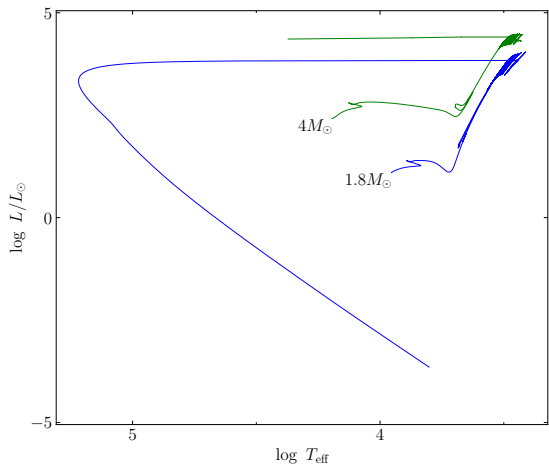


Нелинейные пульсации красных гигантов

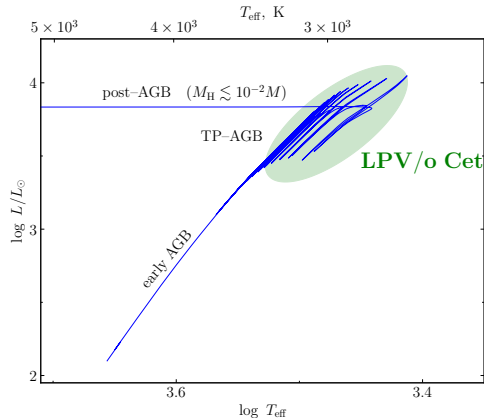
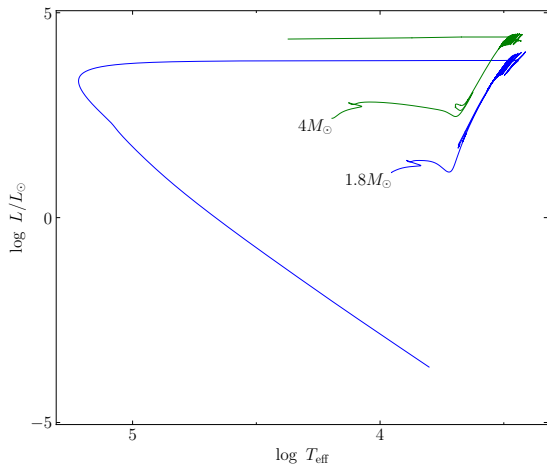
Ю.А. Фадеев

ИНАСАН

эволюция звезд с начальной массой $M_{\text{ZAMS}} \lesssim 8M_{\odot}$
связана с термоядерным горением водорода и гелия



эволюция звезд с начальной массой $M_{ZAMS} \lesssim 8M_{\odot}$
связана с термоядерным горением водорода и гелия

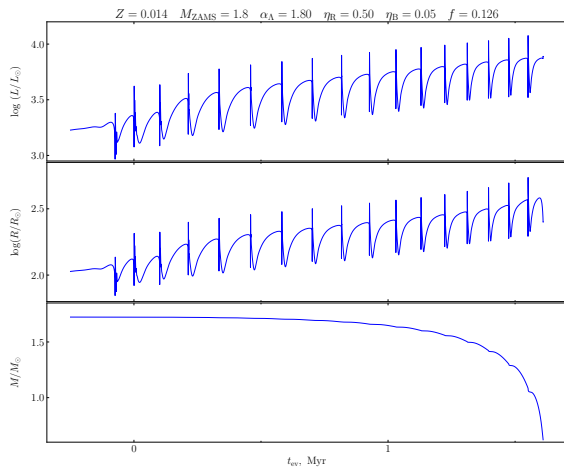


рост массы CO-ядра сопровождается увеличением
светимости (Уус 1970, Пачинский 1971):

$$L/L_{\odot} = 5.925 \times 10^4 \left(\frac{M_{\text{CO}}}{M_{\odot}} - 0.522 \right)$$

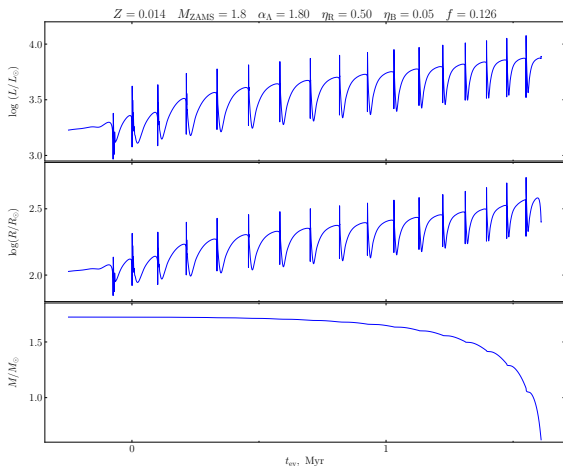
эволюция на стадии TP-AGB

продолжительность стадии TP-AGB определяется скоростью потери массы \dot{M}

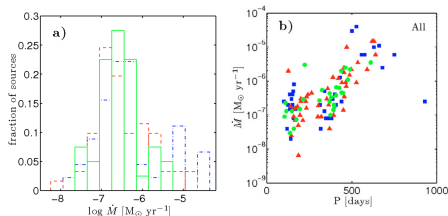


эволюция на стадии TP-AGB

продолжительность стадии TP-AGB определяется скоростью потери массы \dot{M}



- отсутствие ясной методики вычисления \dot{M} – основной недостаток теории
- данные наблюдений (Ramstedt et al., 2009)



- $\dot{M}_R = 4 \times 10^{-13} \eta_R \frac{L/L_\odot R/R_\odot}{M/M_\odot}$ (Reimers 1975)
- $\dot{M} = 4.83 \times 10^{-9} \eta_B \frac{(L/L_\odot)^{2.7}}{(M/M_\odot)^{2.1}} \dot{M}_R$ (Blöcker 1995)
- типичные значения параметров:
 $0.3 \lesssim \eta_R \lesssim 0.7$, $0.01 \lesssim \eta_B \lesssim 0.1$

- Соотношение масса СО-ядра – интервал между гелиевыми вспышками (Уус 1970, Пачинский 1975):

$$\log \Delta t(\text{yr}) = 3.05 - 4.5 (M_{\text{CO}}/M_{\odot} - 1)$$

Например, $\Delta t \approx 5 \times 10^3$ лет при $M = 4M_{\odot}$, $\Delta t \approx 10^5$ лет при $M = 1.5M_{\odot}$

- В течение $\approx 5\%$ времени эволюции на стадии TP-AGB в звезде отсутствует тепловое равновесие вследствие быстрых изменений радиуса R и светимости L
- Анализ архива кривых блеска AAVSO показывает (Templeton et al. 2005), что около 5% мирид обнаруживают статистически значимые изменения периода
- Наиболее яркие мириды с вековыми изменениями периода: LX Cyg, R Aql, U Cyg, R Cen, R Hya, RU Vul, S Ori, S Sex, W Dra, σ Cet, T UMi
- Необходимые условия применимости теории звездных пульсаций – гидростатическое и тепловое равновесие

$$\Pi \sqrt{\bar{\rho}/\bar{\rho}_{\odot}} = Q$$

- Как следует из результатов численных экспериментов, область применимости теории звездных пульсаций ограничивается условием

$$\delta_L = \max_{1 \leq j \leq N} \left| 1 - \frac{L_j}{L_0} \right| \lesssim 10^{-2},$$

где L_j – полная светимость (лучистая и конвективная) в j -й массовой зоне модели

- уравнения 1D радиационной гидродинамики дополнены транспортными уравнениями (Kuhfuß, 1986, *Astron. Astrophys.* **160**, 116)

$$\mathbf{F}_c = \alpha_s \Lambda \rho T E_t^{1/2} \nabla S \quad (1)$$

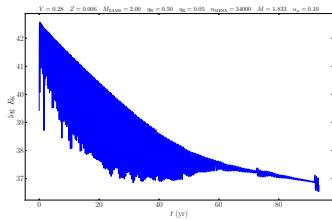
$$\mathbf{F}_t = -\alpha_t \Lambda \rho E_t^{1/2} \nabla E_t \quad (2)$$

где S – удельная энтропия, E_t – средняя кинетическая энергия турбулентных движений газа, $\Lambda = \alpha H_P$ – средняя длина пути перемешивания

- в стационарном случае при $\alpha_s = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{3}}$ уравнение (1) полностью совместимо с теорией конвекции Böhm–Vitense (1958)
- уравнение (2) описывает эффекты овершутинга на границах конвективной устойчивости

виды решения нелинейной теории звездных пульсаций

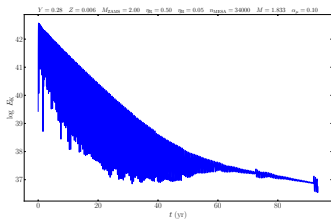
устойчивость относительно
радиальных колебаний



$$\langle R \rangle \rightarrow R$$

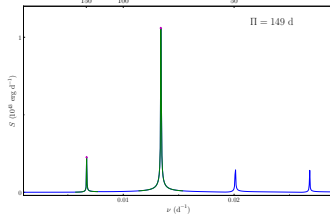
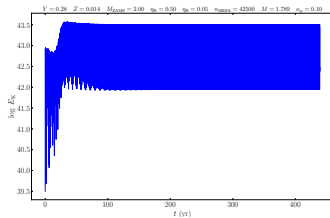
виды решения нелинейной теории звездных пульсаций

устойчивость относительно
радиальных колебаний



$$\langle R \rangle \rightarrow R$$

колебания предельной амплитуды
($\sigma_{\Pi} \sim 10^{-2}$)

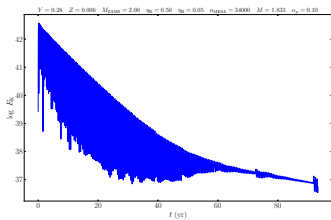


$$\langle R \rangle \approx 1.1R$$

$$\Pi \approx 1.15\Pi_{\text{lin}}$$

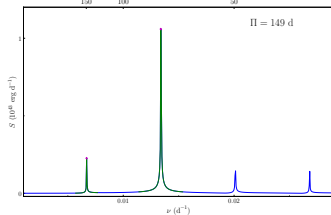
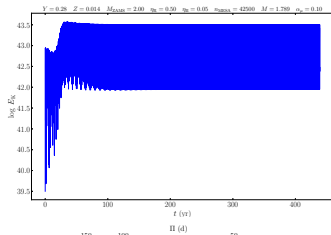
виды решения нелинейной теории звездных пульсаций

устойчивость относительно
радиальных колебаний



$$\langle R \rangle \rightarrow R$$

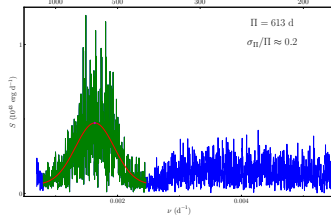
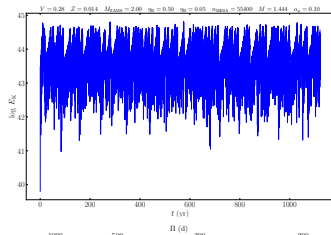
колебания предельной амплитуды
($\sigma_{\Pi} \sim 10^{-2}$)



$$\langle R \rangle \approx 1.1R$$

$$\Pi \approx 1.15\Pi_{\text{lin}}$$

полуправильные колебания
($\sigma_{\Pi} > 0.1$)

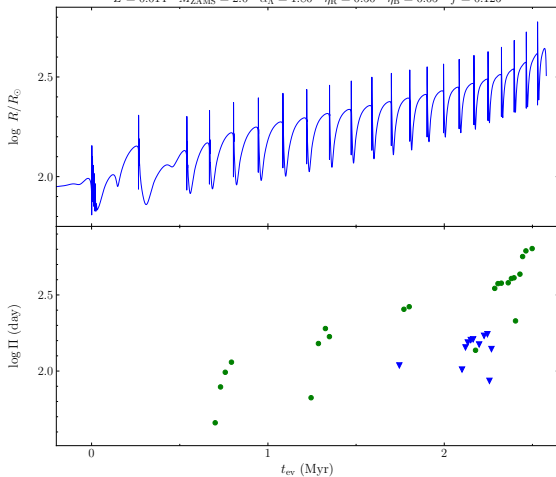


$$\langle R \rangle \approx 1.2R$$

$$\Pi \approx 1.3\Pi_{\text{lin}}$$

Эволюционные изменения R и Π

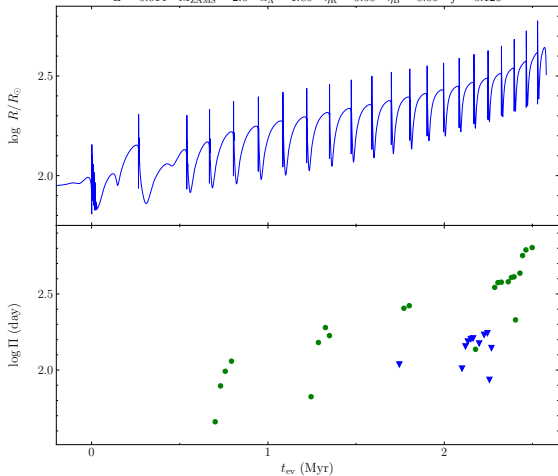
$Z = 0.014$ $M_{ZAMS} = 2.0$ $\alpha_A = 1.80$ $\eta_R = 0.50$ $\eta_B = 0.05$ $f = 0.126$



- $50 \text{ d} \lesssim \Pi \lesssim 700 \text{ d}$
- колебания в фундаментальной моде или первом обертоне не зависят от Π

Эволюционные изменения R и Π

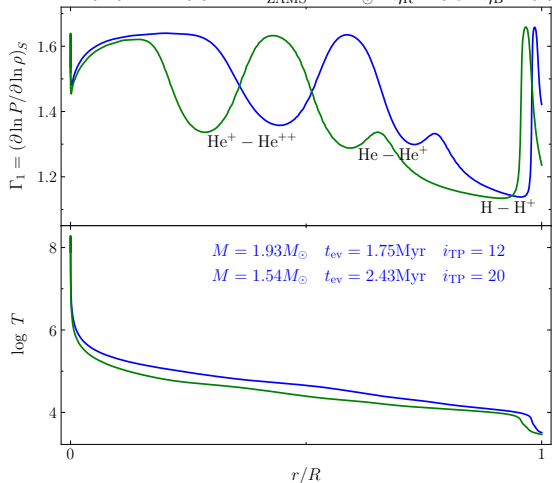
$Z = 0.014$ $M_{\text{ZAMS}} = 2.0$ $\alpha_A = 1.80$ $\eta_R = 0.50$ $\eta_B = 0.05$ $f = 0.126$



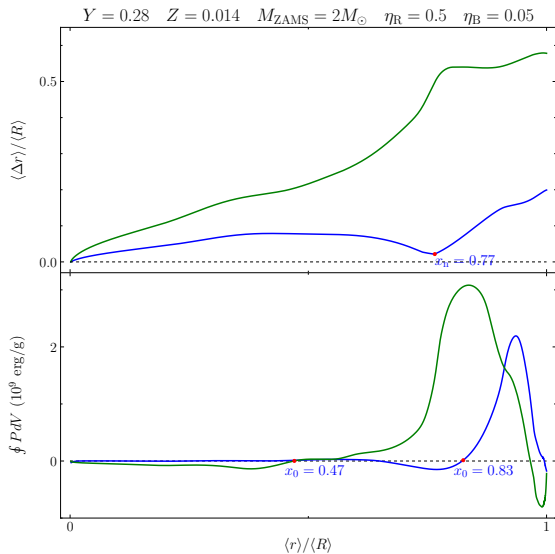
- $50 \text{ d} \lesssim \Pi \lesssim 700 \text{ d}$
- колебания в фундаментальной моде или первом обертоне не зависят от Π

Зоны ионизации H, He и He⁺

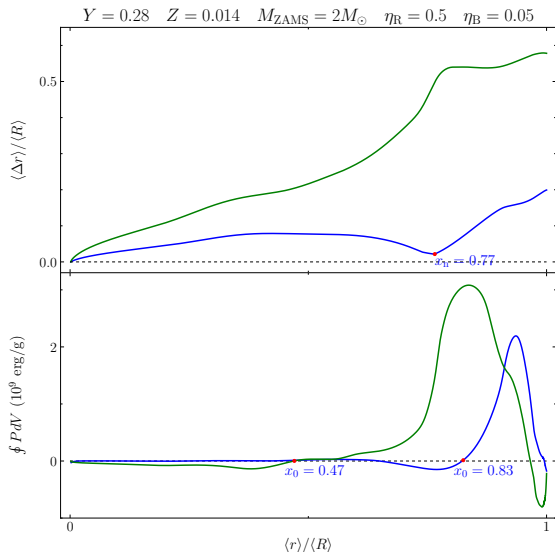
$Y = 0.28$ $Z = 0.014$ $M_{\text{ZAMS}} = 2M_{\odot}$ $\eta_R = 0.5$ $\eta_B = 0.05$



пульсации в фундаментальной моде и первом обертоне



пульсации в фундаментальной моде и первом оберлоне

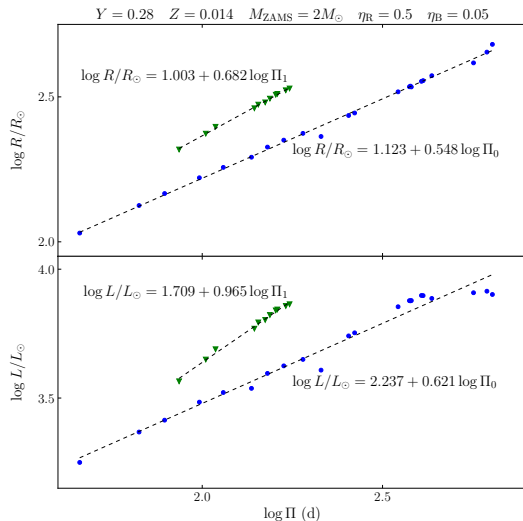


- 1 На стадии колебаний предельной амплитуды

$$\int_0^M dM_r \oint P dV = 0$$

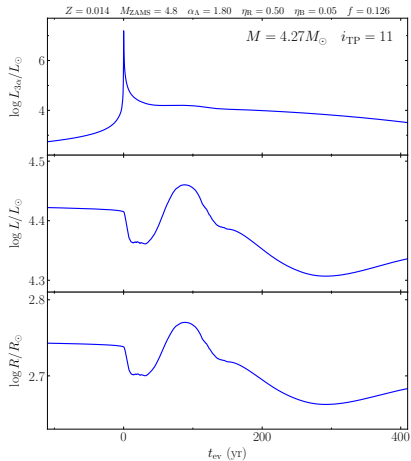
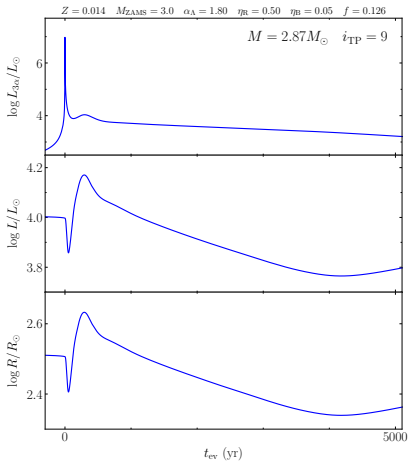
- 2 Основной вклад в раскачку колебаний мириды вносят слои частичной ионизации водорода
- 3 Колебания в первом оберлоне возникают в том случае, когда слои частично ионизованного водорода ($x_{\text{H}} \lesssim 0.5$) остаются выше узла обертона ($\langle r \rangle \approx 0.8 \langle R \rangle$)
- 4 Эволюционное увеличение радиуса R сопровождается смещением внутренней границы зоны ионизации водорода по направлению к центру. Таким образом, проэволюционировавшие мириды пульсируют в фундаментальной моде

зависимость период–светимость (предварительные результаты)



каждая звезда AGB эволюционирует вдоль зависимости $\Pi - L$ в сторону увеличения периода

изменения L и R на стадии тепловой вспышки

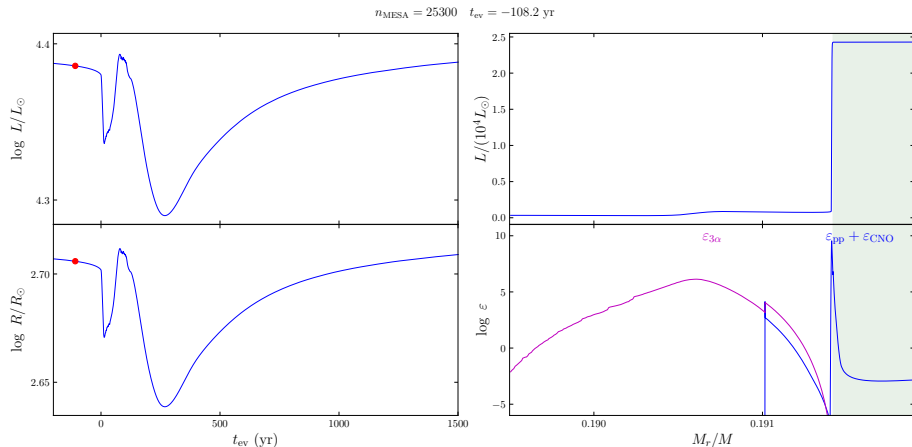


- 1 при радиальных колебаниях $\Pi \propto R^{3/2}$ и поэтому $\max L_{3\alpha}$ ($t_{\text{ev}} = 0$) приблизительно совпадает с началом сокращения периода Π
- 2 скорость изменения периода $\dot{\Pi}$ является чувствительным индикатором массы звезды M

структурные изменения на стадии гелиевой вспышки

пространственное распределение светимости L_r и скоростей энерговыделения в слоях термоядерного горения водорода и гелия

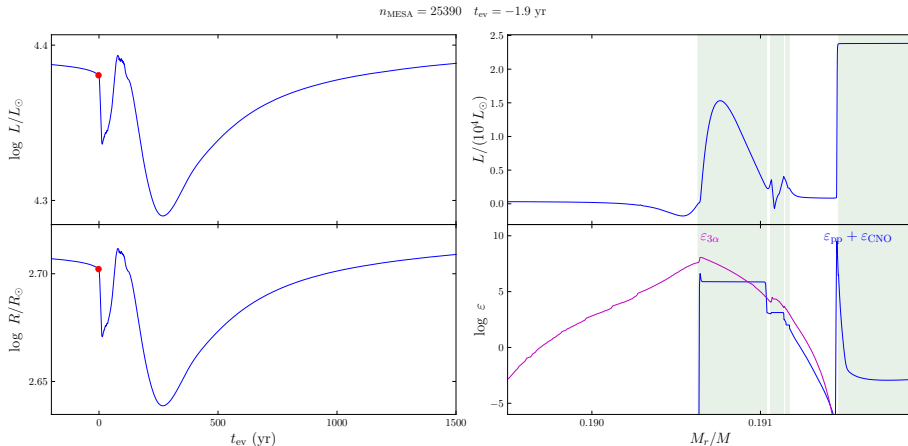
$$M_{\text{ZAMS}} = 4.8 M_{\odot}, \quad \eta_{\text{B}} = 0.05, \quad i_{\text{TP}} = 7$$



структурные изменения на стадии гелиевой вспышки

пространственное распределение светимости L_r и скоростей энерговыделения
в слоях термоядерного горения водорода и гелия

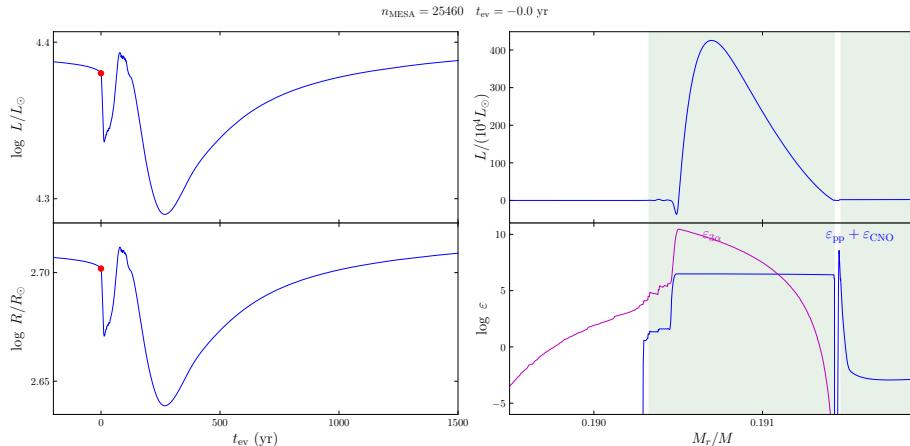
$$M_{\text{ZAMS}} = 4.8 M_{\odot}, \quad \eta_{\text{B}} = 0.05, \quad i_{\text{TP}} = 7$$



структурные изменения на стадии гелиевой вспышки

пространственное распределение светимости L_r и скоростей энерговыделения в слоях термоядерного горения водорода и гелия

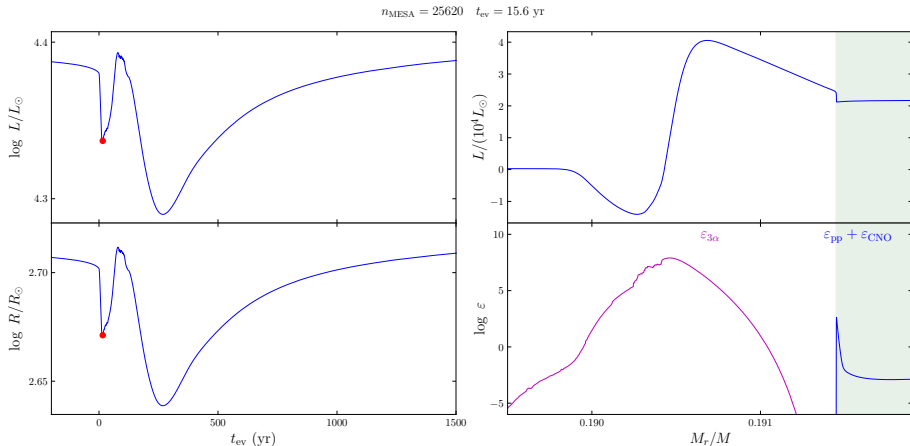
$$M_{\text{ZAMS}} = 4.8 M_{\odot}, \quad \eta_{\text{B}} = 0.05, \quad i_{\text{TP}} = 7$$



структурные изменения на стадии гелиевой вспышки

пространственное распределение светимости L_r и скоростей энерговыделения в слоях термоядерного горения водорода и гелия

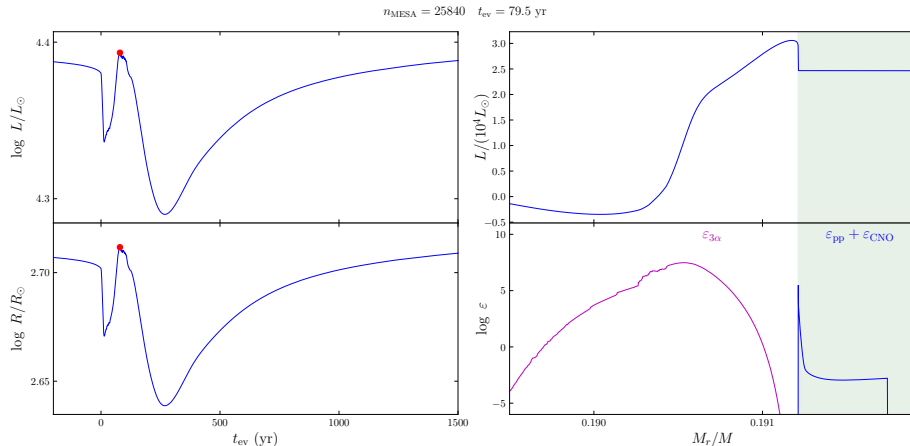
$$M_{\text{ZAMS}} = 4.8 M_{\odot}, \quad \eta_{\text{B}} = 0.05, \quad i_{\text{TP}} = 7$$



структурные изменения на стадии гелиевой вспышки

пространственное распределение светимости L_r и скоростей энерговыделения в слоях термоядерного горения водорода и гелия

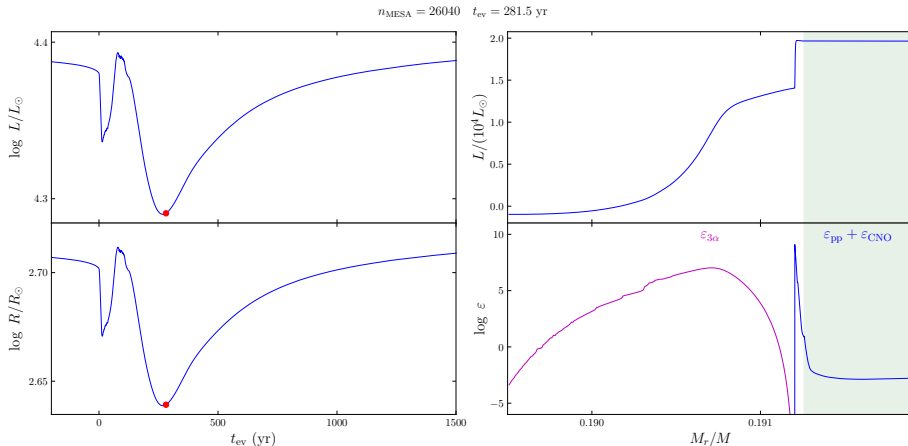
$$M_{\text{ZAMS}} = 4.8 M_{\odot}, \quad \eta_{\text{B}} = 0.05, \quad i_{\text{TP}} = 7$$



структурные изменения на стадии гелиевой вспышки

пространственное распределение светимости L_r и скоростей энерговыделения
в слоях термоядерного горения водорода и гелия

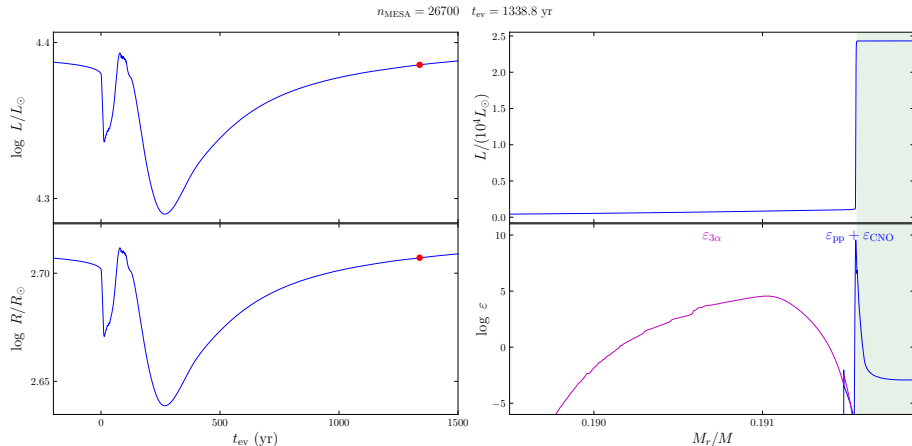
$$M_{\text{ZAMS}} = 4.8 M_{\odot}, \quad \eta_{\text{B}} = 0.05, \quad i_{\text{TP}} = 7$$



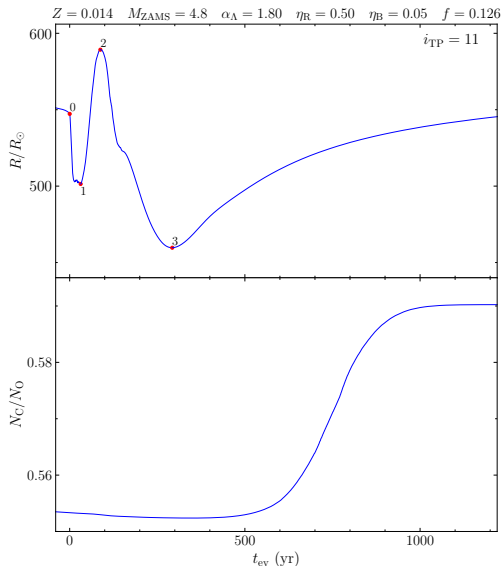
структурные изменения на стадии гелиевой вспышки

пространственное распределение светимости L_r и скоростей энерговыделения в слоях термоядерного горения водорода и гелия

$$M_{\text{ZAMS}} = 4.8 M_{\odot}, \quad \eta_{\text{B}} = 0.05, \quad i_{\text{TP}} = 7$$



этапы изменения радиуса на стадии тепловой вспышки



$$t_{\text{ev}} < t_0$$

водородная оболочка находится
в тепловом равновесии

$$t_0 < t_{\text{ev}} < t_1$$

сжатие оболочки из-за прекращения
энерговыведения водородного слоевого
источника

$$t_1 < t_{\text{ev}} < t_2$$

выход во внешние слои радиационно-
диффузионной волны и расширение
оболочки

$$t_2 < t_{\text{ev}} < t_3$$

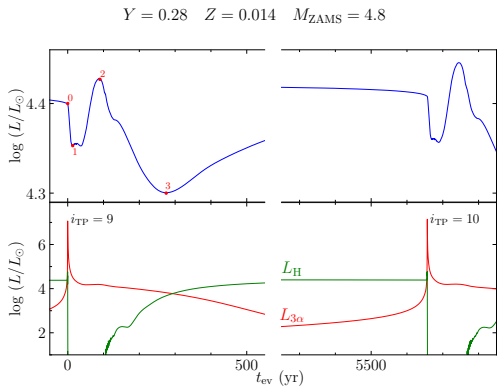
сжатие оболочки вследствие затухания
радиационно-диффузионной волны

$$t_{\text{ev}} > t_3$$

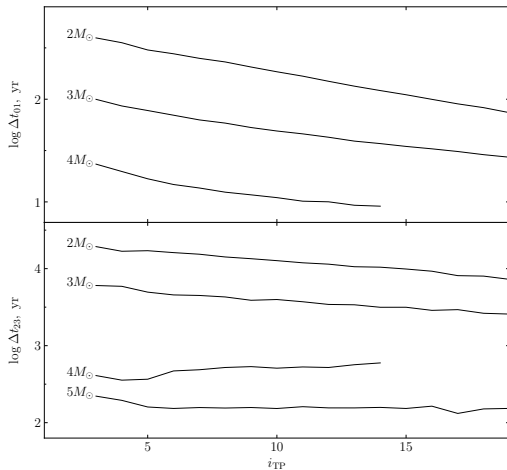
восстановление энерговыведения
водородного слоевого источника
и возвращение к тепловому равновесию

возрастание поверхностного содержания
атомов углерода (3rd Dredge-Up)

характерные времена изменения L и R , связанные с гелиевой вспышкой



стадии уменьшения L и R

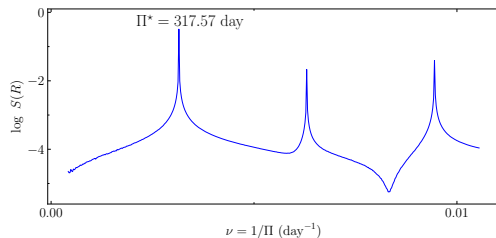
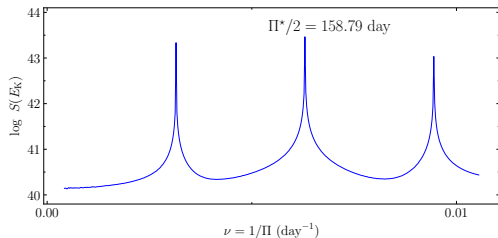
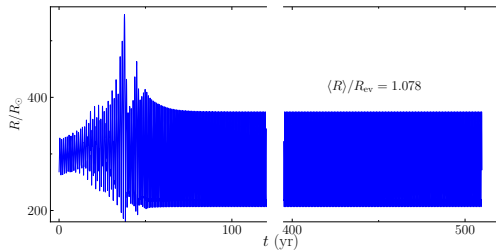
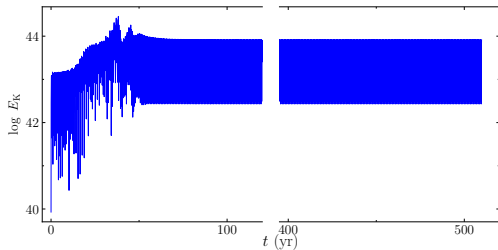


T UMi

- первое упоминание (Pickering & Fleming 1906)
- по данным ОКПЗ T UMi – обычная мирида с периодом $\Pi \approx 300$ сут и амплитудой изменения блеска от $V_{\min} = 15$ до $V_{\max} = 7.8$ (Самусь и др., 2017)
- в 1970–х гг. период изменения блеска T UMi начал быстро сокращаться (Gál & Szatmáry, 1995; Mattei & Foster, 1995)
- приблизительно неизменное значение периода до 1970–х гг. указывает на то, что наблюдаемое сокращение периода связано с прекращением энерговыделения водородного слоевого источника, а начало уменьшения Π соответствует $\max L_{3\alpha}$

гидродинамическая модель T UMi до 1970-х гг.

период модели совпадает с наблюдаемым значением $\Pi^* = 315$ сут в пределах 5%

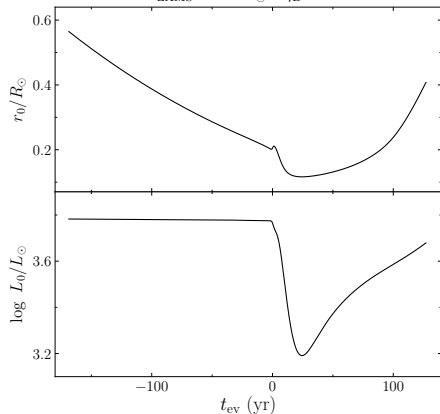


Гидродинамические модели с нестационарными внутренними граничными условиями

нестационарные внутренние граничные условия

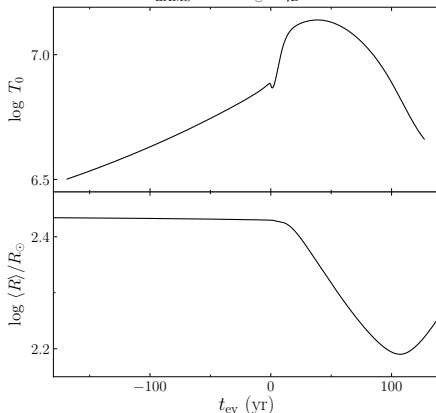
$$r_0(t_{ev}), L_0(t_{ev})$$

$$M_{ZAMS} = 1.8M_{\odot} \quad \eta_B = 0.10$$



внутренняя и внешняя границы модели

$$M_{ZAMS} = 1.8M_{\odot} \quad \eta_B = 0.10$$

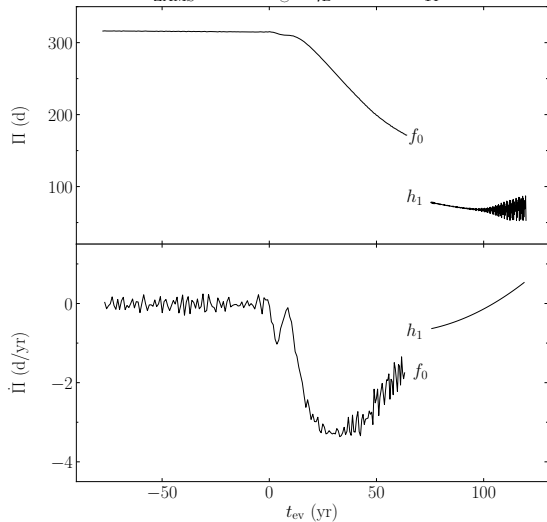


- результаты гидродинамических расчетов полностью согласованы с эволюционными изменениями структуры звездной оболочки за исключением эффектов потери массы.
- различие между значениями массы эволюционной и гидродинамической моделей $\delta M/M \lesssim 10^{-4}$.

эволюционные изменения Π и $\dot{\Pi}$

$$\Pi = t(R_{\max})_{i+1} - t(R_{\max})_i$$

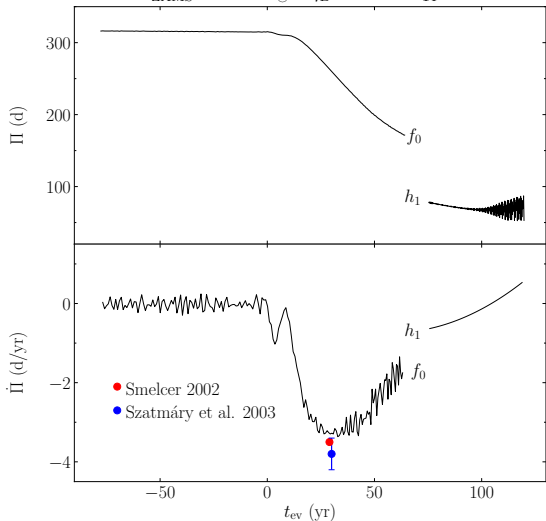
$M_{\text{ZAMS}} = 1.80 M_{\odot}$ $\eta_{\text{B}} = 0.10$ $i_{\text{TP}} = 11$



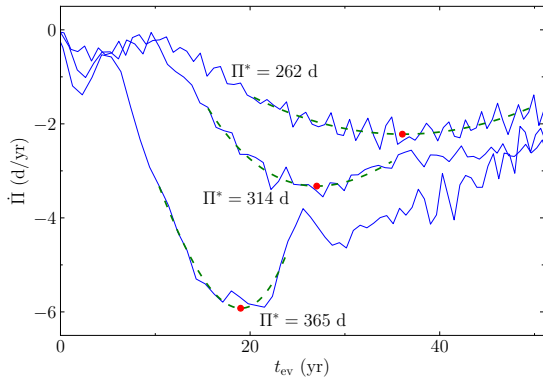
эволюционные изменения Π и $\dot{\Pi}$

$$\Pi = t(R_{\max})_{i+1} - t(R_{\max})_i$$

$M_{\text{ZAMS}} = 1.80 M_{\odot}$ $\eta_{\text{B}} = 0.10$ $i_{\text{TP}} = 11$



$\dot{\Pi}_{\min}$ и $t_{\text{ev}}(\dot{\Pi}_{\min})$ зависят от Π^*



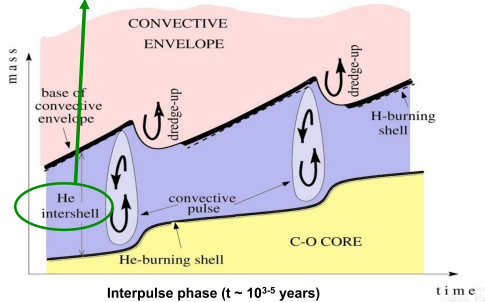
★ гидродинамическая модель $\Pi^* = 314$ сут:
 $t_{\text{ev}} = 27$ лет, $\dot{\Pi}_{\min} = -3.4$ сут/год

★ наблюдения ($t_{\text{ev}} \approx 30$ лет):
 $\dot{\Pi}_{\min} = -3.5$ сут/год (Smelcer 2002)
 $\dot{\Pi}_{\min} = -3.8 \pm 0.4$ сут/год (Szatmáry et al. 2003)

ограничение на массу звезды со стороны 3rd dredge-up

образование n : $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+, \nu)^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$

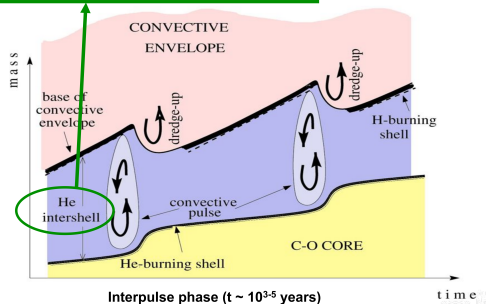
^4He , ^{12}C , s-process elements: Ba, Pb,...



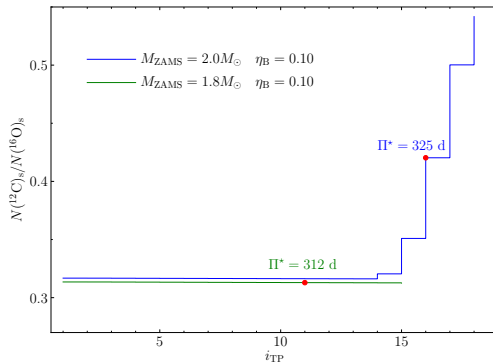
ограничение на массу звезды со стороны 3rd dredge-up

образование n : $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+, \nu)^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$

^4He , ^{12}C , s-process elements: Ba, Pb,...



признак 3rd dredge-up: изменение соотношения содержаний ^{12}C и ^{16}O на внешней границе эволюционной модели



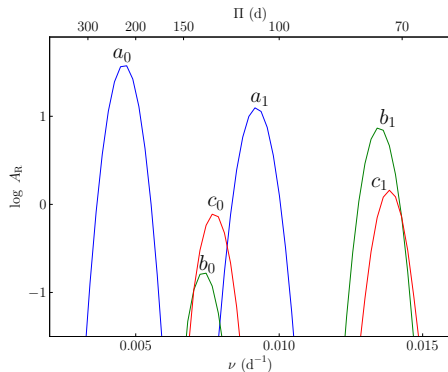
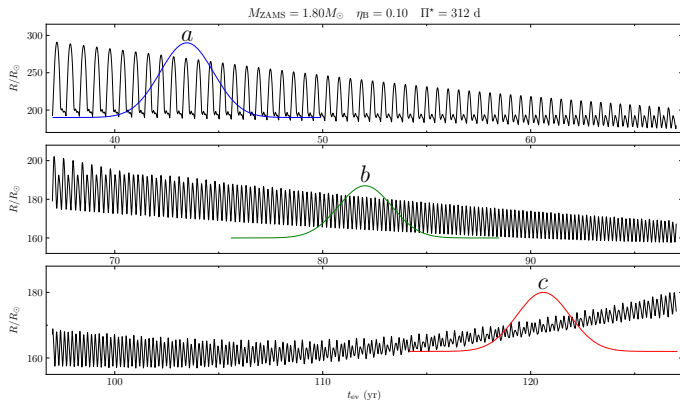
- Отсутствие линий поглощения изотопа ^{99}Tc ($\tau \approx 2.1 \times 10^5$ лет) в спектре Т UMi (Uttenhaler et al. 2011) свидетельствует о том, что в этой звезде еще не начался 3rd Dredge-up
- Критерий 3DUP позволяет исключить из рассмотрения эволюционную последовательность $M_{\text{ZAMS}} = 2.0 M_{\odot}$, $\eta_{\text{B}} = 0.10$

модели мириды T UMi

M_{ZAMS} (M_{\odot})	η_{B}	i_{TP}	M (M_{\odot})	Π (d)	$\dot{\Pi}$ (d/yr)	Δt (yr)
1.3	0.02	8	1.04	311	-3.31	31.1
1.4	0.02	9	1.14	314	-3.35	26.9
1.5	0.02	10	1.24	318	-3.20	31.4
1.6	0.02	11	1.36	320	-3.50	30.7
1.7	0.05	10	1.38	318	-3.37	29.2
1.8	0.10	11	1.32	312	-3.28	29.5
T UMi				315	-3.5	30

переключение моды колебаний ($\Pi_1/\Pi_0 \approx 1/2$)

оконное преобразование Фурье (short-time Fourier transform)



a $A_{R,1}/A_{R,0} \approx 0.33$

b $A_{R,1}/A_{R,0} \approx 44.3$

c $A_{R,1}/A_{R,0} \approx 1.87$

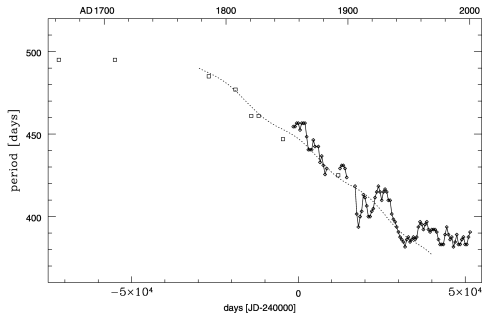
переключение моды колебаний происходит вследствие перемещения внутренней границы зоны ионизации водорода

Наблюдения

- начальное значение периода $\Pi_a \approx 500$ сут
- конечное значение периода $\Pi_b \approx 380$ сут
- продолжительность сокращения периода $\Delta t \approx 200$ лет

Результаты расчетов

- значения Π_a и Δt не совместимы с предположением, что сокращение периода происходит на первом этапе уменьшения радиуса звезды
- согласие с наблюдаемыми значениями Π_a , Π_b , Δt получено для моделей мирид с массой $4.4M_{\odot} \leq M \leq 4.6M_{\odot}$ на стадии затухания радиационно-диффузионной волны
- теоретические оценки радиуса R Hya ($420R_{\odot} \leq R \leq 450R_{\odot}$) для интервала от 1950 г. до 2000 г. находятся в согласии с наблюдательной оценкой $R = 442R_{\odot}$ полученной методом оптической интерферометрии (Haniff et al. 1995) при расстоянии 126 пк (Gaia DR3)



(Zijlstra et al. 2002)

заключительные замечания

- 1 Возбуждение радиальных пульсаций мирид происходит в слоях частичной ионизации водорода

заключительные замечания

- 1 Возбуждение радиальных пульсаций мирид происходит в слоях частичной ионизации водорода
- 2 Мириды пульсируют в первом оберitone лишь в том случае, когда внутренняя граница зоны ионизации водорода находится выше узла обертона ($r \gtrsim 0.8R$)

заключительные замечания

- 1 Возбуждение радиальных пульсаций мирид происходит в слоях частичной ионизации водорода
- 2 Мириды пульсируют в первом оберitone лишь в том случае, когда внутренняя граница зоны ионизации водорода находится выше узла обертона ($r \gtrsim 0.8R$)
- 3 Одна из причин полуправильных изменений блеска связана с нелинейностью колебаний, амплитуда которых возрастает с течением времени эволюции

заключительные замечания

- 1 Возбуждение радиальных пульсаций мирид происходит в слоях частичной ионизации водорода
- 2 Мириды пульсируют в первом оберitone лишь в том случае, когда внутренняя граница зоны ионизации водорода находится выше узла обертона ($r \gtrsim 0.8R$)
- 3 Одна из причин полуправильных изменений блеска связана с нелинейностью колебаний, амплитуда которых возрастает с течением времени эволюции
- 4 Зависимость период–светимость мирид является совокупностью эволюционных треков отдельных звезд AGB на диаграмме $\Pi - L$

заключительные замечания

- 1 Возбуждение радиальных пульсаций мирид происходит в слоях частичной ионизации водорода
- 2 Мириды пульсируют в первом оберitone лишь в том случае, когда внутренняя граница зоны ионизации водорода находится выше узла обертона ($r \gtrsim 0.8R$)
- 3 Одна из причин полуправильных изменений блеска связана с нелинейностью колебаний, амплитуда которых возрастает с течением времени эволюции
- 4 Зависимость период–светимость мирид является совокупностью эволюционных треков отдельных звезд AGB на диаграмме $\Pi - L$
- 5 Благодаря сильной зависимости изменений периода от массы звезды на стадии тепловой вспышки существует возможность определения фундаментальных параметров AGB звезд на основе анализа наблюдаемых вековых изменений периодов мирид

Спасибо за внимание!