

# Переменные звезды

# Переменные звезды

## История открытий



- Еще в 1572г. знаменитый датский астроном Тихо Браге наблюдал явление вспышки сверхновой, которое считается первым свидетельством существования переменных звезд
- В 1604г. Явление сверхновой было зафиксировано Кеплером.
- Но официальным годом открытия переменности у звезд считается 1596г., когда Дэвид Фабрициус, протестанский пастор и любитель астрономии, открыл переменность звезды Омикрон Кита. Он назвал ее Мирой – “чудесной”. В максимуме “Мира” видна невооруженным глазом, а в минимуме -едва видна в сильные бинокли. Период изменения блеска “Миры” 331,6 суток. В честь нее назвали целый класс долгопериодических переменных звезд - «мириды», которых сейчас открыто несколько тысяч.
- В 1669г. Итальянский астроном Джеминиано Монтанари открыл первую затенную переменную звезду – Бета Персея (известную еще у арабов своим изменчивым видом и названной за это “Алголь”). Две компоненты этой затенной системы имеют период обращения (и изменения блеска) 2сут20 часов и 49 мин.

# Переменные звезды

## История открытий

- В 1784г. Джон Гудрайк открыл первую цефеиду – звезду Дельта Цефея. Период изменения блеска у нее оказался равным 5,3663дня.
- В том же году Гудрайк открыл вторую затменную переменную – Бету Лиры, которая в отличие от Алголя меняет блеск плавно и за более долгий период 12 суток 21 часа и 56 мин. В последствии выяснилось, что из-за близости компонент двойной звезды притягиваются друг к другу и деформируются до формы эллипсов, вследствие чего затмения одной компоненты другой как-бы сглаживаются.
- В дальнейшем, все великие наблюдатели, от Гершеля до Мессье, отличилось открытиями, как минимум, нескольких переменных.
- Вот темпы открытия переменных: 2 к 1786, 18 к 1844, 175 к 1890, 393 к 1896, 4,000 к 1912, 22,650 к 1970 и 28,450 к 1983г.



# Переменные звезды

## Переменные, открытые до 1844г.

SN 1572		Cas	SN	1572	В. Шуллер, Тихо Браге
Mira, Omicron Ceti	Cet	Mira	1596	Дэвид Фабрициус	
P Cygni, Nova 1600		Cygni	Cyg S Dor	1600	Вильем Джансзум Блой
SN 1604		Oph	SN	1604	Бруновский, Кеплер
Algol, Beta Persei		Per	Algol	1669	Джемиано Монтанари
Nova Vulpeculae 1670, CK		Vul	Nova	1670	Дом Антхельме
Chi Cygni		Cyg	Mira	1687	Годфрид Кирх
R Hydrae		Hyd	Mira	1704	Джакомо Филиппо Маральди
R Leonis		Leo	Mira	1782	Кох
Nova 1783 Sagittae, WY Sge		Sge	Nova	1783	Д'Агелет
Eta Aquilae		Aql	Delta Cep	1784	Эдвард Пиггот
Sheliak, Beta Lyrae		Lyr	Beta Lyr	1784	Джон Гудрайк
Delta Cephei		Cep	Delta Cep	1784	Джон Гудрайк
i Bootis B		Boo	W UMa	1785	Вильям Гершель
Ras Algethi, Alpha Herculis		Her	SR c	1795	Вильям Гершель
R Coronae Borealis		CrB	R CrB	1795	Эдвард Пиггот
R Scuti		Set	RV Tau a	1795	Эдвард Пиггот
R Virginis		Vir	Mira	1809	Хардинг
R Aquarii		Aqr	Mira	1810	Хардинг
Epsilon Aurigae		Aur	Algol	1821	Фрич
R Serpentis		Ser	Mira	1826	Хардинг
Eta Carinae		Car	S Dor	1827	Бэрчель
S Serpentis		Ser	Nira	1828	Хардинг
R Cancrī		Cnc	Mira	1829	Шверд
• Betelgeuse, Alpha Orionis		Ori	SR c	1836	Джон Гершель

# Переменные звезды

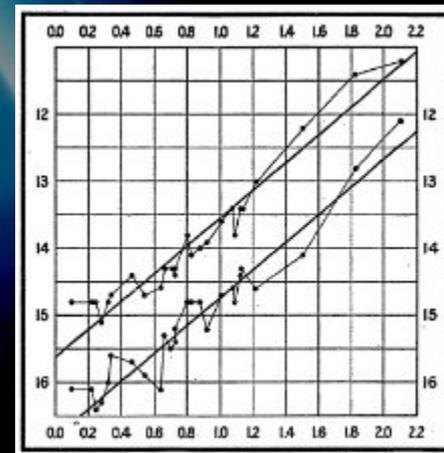
## История открытий

- В 1844 г. Ф. Аргеландер опубликовал обращение любителям астрономии, в котором описал все, что тогда было известно о переменных звездах, описал доступный метод оценки их блеска (названный в последствии его именем) и призвал всех любителей астрономии сотрудничать в этом направлении. Эта дата признана началом серьезных исследований переменных звезд. Инициатива Аргеландера получила широкое признание.
- В 1844г. Было известно 18 переменных звезд, а к 1912г. Их стало уже более 4000!
- Переменные стали наблюдать почти в каждой стране Европы, Японии, США и Южной Америке, Австралии, Египте и Южной Африке.
- В 1880г. в процесс поиска переменных включилась обсерватория Гарвардского университета (Кембридж, Массачусец). Там стали использовать показавший свою высокую эффективность фотографический метод поиска перменных по фотопластинкам.
- Интерес к переменным вырос с развитием астрофизики, и прежде всего, спектроскопии.

# Переменные звезды

## История открытий

- Понимание относительной яркости и переменности звезд полностью изменились после работ Генриетты Сван Ливитт (1868-1921 гг.), сотрудницы обсерватории Гарвардского колледжа и открывательницы 1500 переменных. В 1912г. Ливитт обнаружила, что более яркие цефеиды имеют более длинные периоды переменности и построила линейную зависимость “период-светимость” по цефеидам Малого Магелланова Облака. Этот факт теперь используется для определения шкалы расстояний во Вселенной, а цефеиды получили звание “маяков Вселенной”.
- В 1914 году Шепли была предложена теория пульсаций физических (не затменных) переменных звезд, обоснованная в 1918г. Эддингтоном.
- Открытие диаграммы Герцшпрунга-Рассела и ее эволюционного смысла придало особое значение исследованиям переменных звезд. Была открыта связь между переменностью и процессом звездной эволюции.



# Переменные звезды

## История открытий

- В 1948 г. В Москве вышел **Общий Каталог Перменных Звезд, (ОКПЗ)**, составленный **Б.В.Кукаркиным** и **П.П.Паренаго**. Он содержал сведения о **10912** переменных.
- В 1951г. вышел **“Каталог звезд, заподозренных в переменности»** (8134 звезды).
- Сейчас в **Общем Каталоге Переменных Звезд**, ведение которого за большие заслуги в деле открытия и исследования переменных звезд было поручено российским астрономам, насчитывается свыше **36000** объектов.
- Всего к настоящему времени открыто около **60000** переменных звезд в нашей Галактике и десятки тысяч – в других галактиках.
- Более **40** переменных доступны наблюдениям невооруженным глазом.

# Переменные звезды

## Что такое переменные звезды

- **Итак, переменные звезды – это звезды, блеск которых подвержен колебаниям.**
- **Переменность у звезд возникает вследствие двух причин: обращения вокруг них звезд-спутников в плоскости, близкой к лучу зрения с частичными или полными затмениями компонентов, либо физическими процессами, происходящими в самих звездах.**
- **Амплитуды изменения блеска переменных звезд меняются от тысячных долей звездной величины до 15-19<sup>m</sup> и больше.**
- **Периоды изменения блеска переменных также находятся в широких пределах – от секунд до сотен дней.**
- **Переменные звезды имеют собственные названия с использованием одной или двух заглавных латинских букв (например, RR Лиры). Если в созвездии столько переменных звезд, что всех возможных комбинации из двух букв оказывается недостаточно, остальные переменные звезды именуется буквой V и порядковым номером, например V1340.**

# Переменные звезды

## Типы переменных звезд

Известны три основных типа переменных звезд:

- **Затменные переменные звезды** (пример – Алголь)

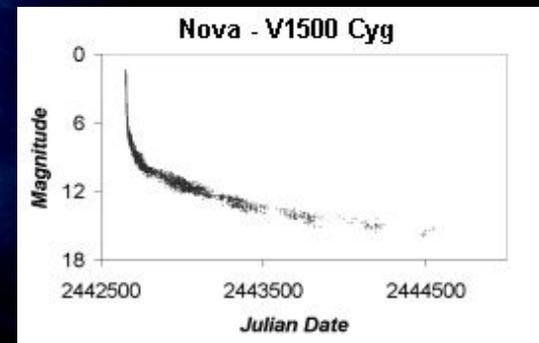
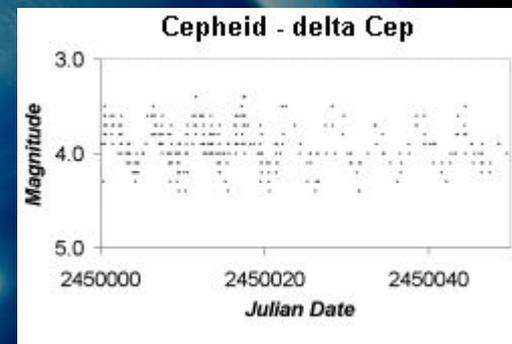
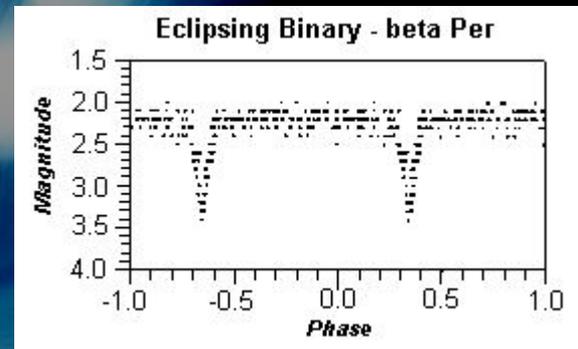
Изменение блеска у затменных переменных обусловлено обращением вокруг них спутников в плоскости, близкой к лучу зрения с частичными или полными затмениями компонентов

- **Пульсирующие переменные** (пример- Дельта Цефея)

Изменение блеска пульсирующих звезд связано периодическим расширением и сжатием поверхностных слоев, т.е. - реальной пульсации.

- **Эруптивные переменные звезды** (Новые, сверхновые)

Эруптивные, или катаклизмические, или взрывные звезды резко меняют блеск вследствие случайных мощных взрывов, вызванных термоядерными



# Переменные звезды

## Пульсирующие переменные звезды

**Цефеиды** (Период: 1-70 дней, амплитуда: 0,1-2.0m)

Эти массивные звезды ( $3-16 M_{\odot}$ ,  $10-150 R_{\odot}$ ) имеют высокую светимость и класс F в максимуме, а G-K в минимуме.

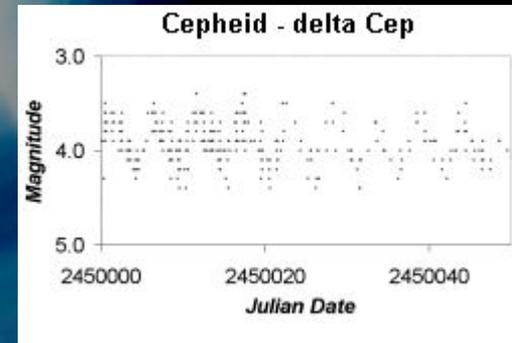
Чем горячее звезда, тем больше ее период. Цефеиды имеют прямую зависимость периода-светимость.

$M = a \lg P + b$ , где  $M$  - средняя абсолютная звездная величина цефеиды,  $a$  и  $b$  - наклон и нуль-пункт зависимости соответственно, зависят от спектрального диапазона ( в визуальной области спектра  $a = -2.87$  и  $b = -1.01$ ).

Помня, что  $M = m + 5 - 5 \lg R$ , получаем  $\lg R = 0.2 (m - M + 5)$ . Таким образом, найдя цефеиду в другой галактике, по ее периоду можно вычислить расстояние до нее!

**Звезды типа RR Lyr** (Период: 0,2-1 дня, амплитуда: 0,3-2m)

Это короткопериодические пульсирующие белые гиганты класса A. Они старше и менее массивные, чем цефеиды.



# Переменные звезды

## Пульсирующие переменные звезды

**Звезды типа RV Tau** (Период: 30-100 дней, амплитуда: 3m)

Эти желтые сверхгиганты классов G и K, имеют множество резких и глубоких минимумов блеска. Период определяется между двумя глубокими минимумами.

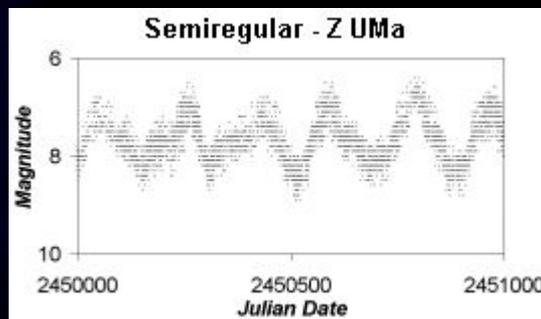
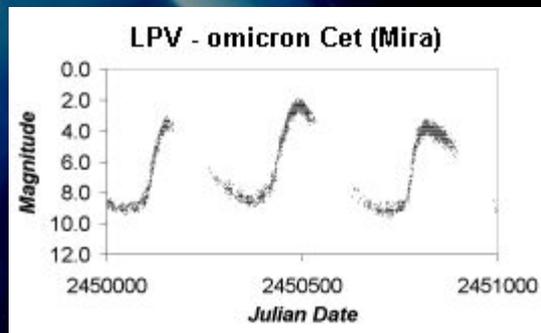
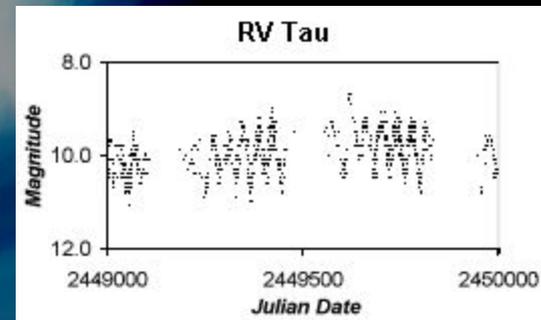
**Долгопериодические** (Период: 80-700 дней, максимум 1380 дней, амплитуда: 2.5-10m)

Это красные гиганты классов M, C и S. Температура их меняется от 1800K в минимуме до 2300K в максимуме. Большим периодам соотв. меньшие светимости.

Переменность связана с пульсациями самой звезды и изменения прозрачности протяженной атмосферы.

**Полурегулярные и неправильные** (Период: 30-1000 дней, амплитуда: 0,5-2,5m)

Гиганты и сверхгиганты с нерегулярными пульсациями.



# Переменные звезды

## Пульсационная теория

Математическая теория пульсаций была разработана еще Эддингтоном, но он не указал источник энергии, способный поддерживать пульсации.

По теории Эддингтона, вследствие нарушения равновесия между давлением и гравитацией, начинаются свободные, постепенно затухающие пульсационные колебания. Звезда периодически увеличивается и уменьшается в объеме, колеблясь около положения равновесия.

При вздутии звезды ее радиус растет и площадь фотосферы (а значит и светимость) увеличивается.

При этих колебаниях должна периодически меняться температура звезды.

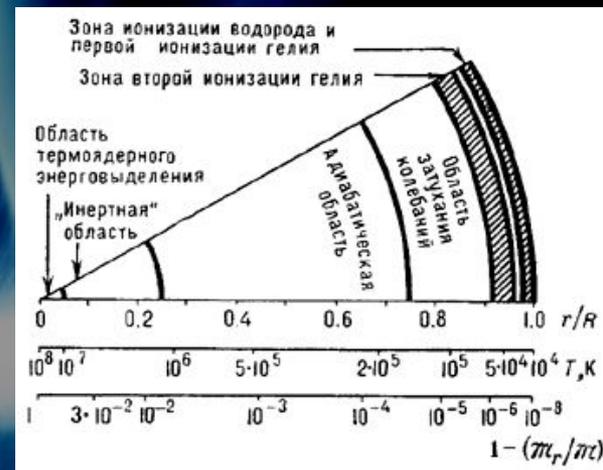
Теория выводит зависимость между плотностью и периодом пульсации звезды  $P\sqrt{\rho}=\text{Const}$

Отсюда можно вывести зависимость светимости от периода и температуры звезды, которой подвержены все пульсирующие звезды:

$$\text{Lg}L=\text{Const} + 12/7 \text{lg} P + 36/7 \text{lg} T$$

# Переменные звезды

## Пульсационная теория



Теория Эддингтона не могла полностью объяснить все наблюдательные данные. Эддингтон полагал, что звезда пульсирует целиком, а оказалось, что пульсируют только внешние слои. Это впервые предположил и подкрепил расчетами С.А.Жевакин. Его идеи были затем развиты Р.Кристи. Оказывается, звездная переменность обусловлена особыми свойствами атома гелия. Оказалось, что гелиевая зона, расположенная во внешних слоях звезды, способна аккумулировать энергию.

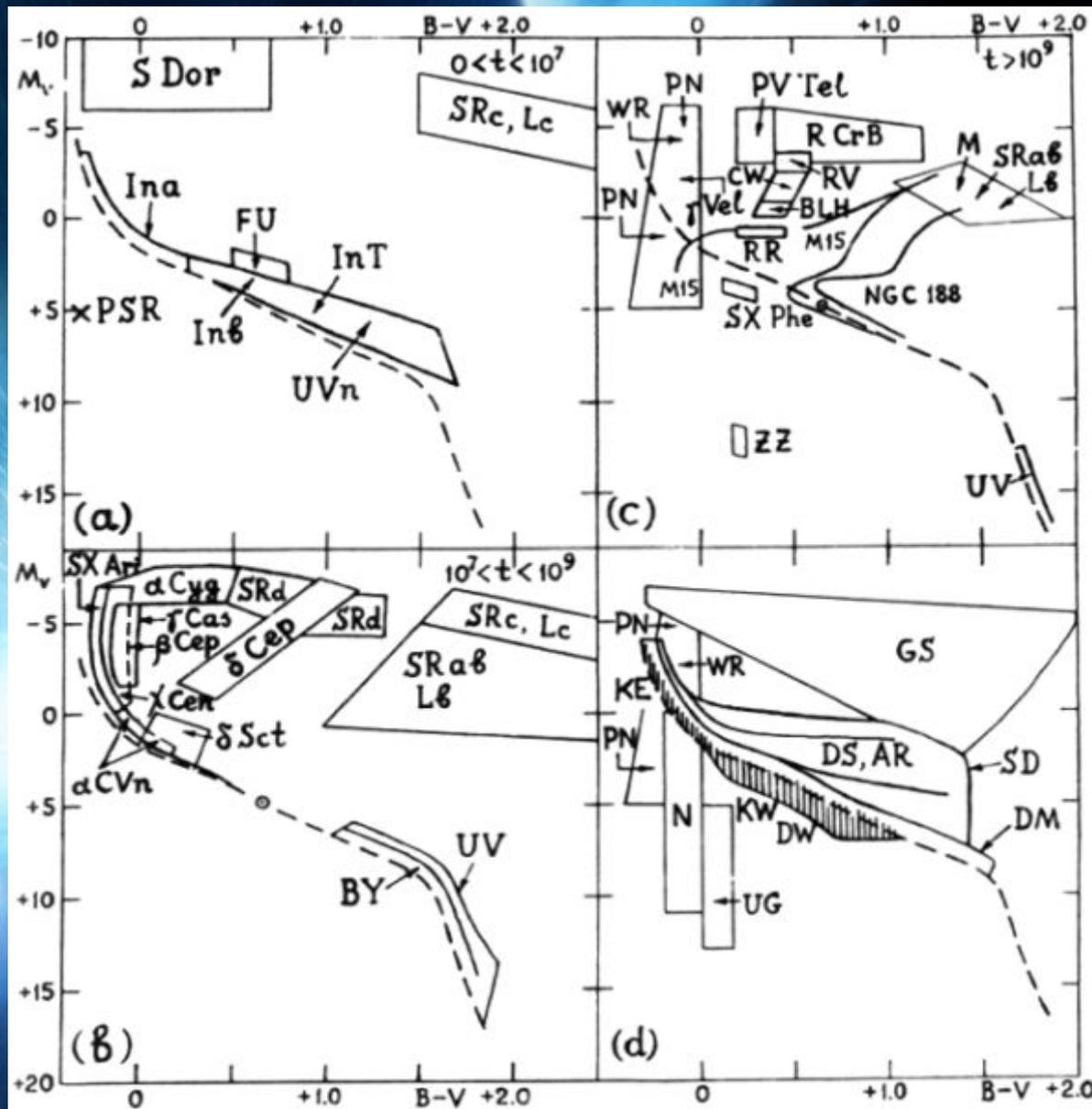
Проходя через гелиевую зону, излучение из недр звезды поглощается, ионизируя атомы гелия. При этом температура повышается. Ионизованный гелий более прозрачен, поэтому накопленная энергия выходит наружу, а среда при этом охлаждается. Понижение температуры сопровождается рекомбинацией ионов гелия и электронов, и атомы гелия становятся нейтральными, способными снова поглощать энергию. Цикл замыкается, чтобы повторяться снова.





# Переменные звезды

## Переменность и эволюция

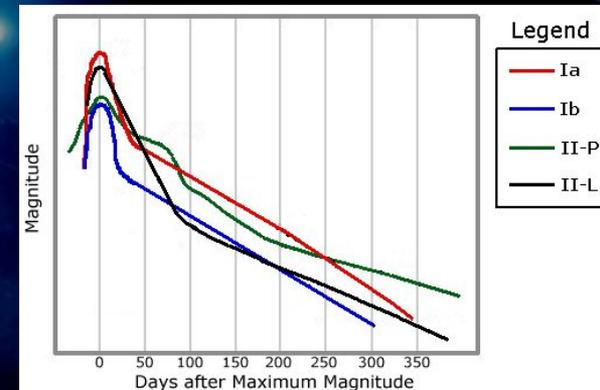
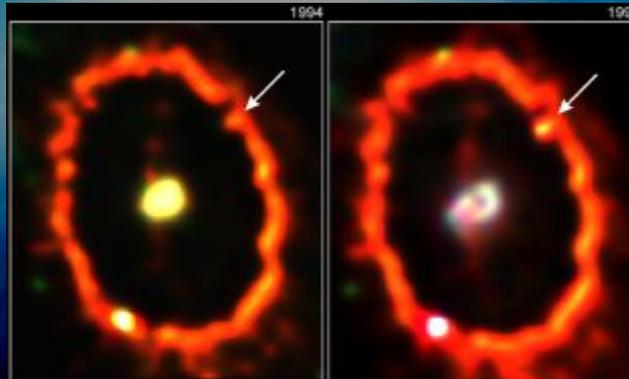
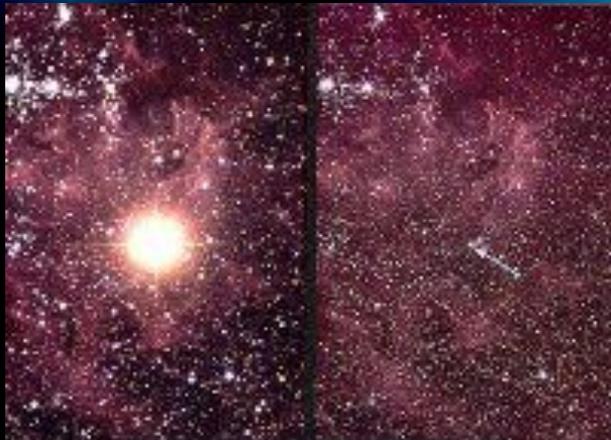
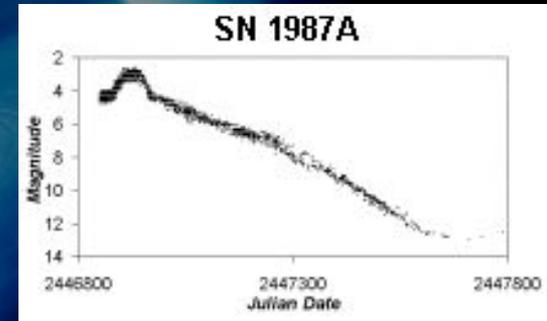


# Переменные звезды

## Катаклизмические переменные звезды

### Сверхновые (амплитуда: 20m)

Эти массивные звезды однократно вспыхивают и быстро меняют блеск в результате катастрофического взрыва. Сверхновые вспыхивают в галактиках раз в несколько десятков лет. Светимость в максимуме в миллионы раз сильнее солнечной. По спектру и виду кривой блеска сверхновые делятся на несколько видов. Сверхновая – результат окончания эволюции звезды, когда она разрушается и превращается в компактный объект.



# Переменные звезды

## Сверхновые типов I и II.

Один из видов сверхновых типа Ia — результат внезапной ядерной детонации звезды

- 1 Более массивная из двух звезд солнечного типа, исчерпав свое топливо, превращается в белый карлик
- 2 Белый карлик захватывает газ, теряемый соседкой, и приближается к критической массе
- 3 «Плазма» неуправляемых ядерных реакций возгорается в турбулентном ядре карлика
- 4 Плазма устремляется наружу, превращая углерод и кислород в никель
- 5 За несколько секунд карлик полностью разрушается. Затем еще несколько недель радиоактивный никель распадается, вызывая свечение остатков звезды

Белый карлик

Ядро

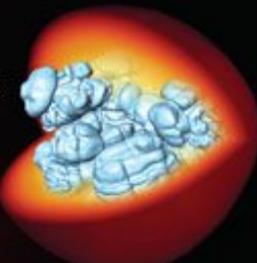
Углерод/Кислород

Галлий

Фронт горения

Никель

Прорыв в моделировании сверхновых позволил исследовать турбулентность. Здесь показано, что произойдет через 0,6 с после воспламенения. Фронт ядерного горения имеет турбулентную, пузырчатую структуру (голубой). Турбулентность служит причиной быстрого продвижения фронта и подвешивания стабилизирующих механизмов звезды



Сверхновые другого рода образуются при сжатии звезд с массами более 8 масс Солнца. В зависимости от типа Ia, Ib, Ic или II, в зависимости от наблюдаемых особенностей

- 1 Массивная звезда в конце жизни имеет слоистую структуру
- 2 Железо не участвует в ядерном синтезе, поэтому в ядре не выделяется тепло. Газовое давление падает, и лежащее выше вещество устремляется вниз
- 3 За секунду ядро сжимается и превращается в нейтронную звезду. Падающее вещество отскакивает от нейтронной звезды и создает ударную волну
- 4 Нейтрино вырывается из новорожденной нейтронной звезды, неравномерно подталкивая наружу ударную волну
- 5 Ударная волна пронизывает звезду, разрывая ее на части

2 млн. км

200 км

Железо

Кремний

Кислород

Углерод

Галлий

Водород

Нейтронная звезда

Ударная волна

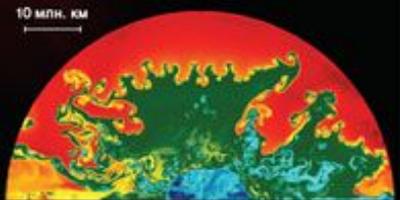
Ударная волна

Нагретый нейтрино газовый пузырь

Холодный газ прорывается внутрь

Ударная волна пронизывает звезду, разрывая ее на части

Современные модели способны детально проследить хаотическое движение в процессе взрыва. Здесь показана внутренность звезды через 5,5 ч после начала взрыва. Движущиеся вверх крупные пузыри поддерживают ударную волну до расстояния 300 млн. км. Нейтрино, вообще-то очень слабо взаимодействующие частицы, устремляются наружу в таком количестве и с такой энергией, что начинают играть главную роль. Турбулентность перемешивает углерод, кислород, кремний и железо из глубоких слоев (голубой, бирюзовый) с лежащими выше гелием (зеленый) и водородом (красный)



# Переменные звезды

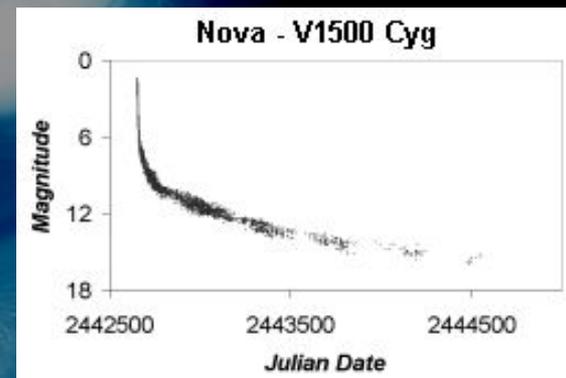
## Катаклизмические переменные звезды

**Новые** (Период: 1-300 дней, амплитуда: 7-16m)

Новые - это двойные системы, состоящие из обычной звезды и белого карлика, на который ее вещество перетекает, образуя аккреционный диск. Так на поверхности карлика накапливается вещество, способное вступить в ядерные реакции H-He. Вспышка новой – бурное осуществление такого процесса. После вспышки звезда возвращается к первоначальному состоянию, а оболочка массой  $10^{-5} M_{\odot}$  расширяется со скоростью 1000 км/с и растворяется в пространстве.

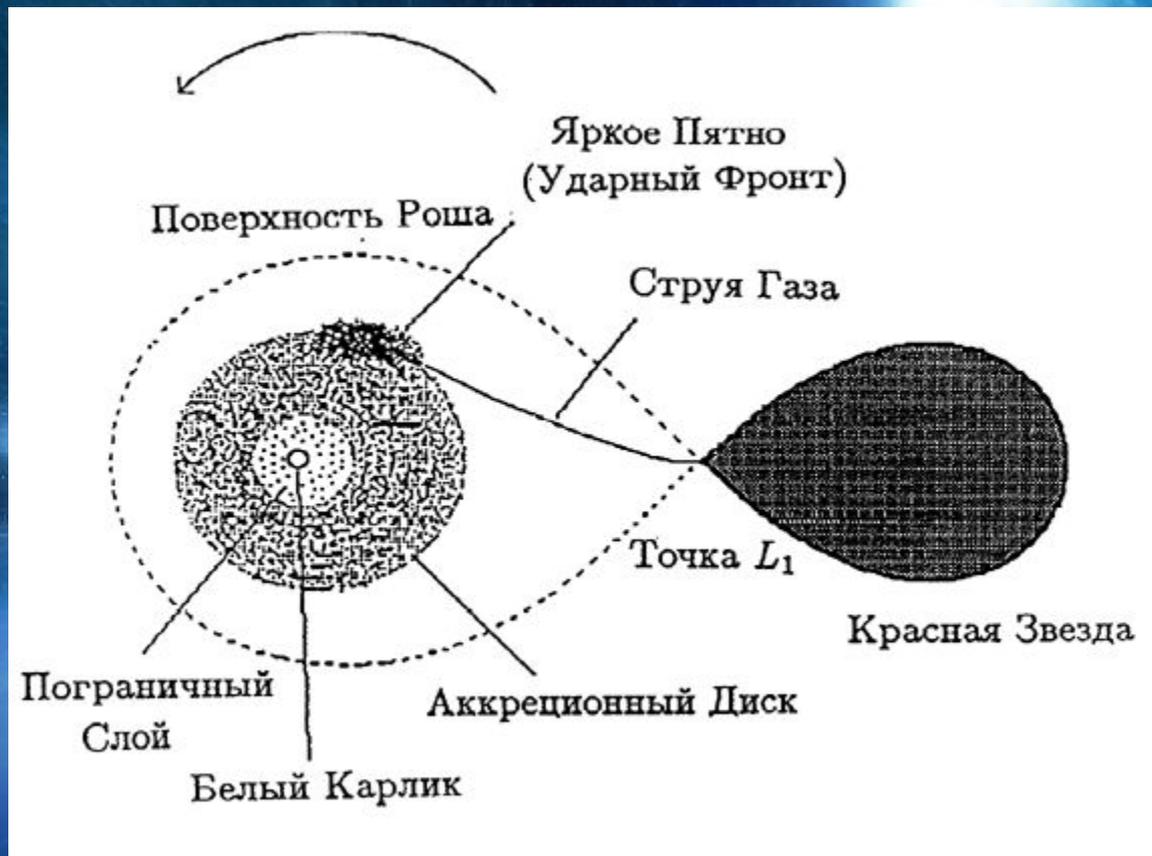
За несколько дней система вспыхивает на  $\sim 12$  величин и постепенно уменьшает яркость в течение месяцев или лет. Спектральный класс в максимуме A-F.

Ежегодно в Галактике вспыхивает от 25 до 200 новых.



# Переменные звезды

## Катаклизмические переменные звезды



# Переменные звезды

## Катаклизмические переменные звезды

**Повторные новые** (Период: 1-300 дней, амплитуда: 7-16m)

Это новые, вспыхивающие более одного раза. Для них найдена зависимость: чем меньше амплитуда вспышки, тем чаще вспышки. Напр., T CrV вспыхивает раз в 80 лет.

**Карликовые новые** подразделяются на подклассы:

**U Geminorum** (Период: 30-500 дней: амплитуда: 2-6m)

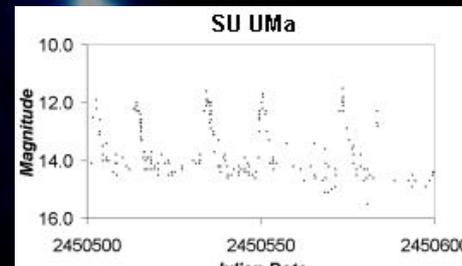
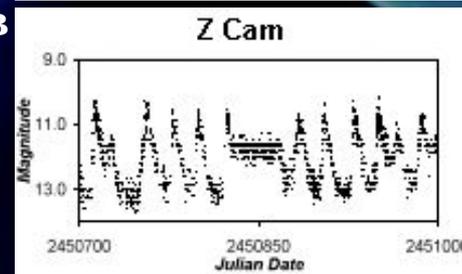
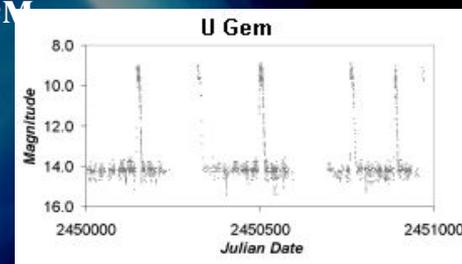
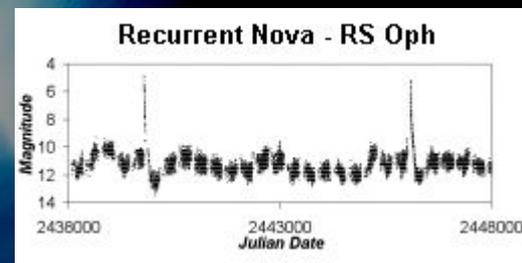
После долгих периодов “тишины” они резко вспыхивают в течение 5-20 дней.

**Z Camelopardalis**

Циклические изменения блеска прерываются периодами постоянной яркости на уровне 1/3 от максимума.

**SU Ursae Majoris**

Резкие вспышки (1-2 дня, либо 10-20 дней) сменяются периодами мелких колебаний.

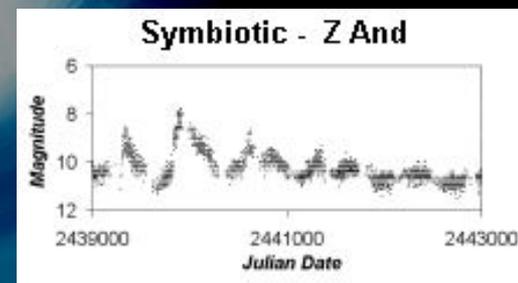


# Переменные звезды

## Катаклизмические переменные звезды

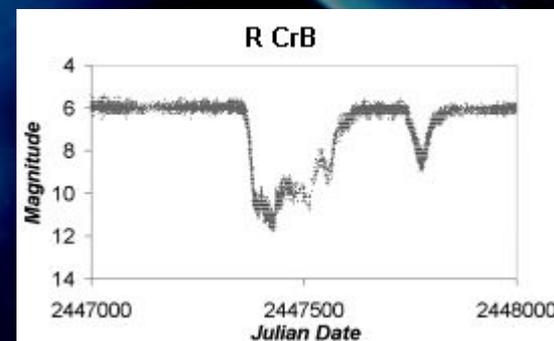
**Симбиотические звезды** (Период: меняется, амплитуда: до 3m)

Близкие двойные системы, состоящие из красного гиганта и горячей голубой звезды, погруженные в туманность. Демонстрируют новоподобные вспышки до 3m.



**R Corona Borealis** (Период: меняется, амплитуда: до 9m)

Редкие, яркие, бедные водородом и богатые углеродом звезды, проводящие большую часть времени в максимуме блеска, временами слабеющие на 9m с нерегулярными интервалами, а затем медленно возвращающиеся к нормальному блеску в течение нескольких месяцев или лет. Имеют классы F-K и R.



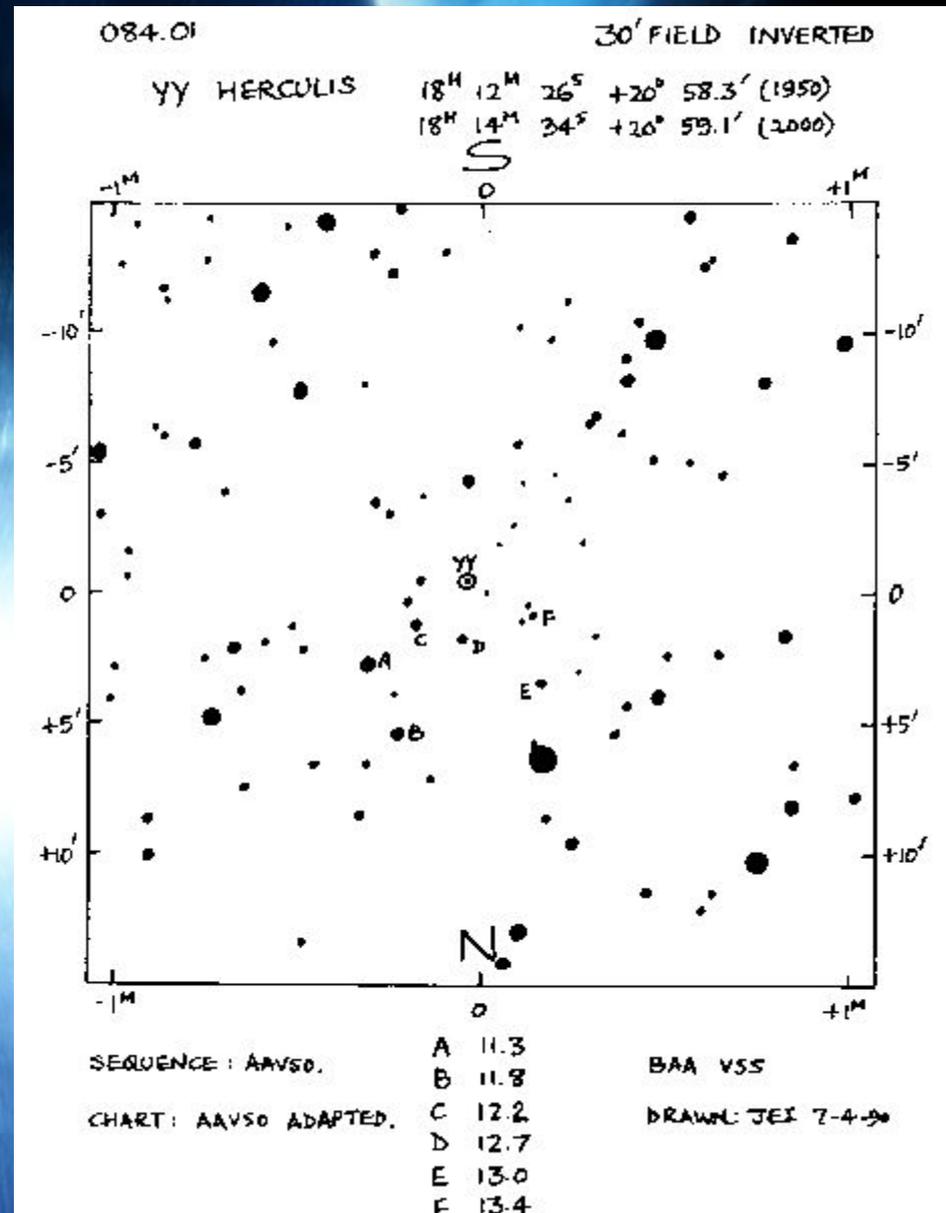
# Переменные звезды

## Методы наблюдений переменных звезд

- В основу метода определения блеска звезд положено сравнение их с соседними звездами, блеск которых хорошо известен и не меняется со временем.
- Такие звезды называют **звездами сравнения**.
- Заранее выбирается несколько звезд сравнения, имеющих блеск в промежутке изменения блеска переменной.
- Звезды сравнения должны находиться как можно ближе к исследуемой переменной, в пределах поля зрения инструмента.
- Разница блеска между звездами сравнения должна быть не больше 0,4-0,5m, а цвет не должен сильно отличаться от цвета переменной.
- Карты окрестностей наиболее ярких переменных звезд публикуются в Школьном Астрономическом календаре-ежегоднике и в Справочнике Любителя Астрономии под редакцией П.Г.Куликовского.
- Подробные карты окрестностей с указанием звезд сравнения для множества переменных доступны через Интернет на сайте Ассоциации Наблюдателей Переменных Звезд (AAVSO) по адресу <http://www.aavso.org/vsp>

# Переменные звезды

Пример карты  
окрестностей  
переменной



# Переменные звезды

## Метод оценки блеска Пиккеринга

- Первый способ был предложен Э. Пиккерингом. Он предложил сравнивать переменную звезду ( $v$ ) с двумя звездами сравнения - немного более яркой ( $a$ ), и менее яркой ( $b$ ), мысленно деля интервал между их блеском на 10 равных частей. Сравнивая блеск переменной и звезд сравнения, необходимо установить положение блеска переменной между блеском звезд сравнения в десятых долях между разницей их блеска. К примеру, если переменная звезда настолько же слабее звезды  $a$ , насколько ярче звезды  $b$ , то оценка блеска записывается в виде  $a5v5b$ . Если же блеск переменной почти равен блеску звезды  $a$ , и значительно больше блеска звезды  $b$ , оценка записывается в виде  $a1v9b$ .

Отсюда легко определить звездную величину переменной. Для последнего случая, мы получим два значения:

$$mv = ma + 0.1 (mb - ma), \quad mv = mb - 0.9 (mb - ma).$$

Из этих, и других значений блеска переменной, полученных с другими звездами сравнения, берется среднее арифметическое, округляемое до сотых долей зв. величины. По полученным результатам строится кривая блеска.

# Переменные звезды

## Метод оценки блеска Нейланда-Блажко

- Другой способ, наиболее рекомендуемый к использованию более опытными наблюдателям, был предложен Неландом и С.Н. Блажко.
- В отличие от метода Пиккеринга, в этом методе интервал блеска между звездами сравнения делится не на десять, а на то число частей (степеней), которое реально может оценить наблюдатель.
- К примеру, интервал блеска между переменной  $v$  и более слабой звездой сравнения  $b$  вдвое больше, чем между  $v$  и  $a$ . Оценив интервал блеска между  $a$  и  $b$  в  $3$  степени, мы записываем оценку как  $a3v6b$ .
- Ряд наблюдений, полученный методом Нейланда-Блажко, можно обработать статистическими методами, но начинающим наблюдателям легче всего определять текущий блеск переменной по тому же принципу, что и в методе Пиккеринга.
- Хотя точность визуальных оценок блеска у начинающих наблюдателей равна, в среднем,  $0.2m$ , со временем она увеличивается в 2-3 раза.

# Переменные звезды

## Метод оценки блеска Волохова-Байера

- Наиболее точный и доступный метод оценки блеска был предложен А.Н. Волоховым (Москва) и независимо от него М Байером (Гамбург) более 65 лет назад.
- Метод основан на зависимости расстояния, необходимого для полного исчезновения звезды при расфокусировке от ее яркости.
- Для реализации этого метода необходимо проградуировать фокусирующее колесо (обычно на 360 делений) и последовательными наблюдениями звезд с известными величинами построить линейный график зависимости значений шкалы со звездными величинами.
- После этого определение текущего блеска переменной звезды будет сводиться к простой операции вывода ее из фокуса до полного исчезновения и нахождения текущего значения блеска по графику зависимости делений шкалы от зв. величины. Калибровочный график желательно выполнять перед каждым наблюдением и желательно по звездам, близким к изучаемой области.
- Таким методом можно производить оценки блеска короткопериодических переменных с достаточно высокой точностью (0.02m).

# Переменные звезды

## Особенности наблюдения переменных

- Долгопериодические переменные стоит наблюдать один раз в 7-10 дней, что наиболее реально не зависимо от погодных условий.
- Остальные переменные звезды необходимо наблюдать каждый ясный вечер, и тем чаще за ночь, чем меньше период изменения их блеска.
- Особенно интересны науке наблюдения вблизи моментов минимумов у затменных переменных звезд и максимумов физических переменных звезд.
- После освоения методов наблюдения и достижения более высокой точности оценки блеска, можно переходить к наблюдению полуправильных и неправильных переменных звезд, имеющих огромный научный интерес.
- Наблюдатели, хорошо знакомые со звездным небом, могут включиться в поиски новых и сверхновых звезд.
- Фотографирование областей переменных на зеркальную фотокамеру или ПЗС позволяет сохранить «слепок» неба, задокументировать наблюдения, и произвести оценку блеска в более благоприятной обстановке. Оценка блеска можно будет выполнить более точно при помощи компьютерных программ.