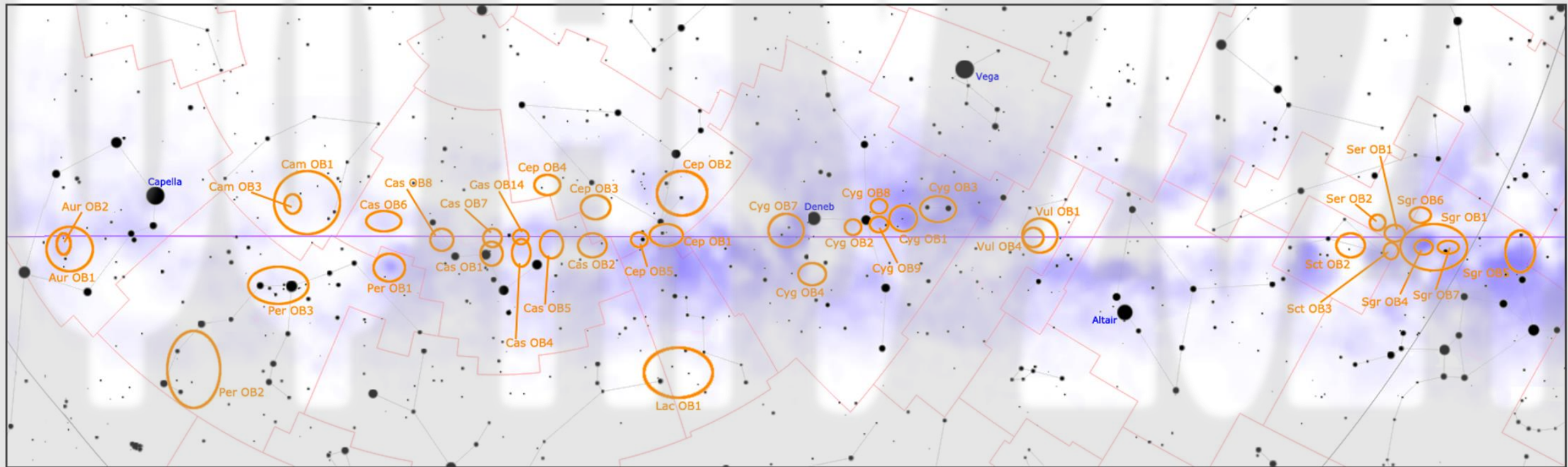
Ассоциация ОВ ассоциаций в Орионе.

arXiv:2207.00337



Рождение звезд: ОВ и Т ассоциации

Активный процесс звездообразования идет в плоскости нашей галактики (в спиральных рукавах), где содержится большое количество гигантских молекулярных облаков.

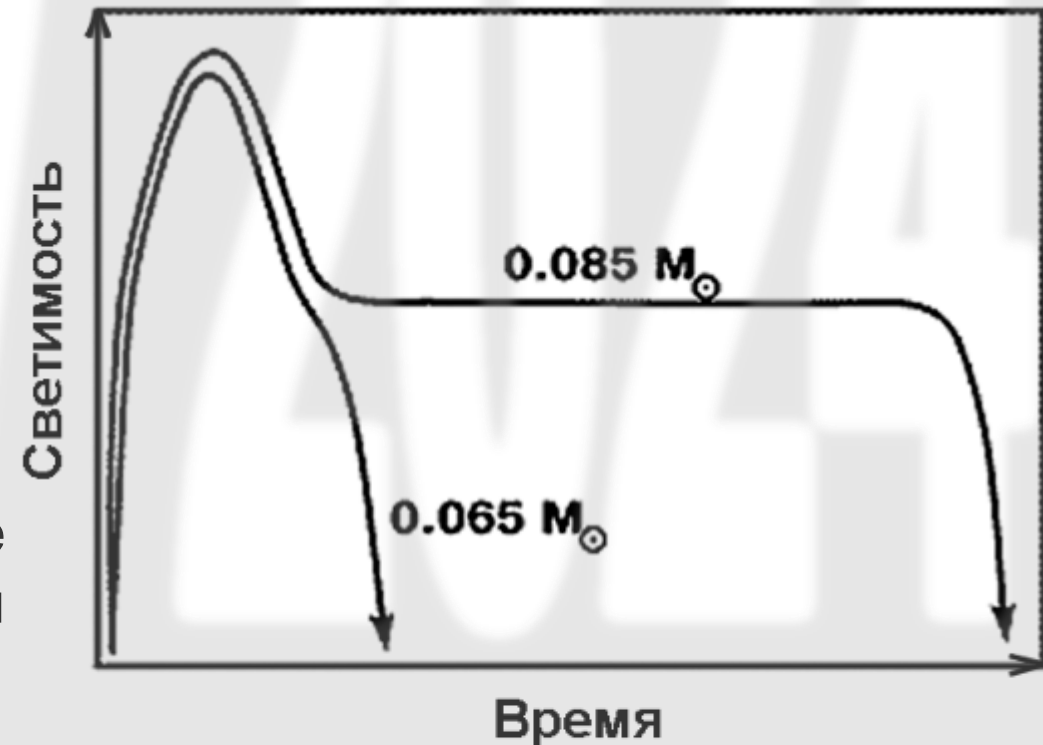


Рождение звезд: бурые карлики

Расчеты показывают, что для «звезд» с $M < 0.072 M_{\odot}$ условия для зажигания водорода в ядре не достигаются, хотя для масс $M > 0.013 M_{\odot}$ возможно горение дейтерия, а при $M > 0.060 M_{\odot}$ горение лития. Такие объекты называются **бурые карлики** и к категории звезд не относят.

Массы бурых карликов удобнее выражать не в единицах $M_{\odot}$, а в единицах массы Юпитера: $M_{\text{Юп}} = 0.001 M_{\odot}$. Таким образом по массе бурые карлики занимают промежуточное положение между планетами и звездами.

«Эволюция» двух протозвезд с массами чуть ниже и чуть выше нижнего предела, необходимого для начала горения водорода.



Протозвезды и протопланетные диски

Благодаря радиointерферометру ALMA, возможности изучения процессов формирования звезд и планетных систем вышли на новый уровень.

PROTOPLANETARY DISKS

RX J1615

Light-years from Earth: 600
Instrument: SPHERE

TW HYDRAE

Light-years from Earth: 194
Instrument: ALMA

HD 163296

Light-years from Earth: 600
Instrument: ALMA

HD 169142

Light-years from Earth: 380
Instrument: ALMA

Specimens exhibiting
rings, gaps, & spirals

AS 209

Light-years from Earth: 400
Instrument: ALMA

ELIAS 2-27

Light-years from Earth: 450
Instrument: ALMA

HD 135344B

Light-years from Earth: 450
Instrument: SPHERE

HL TAURI

Light-years from Earth: 450
Instrument: ALMA

WARNING: OBJECTS NOT TO SCALE

ФФНГУ 2024

