

Санкт-Петербургский государственный университет  
Математико-механический факультет  
Кафедра астрофизики

Тепловые пульсации на стадии  
асимптотической ветви гигантов.  
Потеря вещества на поздних стадиях  
эволюции. Сверхветер.

Туричина Дарья

Санкт-Петербург - 2016

# 1 Введение

На диаграмме Герцшпрунга-Рассела (светимость - эффективная температура) звезды образуют несколько групп, которые **являются** эволюционно связаны между собой. Звезда **переходит** на главную последовательность, где и проводит большую часть жизни. Здесь в центре звезды идет преобразование водорода в гелий. Когда водородное топливо в центре звезды иссякает, тепловое давление уже не может сдерживать гравитационное, и ядро звезды начинает сжиматься. Оболочка наоборот расширяется, звезда переходит на стадию красного гиганта. Дальнейшая эволюция протекает по-разному в зависимости от исходной массы звезды.

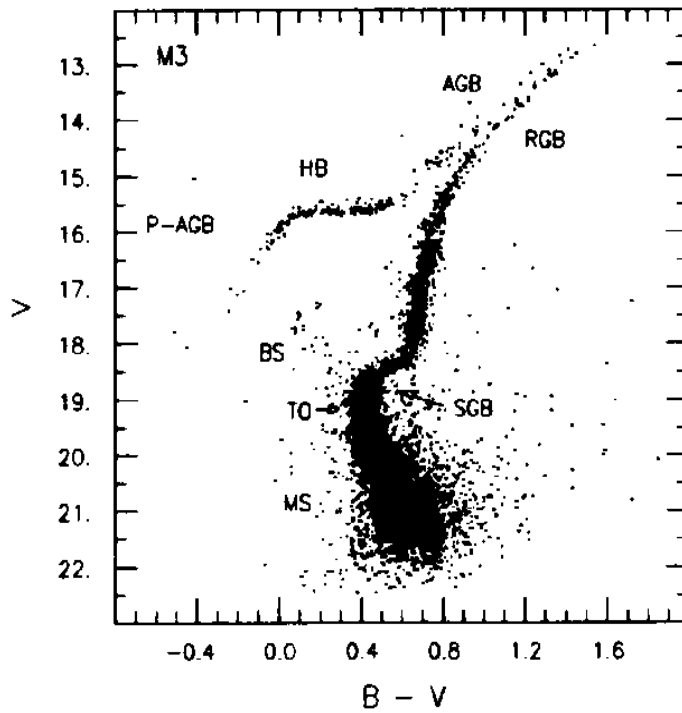


Рис. 1: Диаграмма Герцшпрунга-Рассела для шарового звёздного скопления M3. (Источник: [http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Samus/2\\_3.html](http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Samus/2_3.html))


- MS - главная последовательность,
- TO - точка поворота,
- BS - голубые страгглеры,
- SGB - ветвь субгигантов,


- RGB - ветвь красных гигантов,
- HB - горизонтальная ветвь,
- AGB -асимптотическая ветвь гигантов,
- HB - горизонтальная ветвь,
- P-AGB - стадия пост-АВГ.

По массам звезды можно разделить на три группы:

- маломассивные, с массами, меньшими  $1.8 - 2.2M_{\odot}$ ,
- звезды промежуточных масс, с массами от  $1.8 - 2.2M_{\odot}$  до  $8 - 10M_{\odot}$ ,
- массивные, с массами, большими  $8 - 10M_{\odot}$ .

В ядрах маломассивных звезд (верхний предел зависит от начального химического состава звезды) электронный газ вырождается, вокруг ядра загорается водородный слоевой источник. В итоге звезда сбрасывает оболочку и становится гелиевым белым карликом.

Во время сжатия ядра звезды промежуточной массы до того как ядро может выродиться, ем загорается гелий. Когда и гелий иссякает в ядре, звезда опять перестраивается, образуя вырожденное углеродно-кислородное ядро и два слоевых источника вокруг него: гелиевый и водородный. Это и есть стадия асимптотической ветви гигантов.

В массивных звездах продолжается образование все более тяжелых элементов без вырождения ядра. В итоге образуется железное ядро, которое коллапсирует как сверхновая. С возрастанием массы время, проводимое звездой на главной последовательности, уменьшается. 

Граница между звездами средних масс и массивными звездами определяется неточно и сильно зависит от возможных масс белых карликов и нейтронных звезд, а значит и от неизвестного уравнения состояния нейтронных звезд. Для определения этой границы используют наблюдения белых карликов в скоплениях. Все звезды в скоплении одного возраста, который можно определить по точке поворота главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга-Рассела, построенной для скопления. Если в скоплении наблюдается белый карлик, значит он является результатом эволюции звезды, достаточно массивной, чтобы она успела проэволюционировать за время жизни скопления.

## 2 Звезды асимптотической ветви гигантов

Звезда асимптотической ветви гигантов - это проэволюционировавшая звезда, в центре которой уже выгорел гелий и образовалось углеродно-кислородное ядро, вокруг которого зажглись слоевые источники горения гелия и водорода и образовалась конвективная оболочка. Стадию АВГ можно разделить

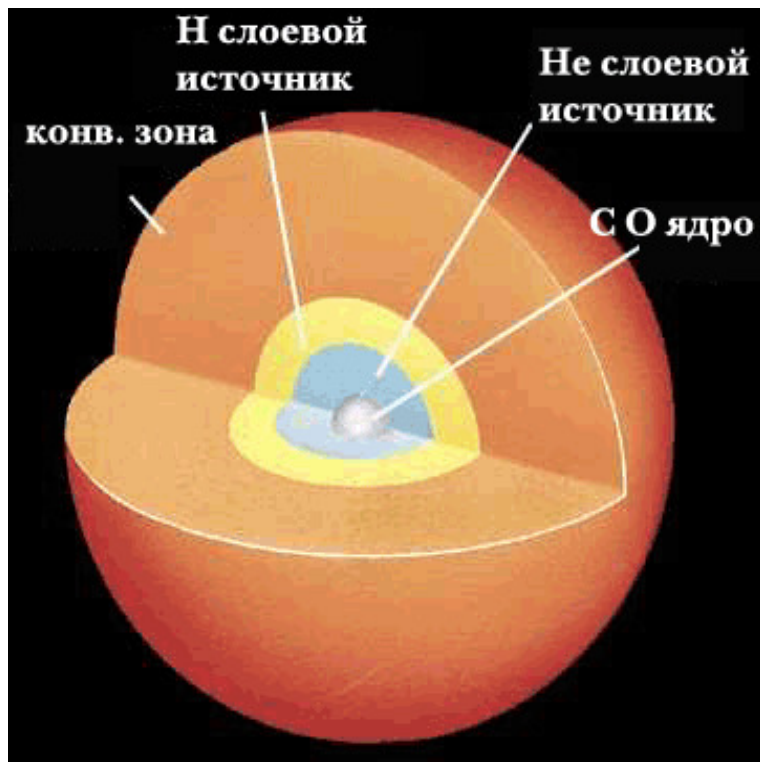


Рис. 2: Сверхгигант на ранней асимптотической ветви. (Источник: [http://www.astronet.ru/db/msg/1170638/structure/star\\_models/supergia/super\\_giant.htm](http://www.astronet.ru/db/msg/1170638/structure/star_models/supergia/super_giant.htm))

на две части. В начале, из-за того, что иссяк гелиевый источник в центре звезды, она перестраивается, оболочка расширяется и водородный слоевой источник гаснет. Основной вклад в светимость дает гелиевый слоевой источник.

После достижения нового состояния равновесия с вырожденным С-О ядром, водородный слоевой источник снова загорается, а звезда переходит в фазу тепловых пульсаций (ТР-АГВ). Теперь большую часть времени основная часть светимости обусловлена горением водорода. Однако иногда скорость горения гелия сильно возрастает, что приводит к тепловым пульсациям.

В ходе стадии АВГ звезда активно теряет вещество как в форме стационарного звездного ветра, так и во время пульсаций. Звезда уходит с АВГ, если она теряет всю водородную оболочку или если вырождение ядра снимается и в нем загорается углерод.



### 3 Тепловые пульсации звезд АВГ

Причина тепловых пульсаций состоит в периодическом резком увеличении темпа горения гелия. В гелиевом слоевом источнике протекает так называемый  $3\alpha$ -процесс. В каждой реакции 3 ядра гелия объединяются в ядро атома углерода. Следовательно скорость реакции сильно зависит от концентрации гелия (в третьей степени). Также скорость  $3\alpha$ -процесса сильно зависит от температуры. В водородном источнике над гелиевым водо-

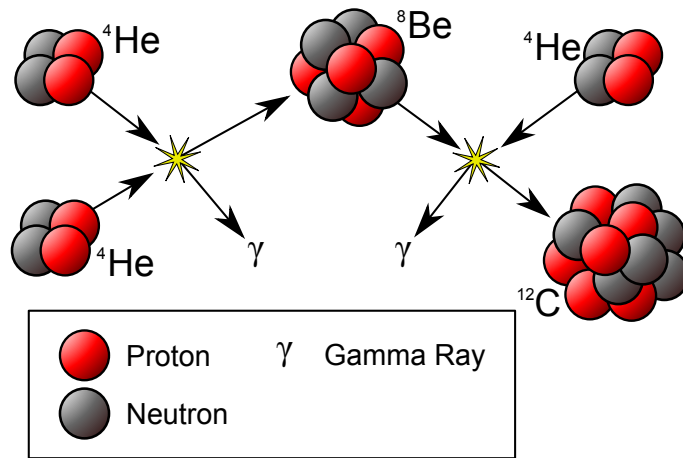


Рис. 3: Источник: [https://en.wikipedia.org/wiki/Triple-alpha\\_process](https://en.wikipedia.org/wiki/Triple-alpha_process)

род превращается в гелий, что увеличивает концентрацию гелия в гелиевом источнике. Поэтому возрастает скорость  $3\alpha$ -процесса. Вырабатывается ещё больше энергии, и температура ещё повышается, что опять вызывает ускорение реакции. Реакция принимает форму взрыва, происходит гелиевая вспышка, оболочка расширяется и охлаждается. За время, проведенное звездой на АВГ, может произойти несколько таких пульсаций.

Суммируя, процесс тепловой пульсации можно представить как:

- 90% времени светимость звезды определяется в основном спокойным горением водородной оболочки,
- со временем увеличивается масса гелиевой оболочки,
- возрастает скорость протекания тройной гелиевой реакции, из-за чего выделяется дополнительная энергия, оболочка нагревается, и скорость реакции ещё больше возрастает,
- происходит вспышка в гелиевой оболочке,
- оболочка расширяется и охлаждается,
- звезда возвращается в стадию спокойного горения водорода.

В ходе тепловых пульсаций происходят дополнительные явления, объясняющие наблюдаемые в звездах эффекты. Во-первых, в конвективной оболочке, уносимой вспышкой, достаточно высокая температура для образования неона из азота. Неон выносится наружу и его можно наблюдать. Во-вторых, конвективная оболочка расширяется вниз и тяжелые элементы из-под слоев водорода и гелия также выносятся на поверхность. В-третьих, в более массивных звездах в основании конвективной оболочки может начаться образование N из C, что приведёт к сильному увеличению светимости звезды (эффект "hot-bottom"). В целом, тепловые пульсации звезд АВГ - важный механизм обогащения межзвездной среды тяжелыми элементами.

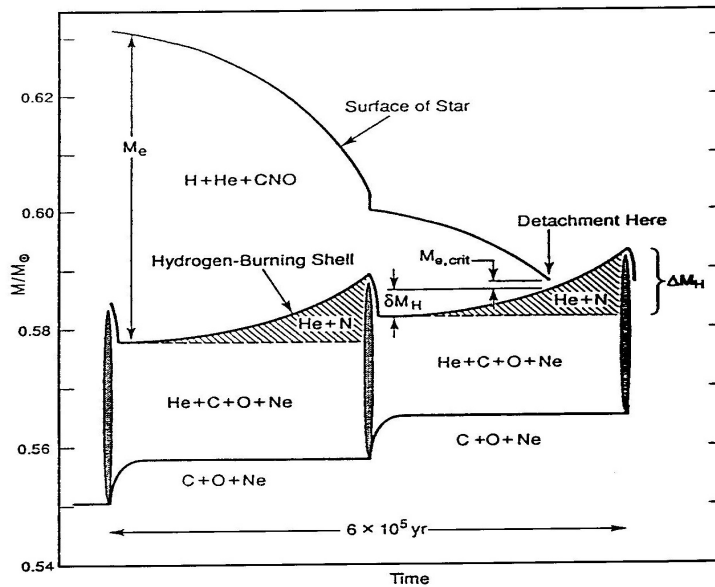


Рис. 4: Структура звезды в стадии TP-AGB. (Sun Kwok, The origin and evolution of planetary nebulae, fig. 10.5, p. 114)

Существуют эмпирические зависимости между параметрами пульсаций. Такие параметры звезды АВГ как средняя за время цикла светимость и промежуток времени между двумя последовательными вспышками зависят не от полной массы звезды, а только от массы ядра  $M_c$ .

Так средняя зависимость массы ядра-светимость выглядит как:

$$L_* = 59.250 \left( \frac{M_c}{M_\odot} - 0.52 \right) L_\odot.$$

Из подстановки в качестве массы предела Чандрасекара получается предельная светимость звезды в стадии TP-AGB  $5 * 10^4 L_\odot$ . Этот предел может ещё возрасти из-за "hot-bottom" эффекта.

Время между вспышками можно определить как:

$$\log \Delta t(\text{yr}) = 7.47 - 0.49 \frac{Z}{Z_{\odot}} + (-3.98 + 0.52 \frac{Z}{Z_{\odot}}) \frac{M_c}{M_{\odot}}.$$

В таблице представлены характерные промежутки между пульсациями. В среднем период составляет примерно  $10^4$  лет.

Z	$M_c$	$\Delta t(\text{yr})$
1	0.6	$8 * 10^4$
1	1.0	$3 * 10^3$

## 4 Потеря вещества звездами АВГ

Наблюдения показывают, что звезды АВГ эффективно теряют массу. В среднем темп потери массы составляет  $10^{-5} M_{\odot}$  в год. Вещество истекает стационарно, а также сбрасывается во время пульсаций. У некоторых звезд сброшенные оболочки можно наблюдать, как, например, у известной CW Leo (IRC+10216).



### 4.1 Наблюдательные проявления потери массы

#### 4.1.1 Инфракрасные наблюдения

Первое наблюдательное подтверждение потери массы звездами асимптотической ветви гигантов было получено в результате бурного развития инфракрасной приемной аппаратуры. Были найдены звезды с низкой (около 600К) цветовой температурой, то есть их излучение было гораздо сильнее в инфракрасной области, чем в оптическом диапазоне. В частности, в 1969 году Н. Вулф и Эдвард П. Ней зарегистрировали сравнительно сильное излучение на длине волны  $10 \mu m$  у ряда холодных звезд. Дальнейшие широкополосные фотометрические наблюдения, выполненные Вулфом и Р. Герцем, показали, что это общее свойство гигантов классов более поздних, чем МЗ.

Сразу же было предложено наиболее вероятное объяснение наблюдаемого эффекта. Если эти звезды окружены толстыми пылевыми оболочками, то пыль будет поглощать излучение центральной звезды и переизлучать его на более длинных волнах, создавая инфракрасный избыток в излучении звезды. Вулф и Ней предположили, что наблюдавшееся ими на  $10 \mu m$  излучение создают силикатные частицы. Это предположение было незамедлительно подтверждено расчетами Гилмана, который в том же 1969 году показал, что силикатные частицы - первые, которые должны обособиться в атмосферах богатых кислородом звезд.

Напротив, в углеродных звездах первыми должны образоваться частицы, состоящие из карбида кремния (SiC). Соответствующее таким частицам излучение было впоследствии найдено Трефферсом и Коеном в 1974 году.

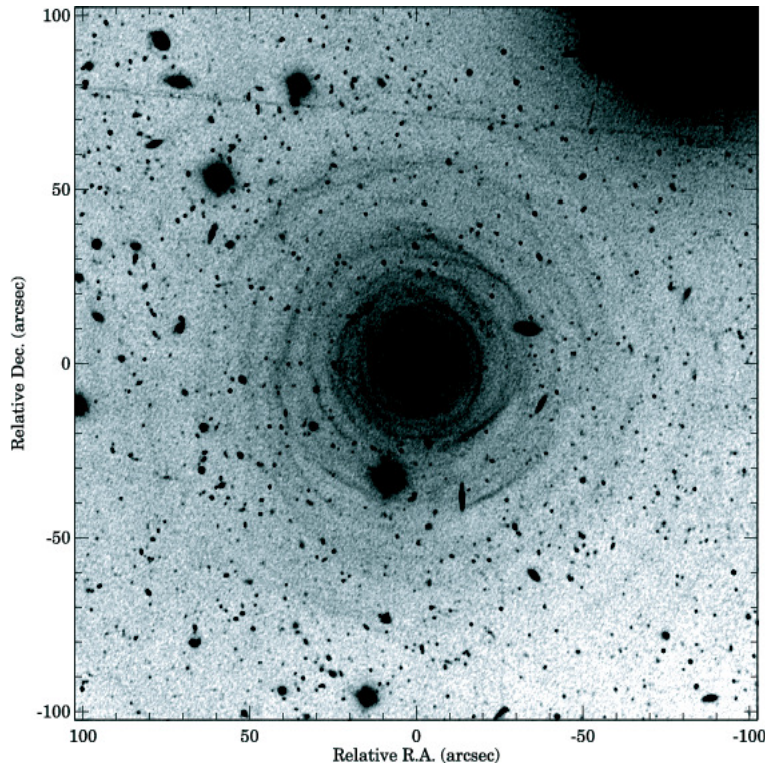


Рис. 5: Изображение IRC+10216 в полосе V. <http://www.aanda.org/articles/aa/full/2006/31/aa4577-05/aa4577-05.right.html>

Дальнейшие крупные инфракрасные обзоры, такие как AFGL и IRC, обнаружили источники сильного инфракрасного излучения, которые нельзя было соотнести с известными оптическими источниками. Последующие наблюдения связали эти источники со звездами поздних спектральных классов с толстыми околозвездными оболочками, полностью закрывающими центральную звезду. Из-за высокой плотности оболочек световое давление, оказываемое излучением центральной звезды, не позволяет частицам пыли находиться в равновесии и вызывает потерю массы центральной звездой, так как частицы пыли, взаимодействуя с газом, увлекают его частицы за собой.

#### 4.1.2 Мазерное излучение ОН

Вторым наблюдательным проявлением потери массы является мазерное излучение кислородных АВГ звезд. Многие звезды, найденные в обзорах AFGL и IRC как инфракрасные источники, оказались также ОН-мазерами. Такие звезды, у которых не наблюдается соответствующих оптических источников, называются ОН/IR. Этим звездам известно уже более двух тысяч.



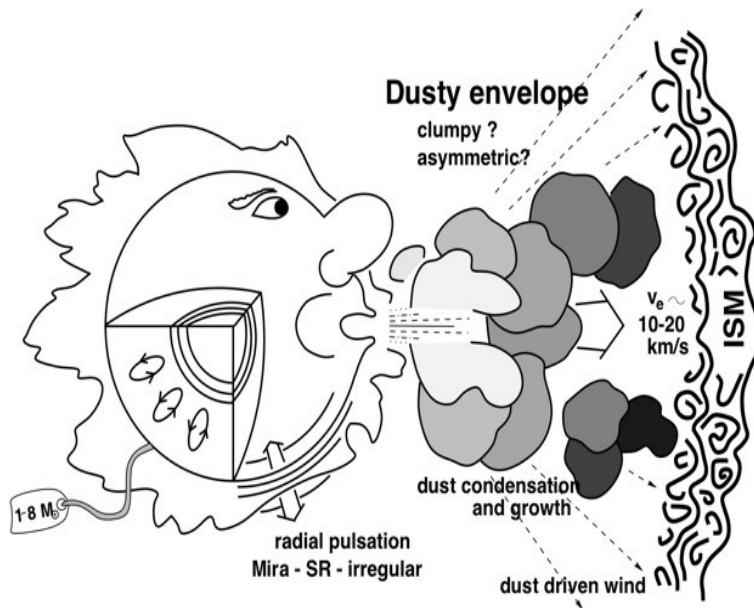


Рис. 6: На частицы пыли действует давление излучения, заставляющее их двигаться наружу, что вызывает потерю массы звездой. <https://www.cfa.harvard.edu/~mmarengo/me/agb.html>

Из корреляции между избытками инфракрасного излучения и мазерным излучением звезд следует, что скорее всего мазерное излучение вызывают как раз инфракрасные фотоны.

Мазерное излучение ОН часто имеет профиль с двумя пиками, что является следствием движения вещества со скоростью, равной половине скорости, соответствующей расстоянию между пиками. Таким образом, мазерное излучение также указывает на потерю массы звездами АБГ.

#### 4.1.3 Тепловое излучение СО

Потеря массы также проявляется в тепловом излучении СО, наблюдаемом от углеродных АБГ звезд. Впервые это излучение было зарегистрировано в 1971 году (Соломон и др.). Группа получила профили линий СО звезды CW Leo (IRC+10216). Профили оказались двух типов: с плоской вершиной и с двумя пиками. В 1976 году Купер интерпретировал эти профили как получающиеся в звездах с соответственно оптически толстыми и оптически тонкими околозвездными оболочками, создаваемыми веществом, постоянно истекающим со звезд. В ходе последующих наблюдений было открыто несколько сотен подобных звезд.

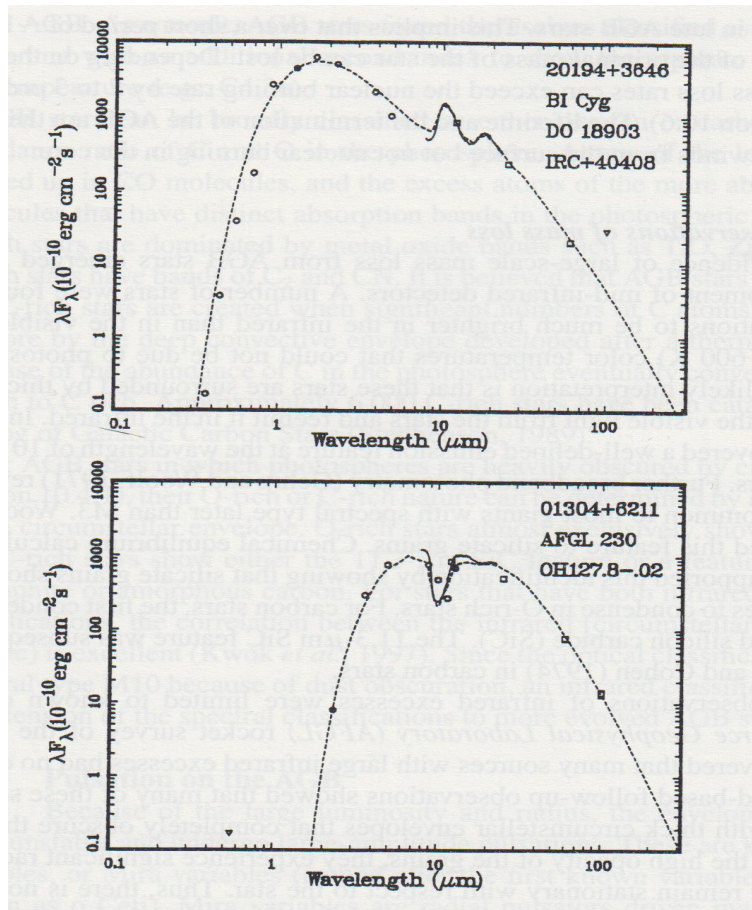


Рис. 7: Распределение энергии в спектре двух звезд АВГ. (Источник: Sun Kwok, The origin and evolution of planetary nebulae, fig. 10.2, p. 109)

## 4.2 Физический механизм

Все предлагаемые механизмы потери массы звездами АВГ можно отнести к одному из трех типов:

- тепловой,
- потеря массы из-за волн в атмосфере,
- потеря массы из-за давления излучения.

Все вышеперечисленные наблюдения указывают на наличие пыли вокруг звезд АВГ. Эта пыль должна неизбежно уноситься от звезды под действием светового давления. Газ в свою очередь должен уноситься с пылью, так

как он связан с ней посредством столкновений частиц пыли и молекул газа. Однако для эффективной потери массы пыль должна сформироваться достаточно близко к звезде, чтобы унести за собой газ из атмосферы. Решением могут быть модели, комбинирующие несколько из предложенных механизмов. Например, предполагающие, что газ выносится в области образования пыли ударными волнами в атмосфере, создаваемыми пульсациями звезд АВГ.

### 4.3 Эмпирические модели

Ввиду сложности точных расчетов и неопределенности конкретного механизма потери массы звездами, для обработки наблюдений предлагаются различные эмпирические модели. Простейшей формулой, выражающей темп потери массы можно считать эмпирическую формулу Реймерса, полученную в 1975 году:

$$\dot{M}_{\text{R}} = 4 * 10^{-13} \eta \frac{L}{L_{\odot}} \frac{R_{\star}}{R_{\odot}} \frac{M_{\odot}^2}{M_{\star}} yr^{-1},$$

где

$$\eta = 8 * 10^4 \frac{\alpha}{1 + \frac{V^2}{V_{esc}^2}}$$

Теоретически она может быть получена при условиях:

- $\alpha = \frac{1}{2\dot{M}(V^2 + V_{esc}^2)} = const,$
- $\frac{V}{V_{esc}} = const.$

Эти условия выражают соотношения между кинетической и потенциальной энергией, которые неверны для реального ветра, однако, из-за своей простоты, эта формула крайне популярна. В общем, эмпирические модели звездного ветра можно разделить на

- предполагающие постепенное увеличение  $\dot{M}$  в течение эволюции на АВГ,
- предполагающие малый темп на протяжении большей части времени и сильный рост темпа в конце фазы АВГ (т. н. свехветер).

Примером первой группы служит формула Реймерса, а также её модификации, лучше или хуже описывающие данные наблюдений. Например, формулы

$$\dot{M}_{\text{VK}} = 1.8 * 10^{-13} \frac{M_{\star}(0)}{8M_{\odot}} \frac{(L_{\star}/L_{\odot})(R_{\star}/R_{\odot})}{(M_{\star}/M_{\odot})} M_{\odot} yr^{-1},$$

(Volk and Kwok, 1988)

$$\dot{M}_{\text{BVK}} = 1.15 * 10^{-13} \left\{ \left( \frac{M(0)}{M_{\odot}} \right)^2 - 10.6 \frac{M(0)}{M_{\odot}} + 10.2 \right\} *$$

$$* \frac{(L_*/L_\odot)(R_*/R_\odot)}{(M_*/M_\odot)} M_{\odot} yr^{-1}.$$

(Bryan et al, 1990)

Примером модели сверхветра служит формула

$$M_{\mathit{mathrm{BH}}} = 4 * 10^{-13} \frac{M_{en,0}}{M_{en}} \frac{(L_*/L_\odot)(R_*/R_\odot)}{(M_*/M_\odot)} M_{\odot} yr^{-1},$$

Baud, Habing, 1983. Здесь использованы обозначения:

- $M_{en,0}$  - масса оболочки в начале фазы излучения ОН,
- $M_{en}$  - масса оболочки в определенный момент.

$M_{en}$  падает до нуля в конце периода АВГ, что даёт резкое возрастание скорости ветра в данной модели.



## Список литературы

- [1] Sun Kwok, *The origin and evolution of planetary nebulae*, Cambridge University press, 2000.
- [2] Потташ С., *Планетарные туманности*, Москва Мир, 1987.
- [3] Marigo P., Girardi L. *Updated synthetic TP-AGB models and their basic calibration*, *Astronomy & Astrophysics manuscript no. 6772*, February 5, 2008.
- [4] [http://www.astronet.ru/db/msg/1170638/structure/star\\_models/supergia/super\\_giant.htm](http://www.astronet.ru/db/msg/1170638/structure/star_models/supergia/super_giant.htm)
- [5] [http://www.astronet.ru/db/msg/1170638/evolution/hr\\_diagram/srg.htm](http://www.astronet.ru/db/msg/1170638/evolution/hr_diagram/srg.htm)
- [6] [http://heritage.sai.msu.ru/uheb/Samus/2\\_3.html](http://heritage.sai.msu.ru/uheb/Samus/2_3.html)