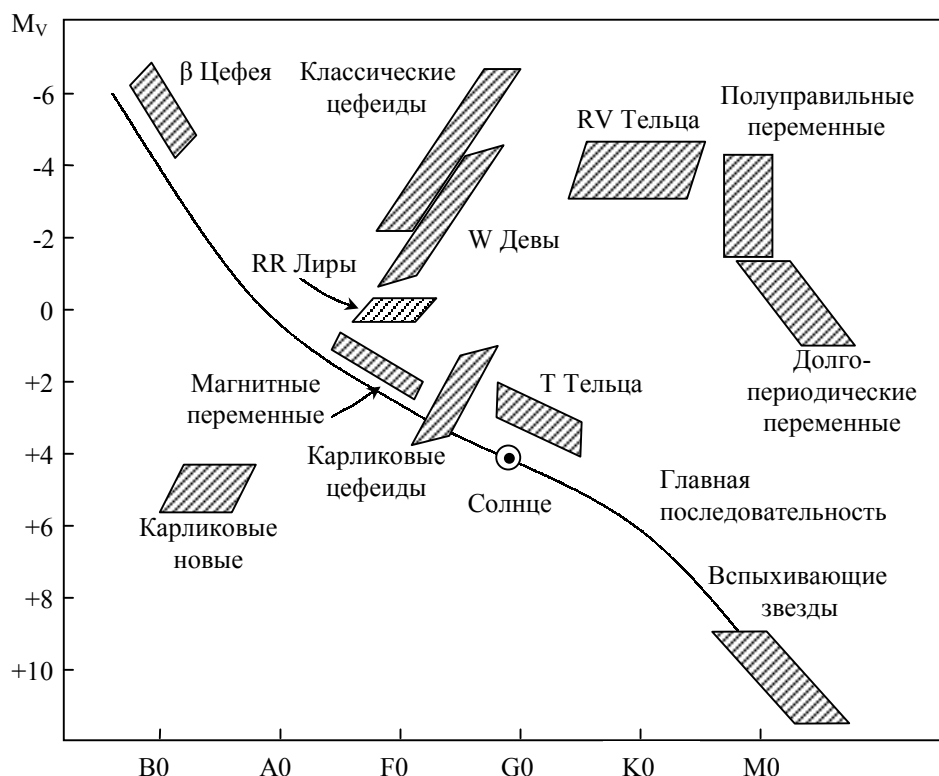


ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Звезды с меняющейся величиной называются *переменными*. Наиболее свежие каталоги содержат около 40000 звезд известных либо подозреваемых в переменности.

Расположение различных типов переменных звезд на диаграмме Герцшпрунга – Рессела приведено на рисунке.



Строго говоря, все звезды переменные. Как мы уже видели, строение и яркость звезд меняются в процессе их эволюции. Хотя эти изменения обычно медленные, некоторые эволюционные фазы могут быть чрезвычайно быстрыми. В некоторых стадиях эволюции будут также периодические колебания, например пульсации внешних слоев звезд.

Малые колебания в звездной яркости вызываются также горячими и холодными пятнами на поверхности звезды, появляющимися и исчезающими при ее вращении вокруг своей оси. Светимость Солнца слегка меняется из-за солнечных пятен. Возможно, имеются аналогичные пятна почти на всех звездах.

Вначале звездные яркости определялись визуально сравнением звезд близких друг к другу. Позже сравнения делались на фотопластинках. В настоящее время наиболее точные наблюдения делаются фотозлектрически или с использованием ПЗС-матриц. Изменение звездной величины как функции времени называется *кривой блеска* звезды. Из нее получают *амплитуду* колебания звездной величины и *период*, если колебание периодическое.

Классификация.

Классификация переменных звезд основана на форме кривой блеска, спектральном классе и наблюдаемым лучевым движениям. Спектр может содержать темные линии поглощения от вещества вокруг звезды. Наблюдения могут проводиться также и вне оптической области. Так, радиоизлучение некоторых переменных (например, вспыхивающих звезд) сильно возрастает одновременно с их оптической яркостью. Примерами радио и рентгеновских переменных являются радио и рентгеновские пульсары, а также рентгеновские барстеры.

Переменные обычно делятся на три главных типа: *пульсирующие*, *эруптивные* и *затменные переменные*. Затменные переменные являются двойными системами, у которых компоненты периодически проходят друг перед другом. У этих переменных световые колебания не соответствуют какому-либо физическому изменению в звездах. Они были рассмотрены нами при изучении двойных звезд. У других переменных яркостные вариации есть внутреннее свойство самих звезд. У пульсирующих переменных колебания яркости обусловлены расширением и сжатием внешних слоев. Эти переменные являются гигантами и сверхгигантами, которые дошли до неустойчивой стадии в своей эволюции. Эруптивные переменные являются обычно слабыми звездами, извергающими массу. В большинстве своем они являются членами тесных двойных систем, в которых масса перетекает с одного компонента на другой.

Вдобавок к этому известно немного *вращающихся переменных*, у которых яркостные колебания обусловлены различием температуры на поверхности, звездными пятнами, попадающими в поле зрения, когда звезда вращается. Периоды вращающихся переменных простираются от примерно 1 суток до 25 суток, а амплитуды меньше, чем $0.^m1$.

Пульсирующие переменные.

Вместе с изменением яркости пульсирующих переменных изменяются длины волн их спектральных линий. Эти изменения обусловлены эффектом Доплера, показывая, что внешние слои звезды действительно пульсируют. Наблюдаемые скорости движения газа имеют значения в области $40 - 200 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$.

Диаметр звезды в течение пульсации может удваиваться, но обычно изменения размеров меньше. Главной причиной светового колебания является периодическое изменение поверхностной температуры. Мы уже знаем, что светимость звезды чувствительно зависит от ее эффективной температуры, $L \sim T_e^4$. Поэтому малое изменение эффективной температуры приводит к большому изменению яркости.

Период пульсации соответствует *собственной частоте* звезды. Подобно колебаниям камертона, звезда имеет основную частоту колебаний. В дополнение к основной частоте возможны другие частоты – «обертоны». Наблюдаемое

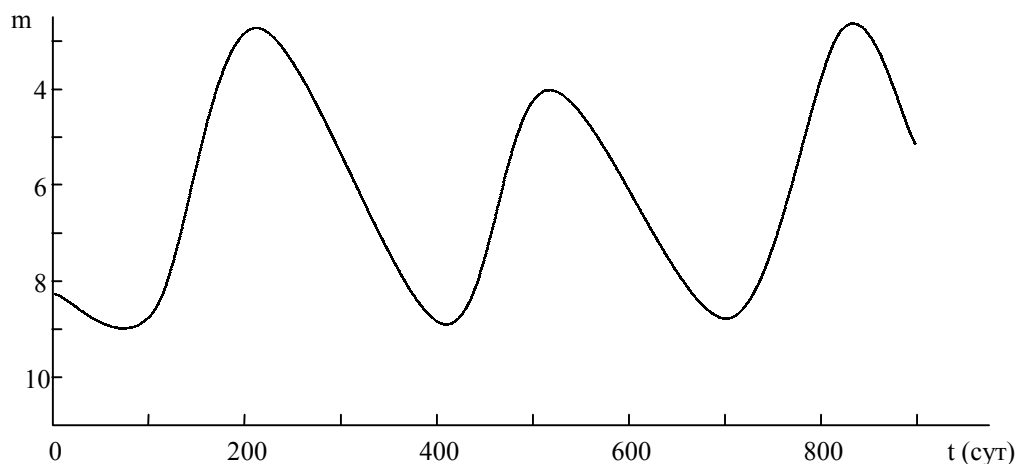
изменение яркости может быть объяснено как суперпозиция всех этих колебаний. В 1920 г. английский астрофизик сэр Артур Эддингтон показал, что период пульсации P обратно пропорционален корню квадратному из средней плотности

$$P \sim \rho^{-\frac{1}{2}}.$$

В нормальном состоянии звезда находится в устойчивом гидростатическом равновесии. Если ее внешние слои расширяются, плотность и температура падают. Давление тогда становится меньше, и сила гравитации снова будет сжимать газ. Однако, если энергия не будет переноситься движением газа, эти колебания затихнут.

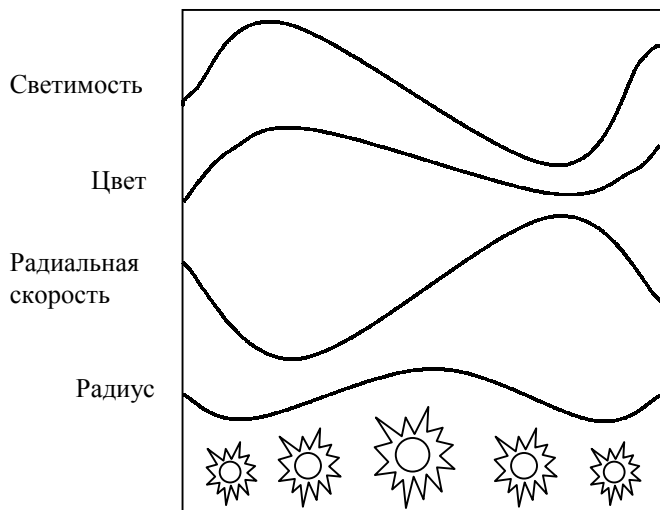
Поток лучистой энергии из звездных недр смог бы обеспечить источник энергии для колебаний звезды, если бы он предпочтительно поглощался в областях с более высокой плотностью газа. Обычно это не имеет места, но в *зонах ионизации*, где водород и гелий частично ионизованы, непрозрачность действительно становится больше, когда газ сжимается. Если зоны ионизации находятся в атмосфере на подходящей глубине, энергия, поглощаемая в процессе сжатия и освобождаемая в процессе расширения зоны ионизации, может управлять колебанием. Звезды с температурой поверхности 6000 – 9000К доступны для такой неустойчивости. Соответствующая часть HR-диаграммы называется областью цефеидной неустойчивости.

Мира-переменные. Мира-переменные (названные так по имени первой открытой переменной такого типа Mira Ceti) являются сверхгигантами класса М, обычно с эмиссионными линиями в их спектрах. Они теряют газ посредством устойчиво постоянного звездного ветра. Их периоды 100 – 1000 суток, и по этой причине их также иногда называют долгопериодическими переменными. Типичная амплитуда колебаний блеска около шести звездных величин в видимой области. Период самой Мира около 330 суток, а ее диаметр около $2a.e.$ В максимуме блеска Мира имеет величину 2 – 4, но в минимуме ее блеск может упасть до 12-й величины. Эффективная температура Мира-переменных около 2000К. Поэтому 95% их излучения является инфракрасным, и очень малое изменение в температуре может вызвать очень большое изменение в видимой яркости.



На рисунке приведена типичная кривая блеска долгопериодической переменной типа Миры Кита.

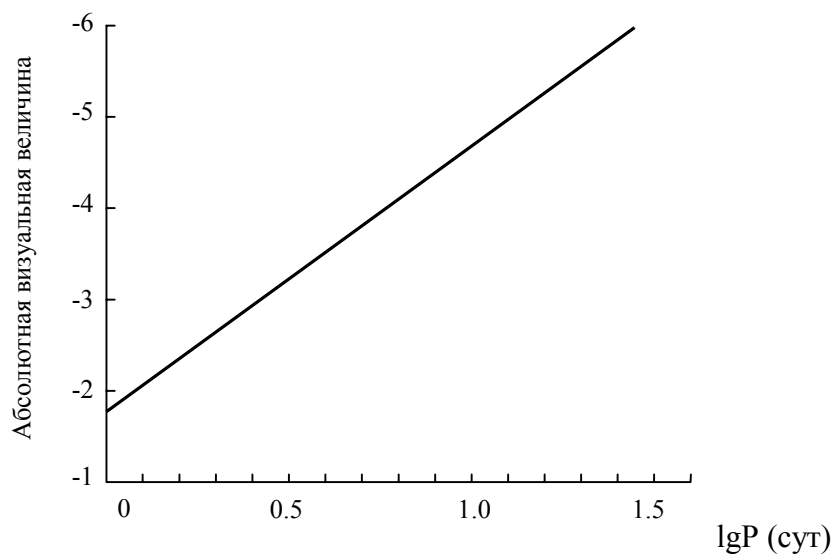
Цефеиды. Одними из наиболее важных пульсирующих переменных являются цефеиды, названные так по имени первой открытой звезды такого типа δ Цефея. Это сверхгиганты населения типа I, спектральных классов F – K. Их периоды 1 – 50 суток, а амплитуды 0.3 – 2.5 звездных величин. Форма кривой блеска является правильной, показывая достаточно быстрое увеличение яркости с последующим более медленным ее уменьшением.



Изменение яркости, цвета и размера цефеиды в процессе ее пульсации.

Имеется замечательная связь между периодом цефеиды и ее абсолютной величиной (т.е. светимостью), открытая в 1912 г. Генриеттой Ливитт у цефеид Малого Магелланового Облака. Зависимость «*период – светимость*» может использоваться для измерения расстояний до звезд и ближайших галактик.

Мы уже знаем, что период пульсаций связан со средней плотностью. С другой стороны, размер звезды, а следовательно ее средняя плотность, связаны с ее полной светимостью. Т.о. можно понять, почему должна быть зависимость между периодом и светимостью пульсирующей звезды.



Абсолютные звездные величины M и периоды P классических цефеид показаны на приводимом здесь рисунке. Зависимость между M и $\lg P$ является линейной. Однако, до некоторой степени, светимость цефеид зависит также от цвета – более голубые звезды ярче. Для более точного определения расстояния этот эффект необходимо принимать во внимание.

Звезды типа RR Лиры (RR Lyrae). Третьим важным классом пульсирующих переменных являются звезды типа RR Лиры. Колебания их блеска меньше, чем у цефеид, обычно меньше одной звездной величины. Их периоды тоже коротки, меньше суток. Звезды RR Лиры являются старыми звездами населения 2-го типа. Обычно они встречаются в шаровых скоплениях и поэтому назывались раньше переменными скоплений.

Абсолютные величины звезд типа RR Лиры около $M_V = 0.6 \pm 0.3$. Все они имеют примерно одинаковый возраст и массу, и представляют поэтому одинаковую эволюционную фазу, в которой гелий только начинает гореть в ядре. Так как абсолютные величины переменных типа RR Лиры известны, они могут быть использованы для определения расстояний до шаровых скоплений.

Другие пульсирующие переменные. Одной из дополнительных больших групп пульсирующих звезд являются *полуправильные* и *неправильные* переменные. Они являются сверхгигантами, часто очень массивными молодыми звездами с непостоянными пульсациями в их протяженных внешних слоях. Если имеется некоторая периодичность в пульсациях, то эти переменные называются полуправильными; в противном случае они называются неправильными. Примером полуправильной переменной является Бетельгейзе (α Ориона). Механизм пульсаций этих звезд еще хорошо не понят, так как их внешние слои конвективны, а теория звездной конвекции все еще плохо развита.

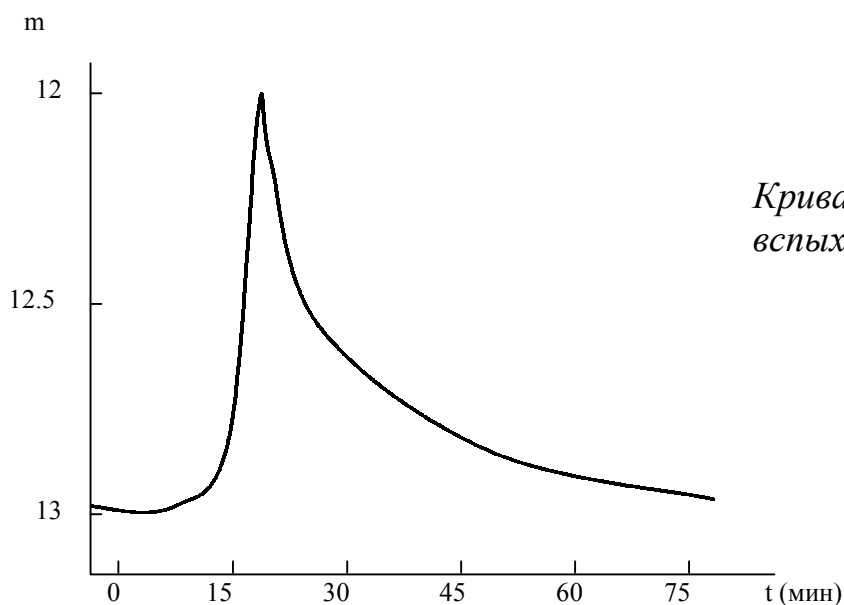
Эруптивные (вспыхивающие) звезды.

У эруптивных переменных нет правильных пульсаций. Вместо этого случаются неожиданные взрывы с выбросом вещества в пространство. Масштабы взрывов простираются от малых локальных извержений (вспыхивающие звезды) до взрыва целой звезды (сверхновые).

Вспыхивающие звезды. Вспыхивающие или звезды типа UV Кита (UV Ceti) являются карликовыми звездами спектрального класса M. Это молодые звезды. Они наиболее часто обнаруживаются в молодых звездных скоплениях и ассоциациях. Через нерегулярные интервалы времени на поверхности этих звезд происходят вспышки, аналогичные вспышкам на Солнце. Вспышки связаны с возмущениями магнитного поля на поверхности звезд.

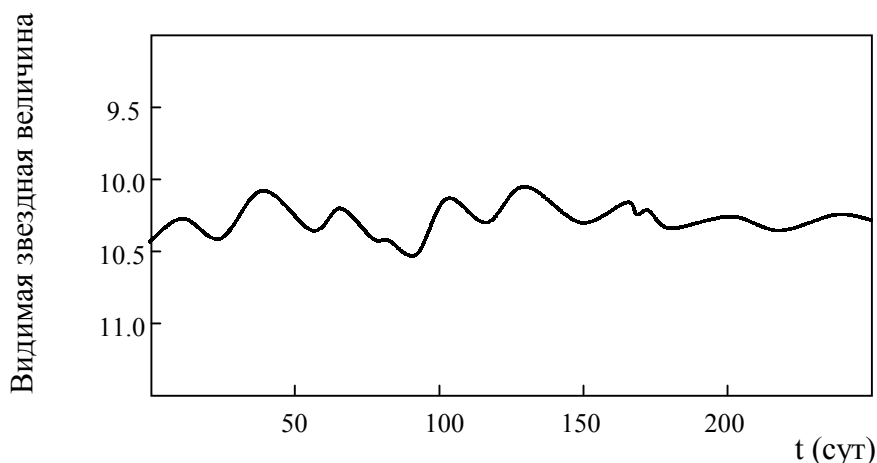
Энергия взрыва вспыхивающих звезд, по-видимому, такая же, как в солнечных вспышках, но из-за того, что звезды намного слабее, чем Солнце, вспышка может вызвать усиление яркости на 4 – 5 звездных величин. Яркость при вспышке поднимается за несколько секунд, а затем несколько минут падает. Одна и та же звезда может вспыхивать несколько раз в сутки. Оптическая

вспышка сопровождается радиовсплеском, как у Солнца. Вспыхивающие звезды были первыми звездами, зарегистрированными как радиоисточники.



*Кривая блеска типичной
вспыхивающей звезды.*

Звезды типа Т Тельца (T Tauri). Звезды типа Т Тельца являются так называемыми *небулярными переменными*, встречающимися в светлых или темных межзвездных облаках. Это только что рожденные звезды или сжимающиеся на пути к главной последовательности. Колебания яркости звезд типа Т Тельца неправильны. Их спектры содержат яркие эмиссионные линии, образующиеся в звездной хромосфере, и запрещенные линии, которые могут образоваться только при чрезвычайно низких плотностях. Спектральные линии указывают так же на то, что вещество из этих звезд истекает.

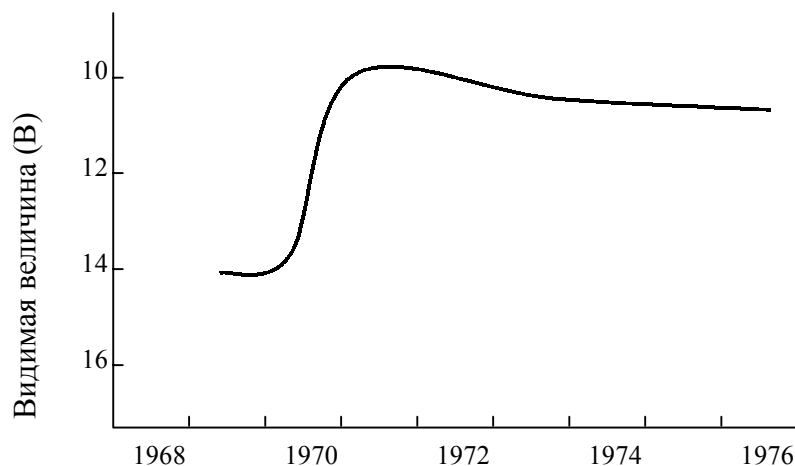


Кривая блеска
переменной
типа Т Тельца

Так как звезды типа Т Тельца располагаются внутри плотных облаков газа, их трудно наблюдать. Однако эта ситуация улучшилась с развитием техники радио и инфракрасных наблюдений.

Звезды, находящиеся в процессе формирования, могут изменять свою яркость очень быстро. Например, в 1937 г. FU Orionis стала ярче на 6 величин. Эта звезда является сильным источником инфракрасного излучения, что указы-

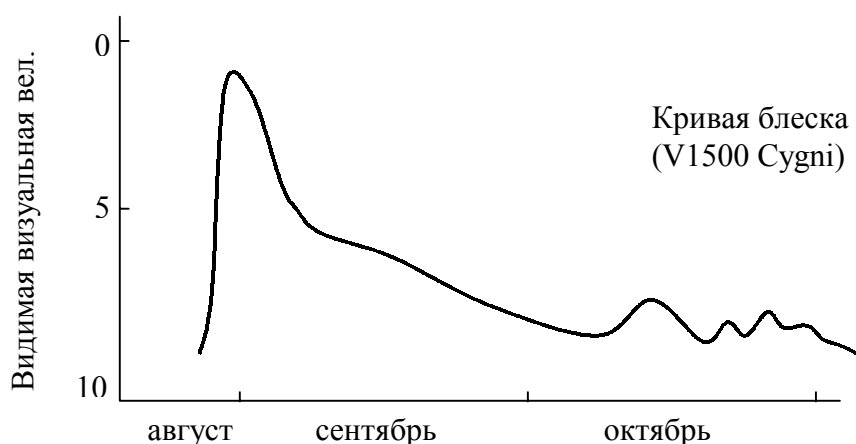
вает на то, что она все еще окутана большим количеством межзвездной пыли и газа. Аналогичное увеличение яркости на 6 величин наблюдалось в 1969 г. у V1057 Лебеда. До увеличения яркости она была неправильной переменной типа Т Тельца. После этого она остается слабо постоянной АВ-звездой десятой величины.



В 1969 – 1970 гг. звезда V1057 Лебеда повысила яркость почти на 6 величин.

Новые. Одним из наиболее известных типов эруптивных переменных являются новые. Их разделяют на несколько подтипов: *обыкновенные новые*, *повторяющиеся новые*, *карликовые новые* и *новоподобные переменные*.

Вспышки всех новых быстрые. В течение дня или двух яркость поднимается до максимума, который может быть на 7 – 16 величин ярче, чем при нормальной светимости. Затем следует постепенное снижение яркости, которое может продолжаться месяцы или годы. На рисунке ниже показана кривая блеска типичной новой, вспыхнувшей в 1975 году в созвездии Лебеда. Она составлена из сотен наблюдений, преимущественно любительских.

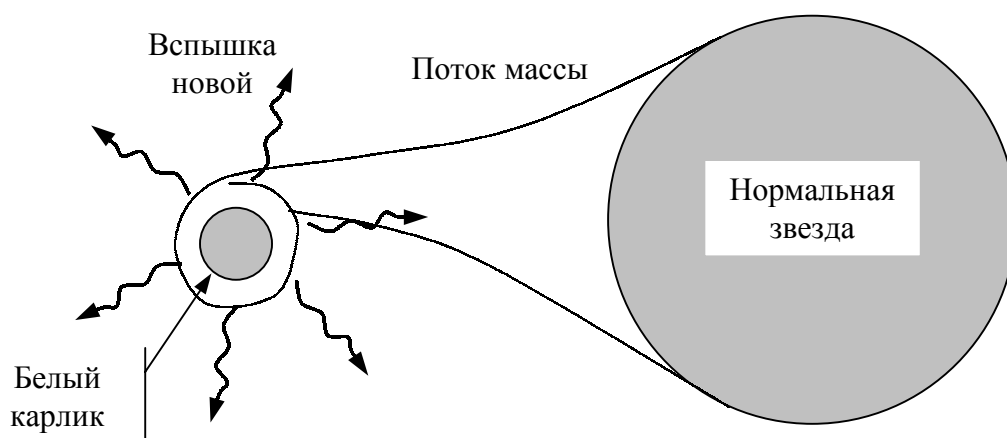


Кривая блеска Новой Лебеда 1975 (V1500 Cygni)

В повторных новых увеличение яркости до некоторой степени меньше, чем на 10 величин, а в карликовых новых от двух до шести величин. В обоих типах имеются повторяющиеся вспышки. У повторных новых время между вспышками порядка нескольких десятков дней, а у карликовых новых 20 – 600 дней. Интервал между вспышками зависит от силы вспышки: сильнее вспышка, дольше время до следующей. Увеличение яркости грубо пропорционально логарифму интервала. Возможно, что обыкновенные новые подчиняются такой

же связи. Однако их амплитуды намного больше, так что время между вспышками должно быть тысячи или миллионы лет.

Наблюдения показали, что все новые есть члены тесных двойных систем. Одна компонента системы является нормальной звездой, а другая белым карликом, окруженным газовым кольцом. Нормальная звезда заполняет свою полость Роша, и вещество с нее перетекает на белый карлик. Когда достаточное количество массы собирается на поверхности белого карлика, водород взрывоподобно воспламеняется и внешняя оболочка сбрасывается. Яркость звезды быстро растет. С расширением сброшенной оболочки температура звезды падает, и светимость постепенно уменьшается. Однако взрыв не останавливает перетекание массы со звезды-компаньона, и постепенно белый карлик накапливает новый материал для следующего взрыва.



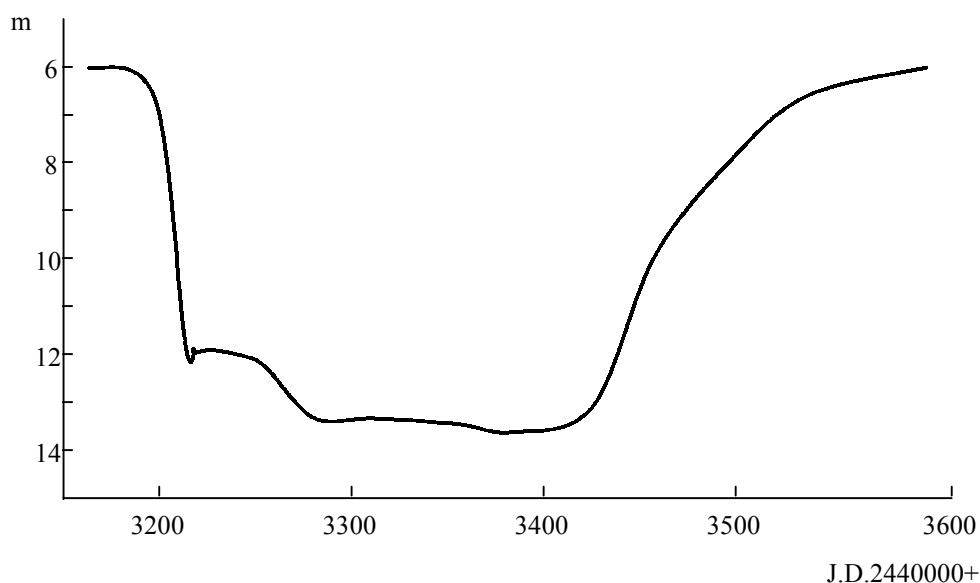
В спектре новой могут наблюдаться эмиссионные линии и линии поглощения от расширяющейся газовой оболочки. Доплеровский сдвиг соответствует скорости расширения около 1000 км/сек. Когда газовая оболочка рассеивается, ее спектр становится спектром типичной диффузной эмиссионной туманности. Расширяющуюся оболочку вокруг новой можно также иногда увидеть непосредственно на фотоснимках.

Значительная часть новых в нашей Галактике скрыта межзвездными облаками, и их число поэтому трудно оценить. В галактике Андромеды наблюдается 25 – 30 вспышек новых ежегодно. Число карликовых новых намного больше. Кроме рассмотренных новых имеются новоподобные переменные, обладающие многими свойствами новых, такими как эмиссионные линии от окружающего звезду газа и быстрые колебания яркости. Эти переменные, некоторые из которых являются *симбиотическими звездами*, есть тесные двойные с перетеканием массы. Газ, истекающий с главного компаньона, бомбардирует газовый диск вокруг вторичного компаньона, делая его горячим пятном, но не доводя его до вспышки новой.

Очень интересной переменной является η Carinae. В начале 19-го столетия η Carinae была одной из ярчайших звезд на небе (второй после Сириуса). Около середины столетия она быстро ослабела до 8-й величины, но в течение 20-го столетия стала несколько ярче. При вспышке в 1843 г. звезда выбросила

расширяющуюся туманность, которая получила название «Гомункулус». В настоящее время это звезда шестой величины, окруженная толстой, обширной оболочкой пыли и газа. Окружающее звезду пылевое облако является ярчайшим инфракрасным источником на небе вне солнечной системы. Энергия, излучаемая η Carinae, поглощается туманностью и переизлучается в инфракрасных волнах. Неизвестно, относится ли η Carinae к новым, или это очень молодая звезда, которая не может эволюционировать нормальным образом из-за очень толстого облака, окружающего ее.

Звезды типа R Северной Короны имеют «обратные новой» кривые блеска. Их яркость может упасть почти на 10 величин и оставаться низкой годы, прежде чем звезда поярчает до своей нормальной светимости.



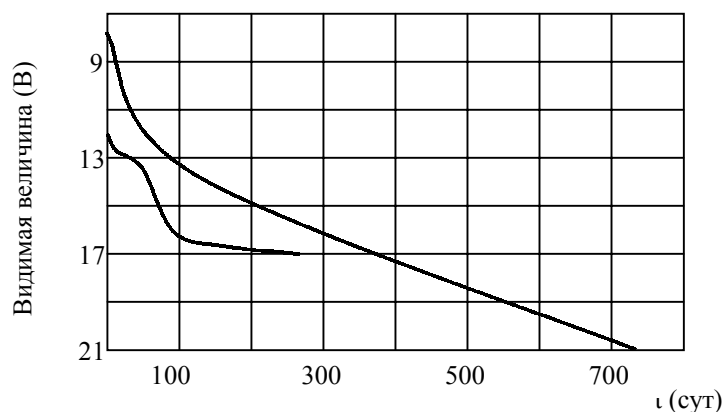
Например, сама R CrV имеет величину 5.8, но может угаснуть до величины 14.8. На рисунке показано падение ее яркости в 1977 – 1978 гг. Этому явлению может быть дано следующее объяснение. Звезды типа R CrV богаты углеродом, и угасание происходит, когда углерод конденсируется в окружающей звезду пылевой оболочке.

Сверхновые. Звезды с самыми большими колебаниями яркости называются сверхновыми. За несколько дней их яркость может возрасти более чем на 20 величин, т.е. светимость может возрасти в сотни миллионов раз. После максимума имеется медленный спад, продолжающийся несколько лет.

Сверхновые являются взрывающимися звездами. При взрыве сбрасывается газовая оболочка. Скорость ее расширения около 10000 км/сек. Расширяющаяся газовая оболочка остается видимой тысячи лет. В Млечном Пути было открыто несколько десятков остатков таких сверхновых. Остаток может быть нейтронной звездой или черной дырой.

Сверхновые на основе их кривых блеска разбивают на два типа. Сверхновые 1-го типа угасают правильным образом, почти экспоненциально. Спад сверхновой 2-го типа менее правильный, а ее максимальная светимость меньше. Причина такого различия в том, что есть два совершенно разных вида вры-

вающихся звезд. Сверхновые 1-го типа производятся старыми, с низкой массой, звездами; сверхновые 2-го типа – молодыми, массивными звездами.



Кривые блеска двух типов сверхновых. Выше – SN 1972e, тип 1, а ниже – SN 1970g, тип 2.

Мы уже видели, что имеется несколько возможных путей, которыми звезда может прийти к взрыву в конце своей эволюции. Сверхновые 2-го типа являются естественным концом эволюции одиночных звезд. Сверхновые 1-го типа имеют массу порядка массы Солнца и должны были бы закончить свой жизненный путь как белые карлики. Однако если звезда собирает массу с компаньона, она будет подвергаться повторяющимся вспышкам новой. Часть собранного вещества будет тогда превращаться в гелий, или в углерод и кислород, и будет накапливаться на звезде, увеличивая ее массу. В конце концов, масса звезды может превысить предел Чандрасекара. Тогда звезда сколлапсирует и взорвется как сверхновая.

В нашей Галактике наблюдалось, по крайней мере, шесть взрывов сверхновых. Наиболее известными являются «звезда-гостья», наблюдавшаяся в Китае в 1054 г. (чей остаток есть Крабовидная Туманность), сверхновая Тихо Браге (1572 г.) и сверхновая Кеплера (1604 г.).