

## Раздел 2. Звезды

2.4. Понятие об эволюции звёзд.

Финальные стадии эволюции звезд.

# Стадия гравитационного сжатия (контракционная фаза)

- Звёзды образуются в результате гравитационной неустойчивости в молекулярных облаках (МО).
- Критерий *Джинса* (1902): среда неустойчива по отношению к малым возмущениям плотности с линейным масштабом

$$\lambda > \lambda_J = c_s \sqrt{\frac{\pi}{G\rho_0}} \quad c_s = \sqrt{\frac{\gamma \mathcal{R} T}{\mu}} \quad \begin{array}{l} \lambda_J - \text{Джинсовская} \\ \text{длина волны} \\ c_s - \text{скорость звука} \\ \mu - \text{средний молек.вес} \end{array}$$

МО:  $T = 10\text{-}30$  К,  $n \sim 10^2$  см<sup>-3</sup>, коллапс при  $M \sim 1000 M_{sun}$

- При сжатии  $\lambda_J$  уменьшается, возможна фрагментация масс.МО.

- Сжатие в режиме свободного падения, характерное время

$$t_f \approx \sqrt{\frac{1}{G\rho}}$$

Солнце:  $t_f \sim 100$  тыс.лет

- Объект зв. массы в стадии сжатия – *протозвезда*.
- Нагрев и свечение за счёт сжатия газа.
- $T_{\text{эфф}} \sim 4000 \text{ К}$ , ионизация H, велика непрозрачность, стадия Хаяши.

## Перенос энергии в звёздах

*Лучистый* перенос – поглощение и переизлучение фотонов.

- ✓ Фотоионизация-фоторекомбинация H, He I, He II, металлов.  
Ионизирующие фотоны  $h\nu \geq E_{\text{ion}}$
- ✓ Свободно-свободные (f-f) переходы в поле ионов.
- ✓ Поглощение-излучение в линиях (b-b переходы).

Перенос тепловой энергии *конвекцией*.

## Эволюционный трек -

положение модели звезды заданной  $M$  на плоскости  $L - T_{\text{эфф}}$  в разные моменты времени.

## Стадия Хаяши

Перенос энергии – конвекцией  
(*Hayashi 1961*).

Наблюдения: звёзды типа Т Тау.

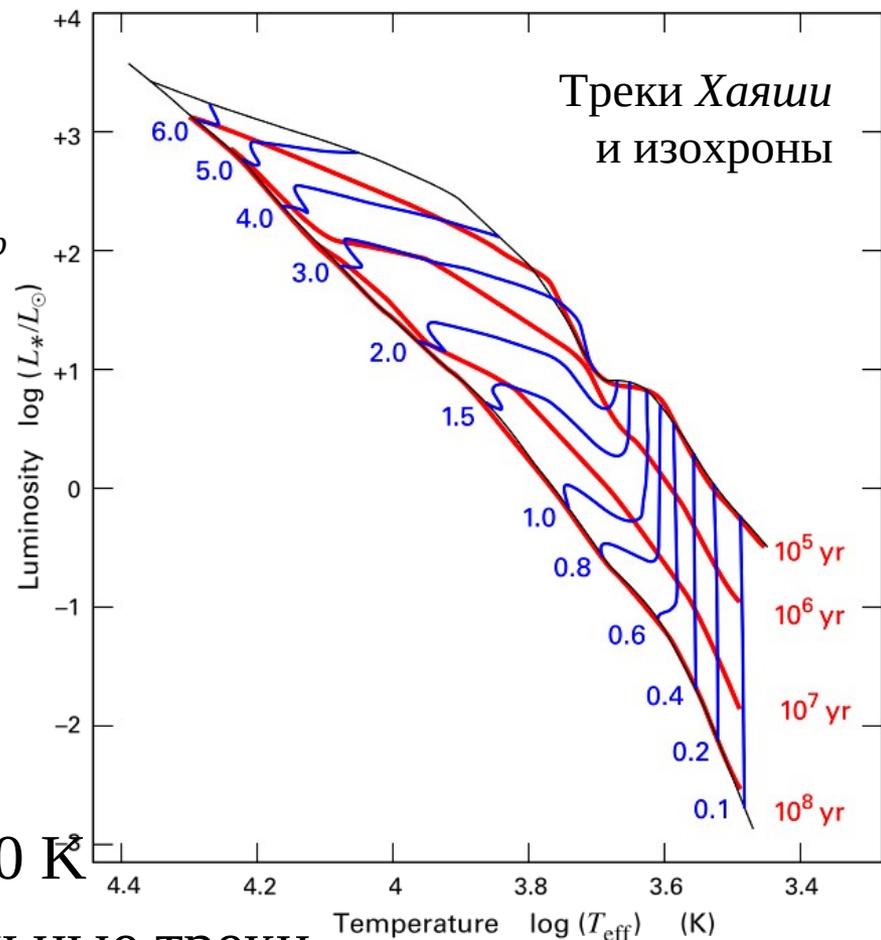
✓  $M < 1.5 M_{\text{sun}}$ ,  $T(\text{обол.}) = 3000\text{-}4000 \text{ K}$

Сжатие при  $T \sim \text{const} \rightarrow$  вертикальные треки.

Продолжительность – 75 млн.лет для Солнца.

✓ Чем больше  $M$ ,  $T$ , тем больше роль лучистого переноса.

$M > 3 M_{\text{sun}}$ , сразу образуется лучистое ядро.



## Эволюция на основе ядерных реакций

Сжатие  $\rightarrow T_c \sim 10^6$  К, **яд.реакции D, Li  $\rightarrow$  He**

Содержание D, Li мало, кратковременная стадия.

Единственная стадия ядерной эволюции у  
коричневых карликов ( $M < 0.08 M_{sun}$ )

**Стадия “горения” H = стадия ГП,  $M > 0.08 M_{sun}$**

$4p \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma + \nu$       Дефект массы  $\rightarrow$   
выделяется энергия = 26.73 МэВ

1.  $T_c \sim 10^7$  К,  $M < 1.2 M_{sun}$ , протон-протонный (p-p)  
цикл, характерное время  $\tau \sim 8 \cdot 10^9$  лет

2.  $T_c > 2 \cdot 10^7$  К,  $M > 1.2 M_{sun}$ , углеродный (CNO) цикл,  
C, N, O служат катализаторами,  $\tau \sim 2 \cdot 10^6$  лет

# Уравнения внутреннего строения и эволюции звезды на ГП

без магнитного поля и без потери массы

- Задано:  $M = \text{const}$ , начальные  $X_0, Y_0, Z_0$
- Определить функции от  $M_r$  и времени  $t$ :  
 $r(M_r, t), T(M_r, t), P(M_r, t), L(M_r, t), X(t), Y(t), Z(t)$ ,  
где текущая переменная  $M_r$  – масса шара радиусом  $r$

## ● Перенос энергии

*Лучистый перенос.*

- ✓ Фотоионизация-фоторекомбинация ионов металлов.
- ✓ Свободно-свободные переходы в поле ионов.
- ✓ Поглощение-излучение в линиях.

Поток излучения  $F \sim 1/(\text{коэффициент поглощения } \chi)$

*Конвекция.*

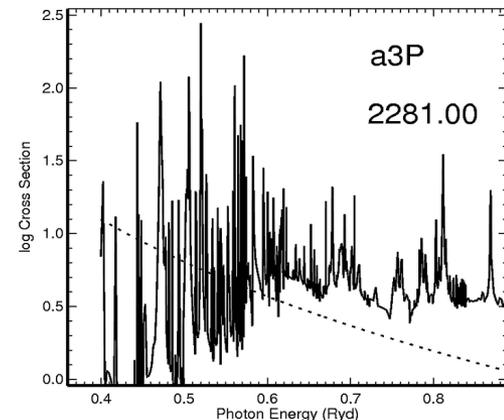
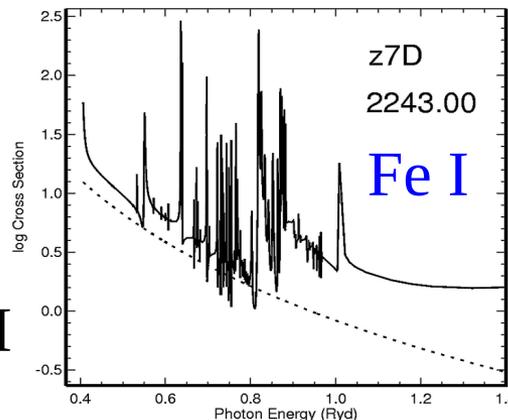
# Коэффициент поглощения

- Для перехода  $i - j$   
 $a_\nu$  [см<sup>2</sup>] – сечение поглощения фотона  $\nu$   
 $\chi_\nu = n_i a_\nu$  [см<sup>-1</sup>] – к-т поглощения на ед. объема  
 $\kappa_\nu = \chi_\nu / \rho$  [см<sup>2</sup>/г] – к-т поглощения на ед. массы
- На частоте  $\nu$  поглощают разные атомы:  
 $\chi_\nu$  - сумма по всем переходам всех атомов.

## Квантово-механические расчеты

- Opacity Project (OP): сечения фотоионизации для уровней атомов и ионов H-Si, S, Ar, Ca, Fe (база данных TOPBASE).

OP: сечения фотоионизации  
для двух уровней Fe I



- OPAL (*Rogers, Iglesias, 1992*): средний (Росселандов) к-т для смеси X, Y, Z (19 металлов),  $3.75 \leq \log T \leq 8.7$

$$\frac{1}{\bar{\chi}_{Ross}} = \frac{\pi}{4\sigma_R T^3} \int_0^{\infty} \frac{1}{\chi_\nu} \frac{dB_\nu}{dT} d\nu$$

- Формула *Kramers* (1923), учёт b-f и f-f переходов:

$$\kappa \approx 4 \times 10^{25} (1 + X) Z \rho T^{-3.5}$$

Поток излучения

$$F \sim 1/\chi$$

- $M < 1.2 M_{sun}$ , p-p цикл

- Ядро,  $\varepsilon(r) \sim T^6$  - *лучистый* перенос энергии.

Источники непрозрачности – ионы O, C, N, Fe.

- Оболочка – *конвективная* из-за уменьшения степени ионизации и роста к-та поглощения.

- $M > 1.2 M_{sun}$ , CNO-цикл

Ядро,  $\varepsilon(r) \sim T^{16-20}$  - конвективное, до 0.5 R.

Оболочка – в лучистом равновесии.

- $$\frac{dP}{dM_r} = \frac{GM_r}{4\pi r^4} \quad - \text{уравнение ГР} \quad P_g = \frac{\mathfrak{R} \rho T}{\mu(X,Y,Z)} \quad P_{rad} = \frac{aT^4}{3}$$

$$P = P_g + P_{rad}$$

- $$\frac{dr}{dM_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho} \quad - \text{ур-ие сохранения массы}$$

- $$\frac{dL_r}{dM_r} = \varepsilon_n + \varepsilon_g - \varepsilon_v$$

скорость генерации ядерной энергии,  $\varepsilon_n$   
 изменения тепловой энергии,  $\varepsilon_g$   
 уносится нейтрино,  $\varepsilon_v$

- $$\frac{dT}{dM_r} = -\frac{\nabla}{P} \frac{GM_r}{4\pi r^4}$$

$$\nabla = \nabla_r = \left( \frac{d \ln T}{d \ln P} \right)_r \quad - \text{в лучистой зоне}$$

$$\nabla = \nabla_a = \left( \frac{d \ln T}{d \ln P} \right)_s \quad - \text{в конвективной зоне}$$

- Изменение хим.состава в ядре

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\varepsilon_n}{E_H} \quad (\text{лучистое}) \quad \text{или} \quad \frac{L_c}{M_c E_H} \quad (\text{конвективное})$$

- $\frac{dP}{dM_r} = \frac{GM_r}{4\pi r^4}$  - уравнение ГР
  $P_g = \frac{\mathfrak{R} \rho T}{\mu(X,Y,Z)}$ 
 $P_{rad} = \frac{aT^4}{3}$ 
 $P = P_g + P_{rad}$

- $\frac{dr}{dM_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$  - ур-ие сохранения массы

- $\frac{dL_r}{dM_r} = \varepsilon_n + \varepsilon_g - \varepsilon_\nu$ 

скорость генерации ядерной энергии,  $\varepsilon_n$   
 изменения тепловой энергии,  $\varepsilon_g$   
 уносится нейтрино,  $\varepsilon_\nu$

- $\frac{dT}{dM_r} = -\frac{\nabla}{P} \frac{GM_r}{4\pi r^4}$ 

$\nabla = \nabla_r = \left( \frac{d \ln T}{d \ln P} \right)_r$  - в лучистой зоне  
 $\nabla = \nabla_a = \left( \frac{d \ln T}{d \ln P} \right)_s$  - в конвективной зоне

$$\nabla_r \sim \chi = \sum a_i n_i$$

$n_i$  по формулам Больцмана-Саха

$$\nabla_A = \left( \frac{d \ln T}{d \ln P} \right)_A = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$$

- Предположение ЛТР справедливо, если детальный баланс в каждом переходе в атоме.

- $\frac{dP}{dM_r} = \frac{GM_r}{4\pi r^4}$  - уравнение ГР
  $P = P_g + P_{rad}$ 
 $P_g = \frac{\mathfrak{R} \rho T}{\mu(X, Y, Z)}$ 
 $P_{rad} = \frac{aT^4}{3}$

- $\frac{dr}{dM_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$  - ур-ие сохранения массы

- $\frac{dL_r}{dM_r} = \varepsilon_n + \varepsilon_g - \varepsilon_\nu$ 

скорость генерации ядерной энергии,  $\varepsilon_n$   
 изменения тепловой энергии,  $\varepsilon_g$   
 уносится нейтрино,  $\varepsilon_\nu$

$E_H$  – выход энергии на одну реакцию

$M_c$  – масса конвективной зоны

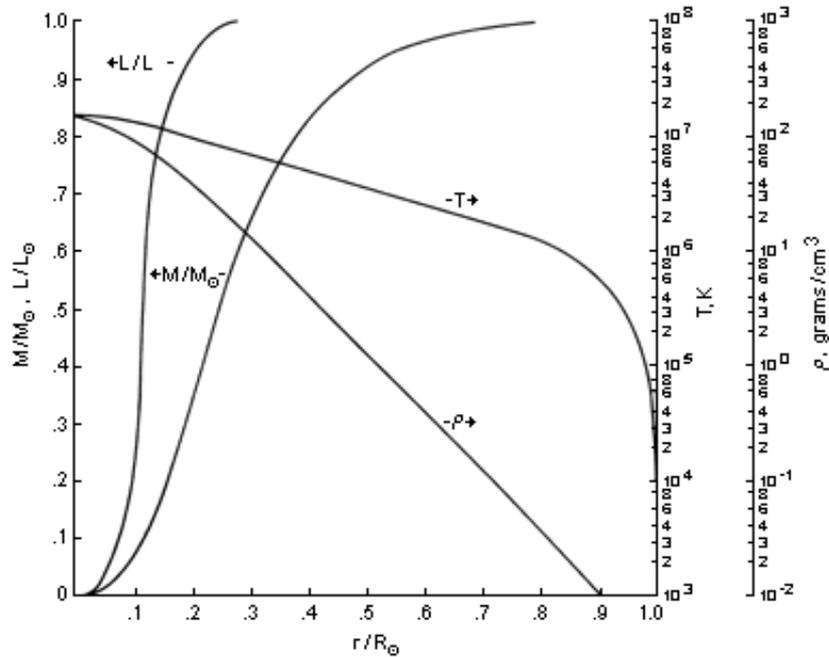
$L_c$  – полное выделение энергии в конв.зоне

- Изменение хим.состава в ядре

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\varepsilon_n}{E_H} \quad (\text{лучистое}) \quad \text{или} \quad \frac{L_c}{M_c E_H} \quad (\text{конвективное})$$

Решение уравнений даёт на время  $t$

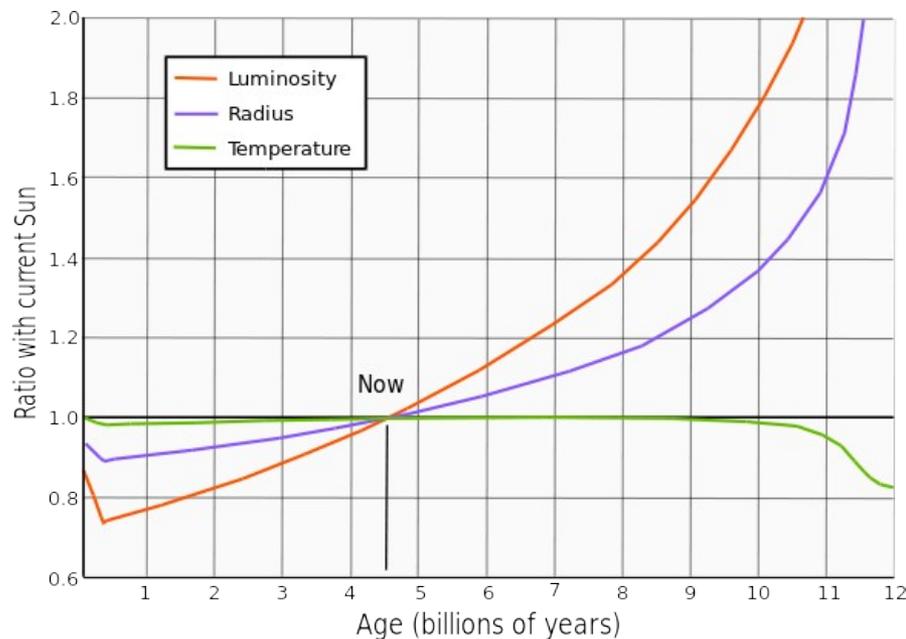
- модель звезды  $M(r)$ ,  $L(r)$ ,  $T(r)$ ,  $P(r)$ ,  $\rho(r)$
- фундаментальные параметры  $L$ ,  $R$ ,  $T_{эфф}$



Модель внутреннего строения Солнца  
для  $X = 0.708$ ,  $Y = 0.272$ ,  $Z = 0.020$

## Изменение параметров звезды на стадии ГП

Со временем уменьшение  $X \rightarrow$  рост  $\mu \rightarrow$  рост  $P(0,t)$ ,  $T(0,t)$ , градиент  $T \rightarrow$  рост  $L$ ,  $R$ , но медленный



Изменение солнечных  $L$ ,  $R$ ,  $T_{эфф}$   
в ходе эволюции

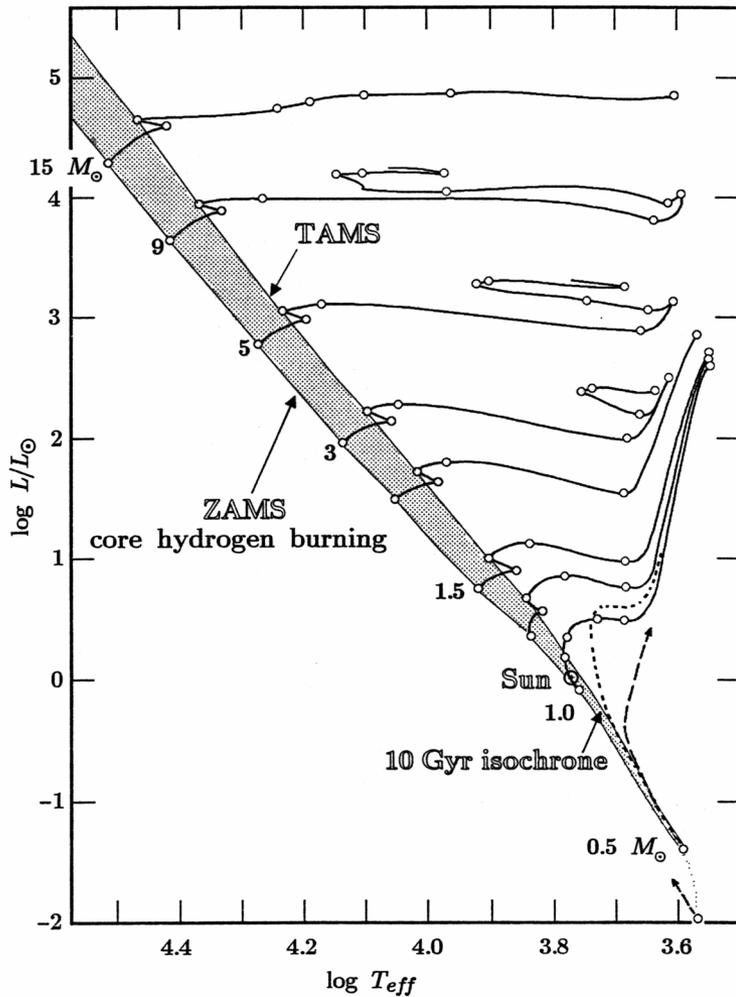
$$X_0 = 0.70; Y_0 = 0.28; Z_0 = 0.02$$

$$\tau = 4.6 \text{ Gyr}; X_c = 0.355$$

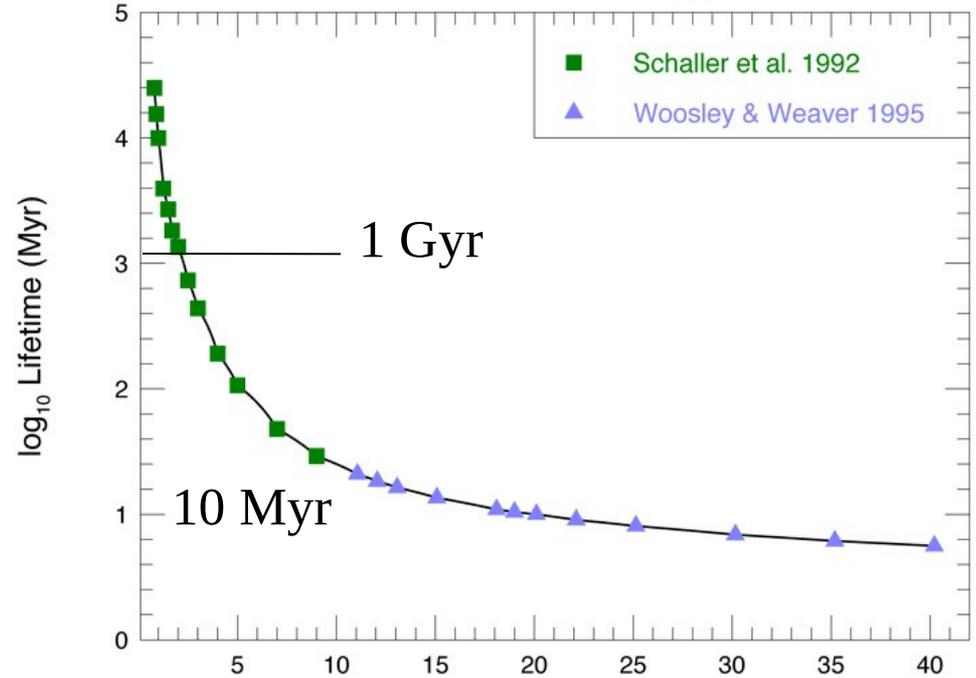
# Продолжительность стадии ГП

ZAMS (Zero Age Main Sequence):

TAMS (Terminal Age MS)



Расчеты  $\tau_{ГП}$



$$\tau_{MS} \sim 10 \frac{M}{M_{sun}} \left( \frac{L}{L_{sun}} \right)^{-1} \text{ Gyr}$$

Стадия ГП: 90 % жизни звезды.

# Эволюция после ГП зависит от массы звезды

$M < 2.3 M_{sun}$ , He ядро, вырожденный газ электронов

- Сжатие до образования слоевого источника  $4\text{H} \rightarrow \text{He}$ .

$M < 0.5 M_{sun} \rightarrow$  гелиевый БК.  
Не наблюдаются, т.к. стадия ГП  $>$  возраста Вселенной.

- Увеличение массы He ядра.

Расширение оболочки  $\rightarrow$  *красный гигант.*

- При  $M_{He} \approx 0.5 M_{sun}$ , гелиевые вспышки, вырождение снимается.
- $T = 2 \cdot 10^8$  К, горение He:  $3\ ^4\text{He} \rightarrow\ ^{12}\text{C}$   
Г-Р: *звезды горизонт.ветви гигантов (НВ).*

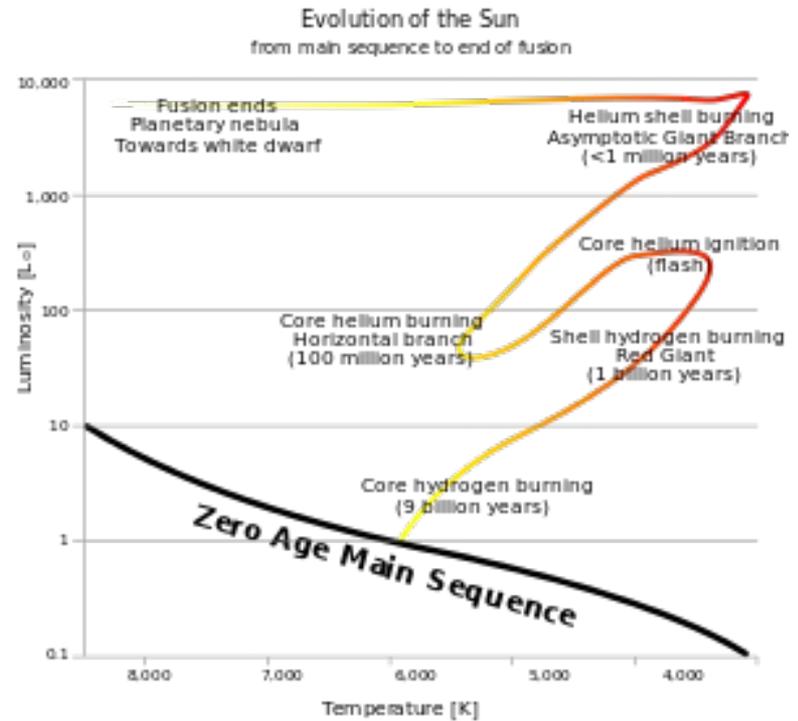
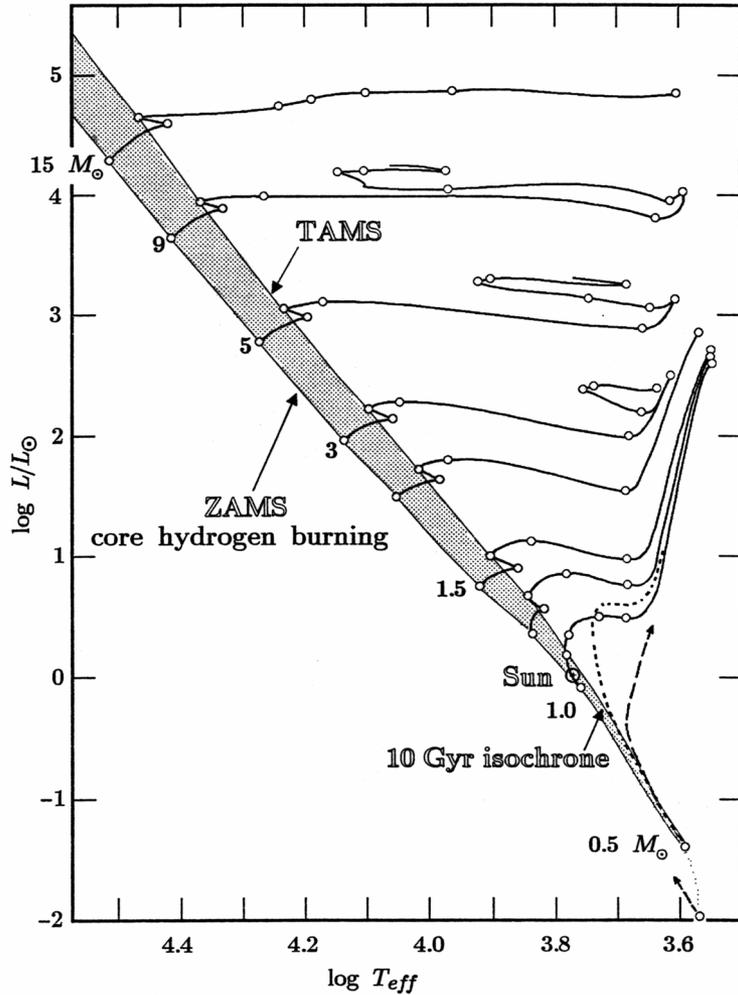
- конечная стадия эволюции -

С-О  
БК

Потеря массы,  
 $M_{He} < 0.5 M_{sun}$

He  
БК

# Эволюционные треки звезд разной массы и Солнца



- ГП: 9 Gyr  $\rightarrow$  He ядро
- слоевой H ист.: красный гигант, 1 Gyr
- He вспышки
- Горение He (HB)
- слоевой He ист.: красный сверхгигант
- C-O белый карлик

$$M \leq 2 M_{sun},$$

расчеты  
до He вспышек

## Эволюция после ГП, $2.3 - 8 M_{sun}$

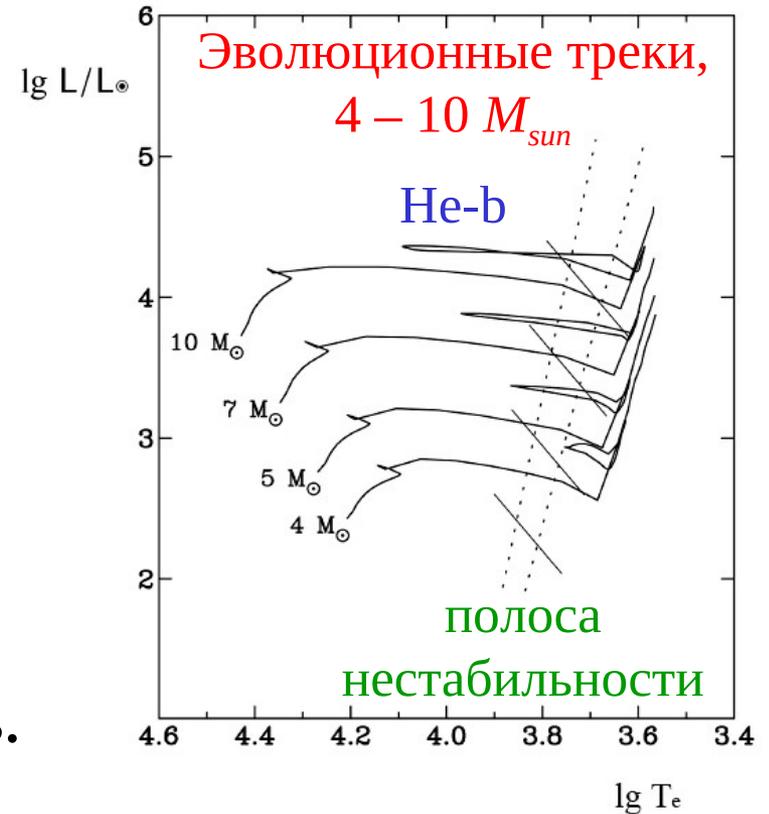
Гелиевое ядро не вырождено, сжимается до  $T_c = 2 \cdot 10^8$  К, слоевой источник исчезает, оболочка сжимается.

### Стадия горения He

Тройной  $\alpha$ -процесс



- ✓ Петли на диаграмме  $L - T_{\text{эфф}}$
- ✓ Г-Р: горизонт.ветвь гигантов  
 $\tau_{HB} = 100 \text{ Myr} (3 M_{sun})$
- ✓ Полоса неустойчивости:  
переменные пульсирующие зв.
  - цефеиды (прототип -  $\delta$  Cep ),
  - RR Lyr,
  - $\delta$  Sct, ...



Нанесены линии  
постоянного периода  
для цефеид

## Стадия двойного слоевого источника (асимптотической ветви гигантов, AGB)

- Вырожденное C-O ядро + He + H слоевые источники.
- Расширение оболочки, рост  $L$  → красный сверхгигант → интенсивный звездный ветер.
- Горение He в слое нестабильно → тепловые вспышки → медленный процесс нейтронных захватов (s-процесс) + сброс оболочек → обогащение м/з среды Ga – Bi + образование ПТ.

s-процесс:  ${}^A_Z X + n \rightarrow ({}^{A+1})_Z X, \beta\text{-распад} \rightarrow ({}^{A+1})_{(Z+1)} X + n \rightarrow \dots$

### Прямое наблюдательное подтверждение:

Звезды класса S — холодные гиганты с сильными линиями ZrO:

- линии технеция Tc I 4238 и 4262 Å (*Merrill* 1952, ApJ, 116, 21),
- технеций ( $Z = 43$ ) произведен в самой звезде, т.к.

*max* время полураспада  $\sim 4 \cdot 10^6$  лет (изотоп  ${}^{98}\text{Tc}$ ).

## Финальная стадия

зависит от количества сброшенной массы.

Предельная масса, при которой давление вырожденного газа может сдерживать тяготение - предел Чандрасекара (1931 год):  $M_{Ch} = 1.46 M_{sun}$  (He)

$M_{CO} < 1.4 M_{sun} \rightarrow$  C-O белый карлик.

$M_{CO} \geq M_{Ch} \approx 1.4 M_{sun} \rightarrow$  взрывное горение C  $\rightarrow$   
полное разрушение звезды

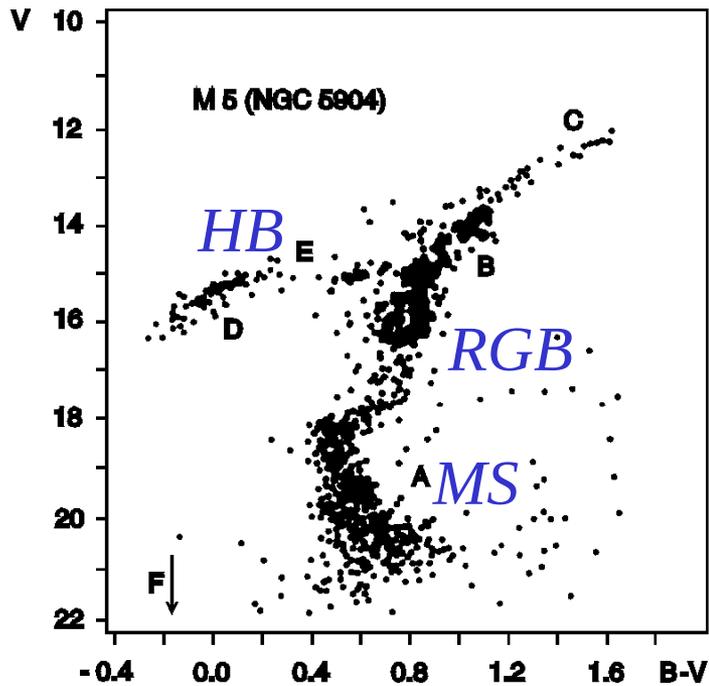
## Белые карлики (БК)

- Конечная стадия эволюции звёзд с  $M < 8 M_{sun}$
- Светят за счёт тепловой энергии атомных ядер.  
 $T_{эфф} \sim 200000 \text{ К} \rightarrow 5000 \text{ К}$ ,  
время остывания  $\sim$  млрд. лет,  $L \sim 10^{-3} L_{sun}$  через 1 Gyr
- Плотность и давление определяются свойствами вырожденного электронного газа,  $P_e \sim \rho^{4/3}$  (релятивист.)
- $M < 1.4 M_{sun} = M_{ch}$ .

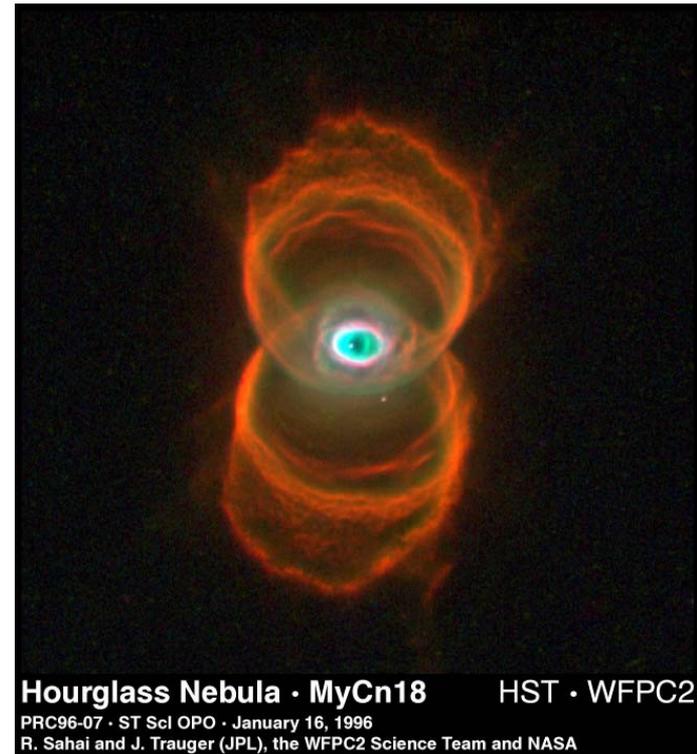
### Наблюдения:

- 3-10 % населения Галактики
  - DA – водородные атмосферы
  - DB – гелиевые атмосферы
- ← содержание металлов мало из-за гравитац. осаждения

# Другие наблюдательные проявления эволюции звёзд



Шаровое скопление,  
возраст  $\sim 13$  Gyr,  
сохранились только  
звёзды с  $M < M_{sun}$   
*HB* – стадия горения He.



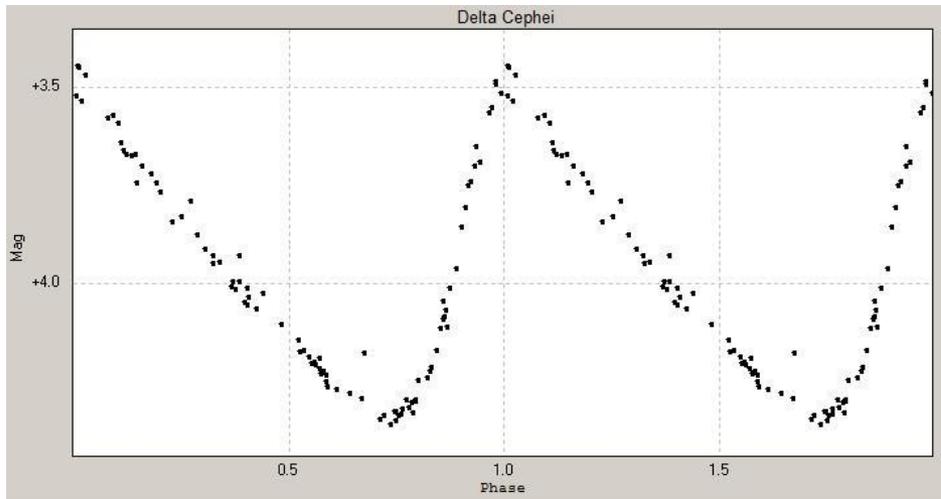
Планетарная туманность.  
Несколько He вспышек и  
сбросов оболочки.

# Цефеиды – F-G сверхгиганты, стадия горения He в ядре

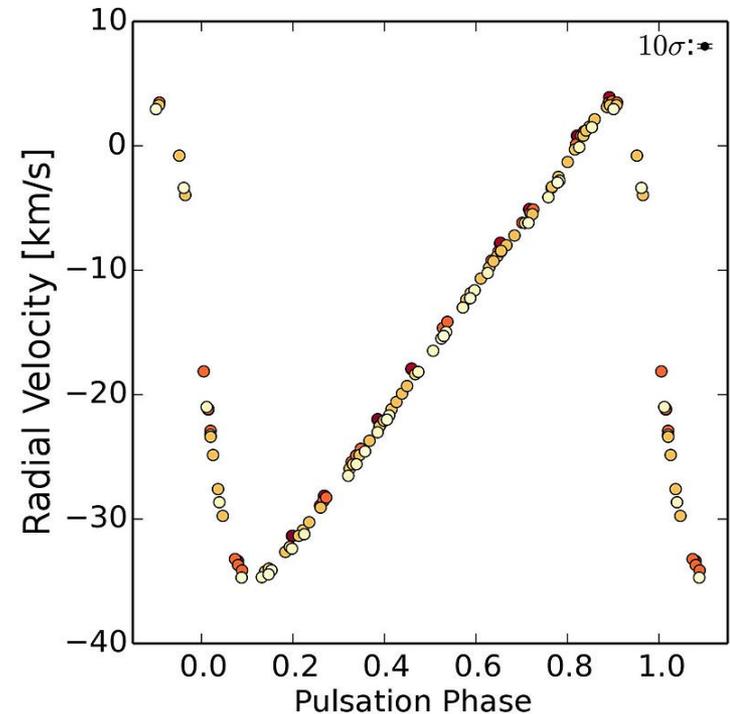
Классические - в тонком диске и типа W Vir - в гало

Переменность блеска:  $\Delta m = 0.5 - 1 \text{ mag}$   
лучевой скорости:  $\Delta v \sim \text{десятки км/с}$  ] С одним периодом  
1 – 70 суток

Причина переменности – изменения радиуса (пульсации) и  $T_{\text{эфф}}$



Кривые блеска и луч. скорости  
 $\delta$  Сер ( $P \approx 5.4$  сут)



Мах блеска  $\sim$  мах скорость расширения, мах  $T_{\text{эфф}}$

# Зависимость

## «период-светимость» цефеид



Закон Ливитт  
(H. S. Leavitt)  
открыт в 1908 г.  
по цефеидам  
в ММО

Позволяет определять расстояние!

Измеряем  $V$  и период  $P \rightarrow M_v \rightarrow d$

## Теория пульсаций цефеид (С.А. Жевакин, 1958)

Механизм раскачки радиальных колебаний связан с зоной частичной ионизации He II.

В глубоких слоях  $I_v \approx B_v$  и поток

$$Hv(\tau) = -\frac{1}{3\chi\nu} \frac{dB_v}{dT} \frac{dT}{dz} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \chi_\nu - \text{К-Т} \\ \text{поглощения} \end{array} \right.$$

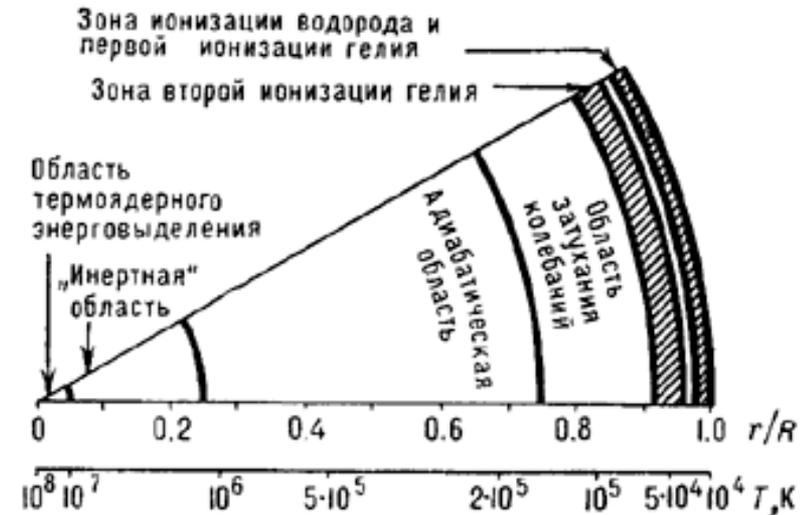
Зона частичной ионизации He II

Сжатие  $\rightarrow \Delta T$  меньше, чем в соседних областях, из-за ионизации  $\rightarrow$  рост непрозрачности  $\rightarrow$  задержка потока энергии.

Расширение  $\rightarrow$  передача энергии внешним слоям.

$T_{\text{эфф}} > 7500 \text{ К}$ : зона He II близко к пов-ти,

$< 5500 \text{ К}$ : конвекция препятствует пульсациям.



## Строение звезды

$$T_{\text{эфф}} = 6700 \text{ К}, R = 5 R_{\text{sun}}$$

He II  $\leftrightarrow$  He III:

$T = 35000 - 60000 \text{ К}$ ,

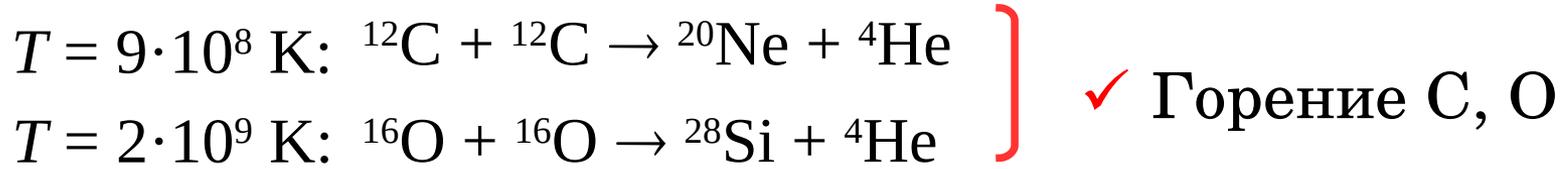
на глубине  $0.1 R$

Полоса

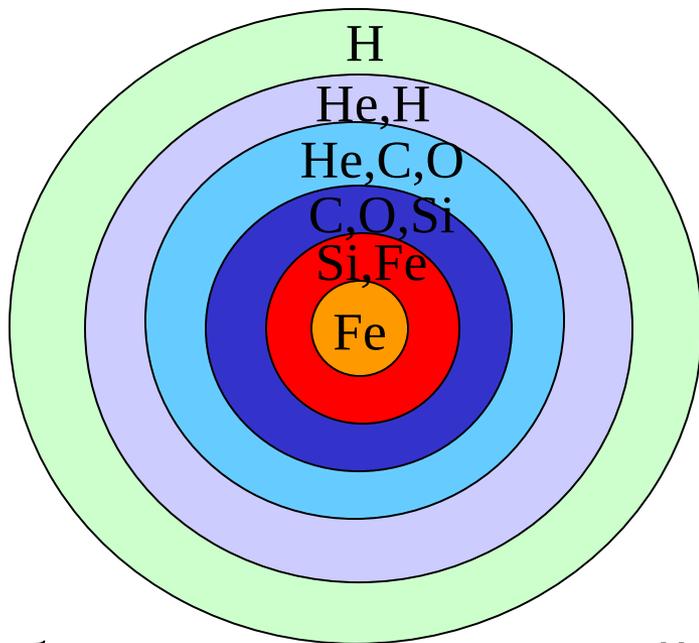
нестабильности

# Эволюция после ГП, $> 8 M_{sun}$

Горение He  $\rightarrow$  невырожденное C-O ядро, сжатие  $\rightarrow$



$\checkmark$   $\alpha$ -процессы:  ${}^{20}\text{Ne} + \alpha \rightarrow {}^{24}\text{Mg} + \alpha \rightarrow \dots {}^{40}\text{Ca}$

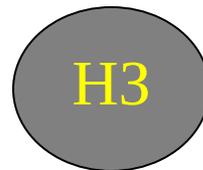


области ядерных реакций  
в ходе эволюции  
(масштаб не соблюден)

$\checkmark T = 3.5 \cdot 10^9 \text{ K}$  -

ядерное статистическое равновесие,  
доминируют ядра с max энергией  
связи - группа Fe.

$\checkmark$  гравитационный коллапс (секунды),  
сброс оболочки



или



SN II

Взрывообразный сброс оболочки и её эволюция наблюдаются как явление **SN II (core collapse SN)**:

- Блеск: резкое (сутки) увеличение на  $\sim$  десятков зв.вел.
- Спектр: эмиссионные линии H I
- Спектр: скорость разлёта  $\sim 10^4$  км/с
- Энергия взрыва  $\sim 10^{51}$  эрг (кинет. энергия + излучение).
- Обогащение м/з среды хим. элементами до  $Z = 92$ .  
 $Z > 30$  — нуклеосинтез в **r-процессе** ( $n_n \geq 10^{28}$ ,  $\tau_n < \tau_\beta$ ):



SN II: частота вспышек - 3 / 100 лет

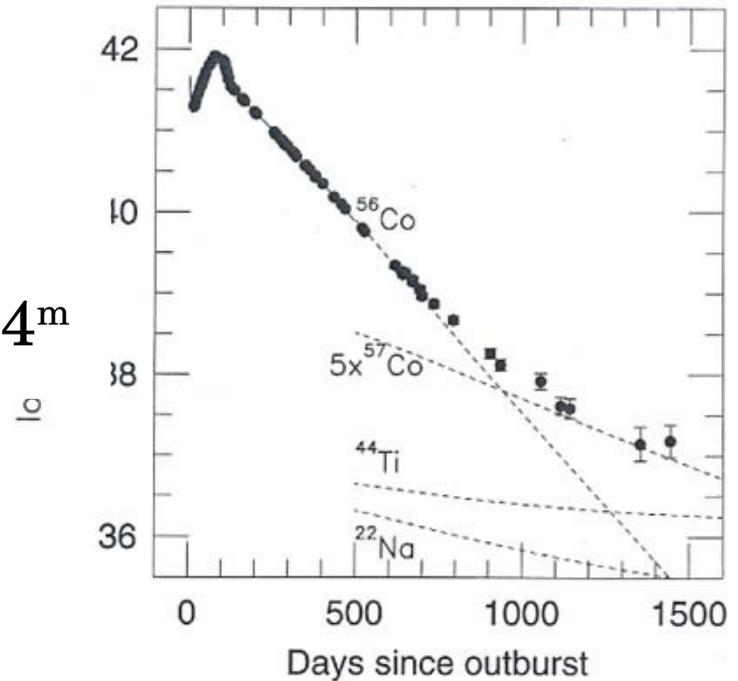
SN 1987A (23.02.1987, БМО)

$V_{\max} = 3^m$ ,  $M_V = -15.5^m$

предшественник — ВЗ I,  $V = 12.24^m$

$M > 8 M_{\text{sun}}$ , последняя стадия:

- ✓ Нейтронная звезда,  
если  $1.4 M_{\text{sun}} < M_{\text{Fe}} < 3 M_{\text{sun}}$ .
- ✓ Чёрная дыра,  
если  $M_{\text{Fe}} > 3 M_{\text{sun}}$ .



Болометрическая кривая блеска  
SN 1987A. Указан вклад  
радиоактивных изотопов.

*Suntzeff+1992*

## Нейтронные звезды (НЗ)

- нейтронизация во время ГК:  $p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$
- нейтронный газ – вырожденный,  $\rho = 10^{14} \text{ g/cm}^3$ ,  $n$  не распад.
- теоретически:  $M = 0.1 - 2.5 M_{\text{sun}}$ ,  $R \sim 10\text{-}20 \text{ км}$

Предсказаны: *Ландау* (1932), *Vaade, Zwicky* (1934)

Открыты: *Bell, Hewish* (1967) как **пульсары**

– импульсные источники радиоизлучения;

НЗ в двойных  $\rightarrow$  рентген. пульсары (*Giacconi+1971*)

В силу законов сохранения  
большие скорости вращения,  
сильные магн. поля.

$$\left. \begin{aligned} P &= 1.56 \text{ мс} - 4.3 \text{ с} \\ B &= 10^{12} - 10^{13} \text{ Гс} \\ T_{\text{эфф}} &= 0.5 - 2 \text{ млн.К} \end{aligned} \right\}$$

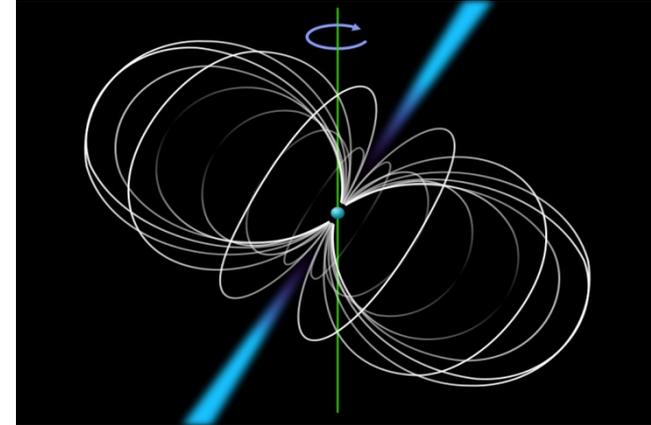
# Пульсары

Излучение НЗ сильно анизотропно, испускается в узких конусах вдоль оси магн. поля.

## *Почему импульсное излучение?*

Наблюдатель видит П. лишь в тот момент, когда конус излучения направлен на него.

Период повторения импульсов излучения = период вращения НЗ.



**Радиопульсары:** излучение за счет энергии вращения.

→ замедление вращения НЗ, удвоение  $P$  за 2000 лет – 8 млн.лет

**Рентген. пульсары:** за счет грав.энергии аккрецируемого газа.

Передача момента импульса НЗ ведет к ускорению вращения.

# Чёрные дыры (ЧД)

Горизонт событий - граница области, которую не могут покинуть фотоны.

Обнаружение

- Одиночная ЧД: по эф-там грав. микролинзирования (случайно).
- В двойных (рентгеновских) системах кривая лучевых скоростей «оптической» звезды →

функция масс  $f(M) = \frac{M_{BH}^3 \sin^3 i}{(M_{vis} + M_{BH})^2}$

Если  $M_{BH} > 3 M_{sun}$ ,  
то кандидат в ЧД.

Сверхмассивная ЧД –

не связана с эволюцией звёзд!

- Event Horizon Telescope, April 10, 2019  
Область около чёрной дыры  
в центре галактики М87.

$$M = 6 \cdot 10^9 M_{sun}$$

