

## ЛЕКЦИЯ 2 ДЕКАБРЯ

### **Звезды главной последовательности, белые карлики, красные гиганты, нейтронные, новые, сверхновые. Определение массы, размеров звезд, плотность их вещества, внутреннее строение.**

Возможная масса звезды имеет ограничения сверху и снизу. Если масса звезды в сотни раз больше массы Солнца, то давление излучения разрывает звезду, поэтому таких звезд не существует. Верхнее ограничение массы обусловлено и развитием пульсаций, которые позволяют звезде сбросить лишнюю для устойчивого равновесия массу. По современным данным верхний предел массы звезд оценивается в  $150 M_{\odot}$ .

Если масса звезды меньше  $m < m_{\min} = 0,08 M_{\odot}$  (предел Кумара), то температура в центре протозвезды не достигает пороговой температуры начала термоядерных реакций –  $3000000\text{K}$ . Звезды с солнечной массой живут порядка десяти миллиардов лет, а с массой в десять раз большей - порядка десяти миллионов лет.

Звезды находятся на главной последовательности 90 % времени своей «жизни – активного энерговыделения». Горение водорода – самая длительная стадия в жизни звезды, так как в молодой звезде водорода до 70 % от всей массы. При превращении водорода в гелий выделяется большое количество энергии. Вес вышележащих звездных слоев уравнивается на стадии главной последовательности давлением звездного газа.

В звезде примерно 70 % водорода (по массе), а при синтезе гелия выделяется большая часть ядерной энергии, запасенной в веществе, поэтому можно говорить, что **основную часть своей жизни звезды светят, сжигая водород**. Последующие стадии термоядерного синтеза в звездах также важны, например, слияние трех альфа-частиц в ядро  $^{12}\text{C}$ , но уже не с точки зрения энергетики.

Звезды с массами чуть большими минимальных масс  $0,08 M_{\odot} < M < 0,5 M_{\odot}$ , светимостями  $L \sim 10^{-3} - 10^{-4} L_{\odot}$  и радиусами  $0,1 - 0,9 R_{\odot}$  называют **красными карликами**. В красных карликах идут реакции термоядерного синтеза гелия из водорода. Красные карлики относятся к звездам главной последовательности и являются самыми многочисленными звездами нашей Галактики. Такие звезды будут очень долго находиться на главной последовательности. Такие звезды свой жизненный путь проходят спокойно, без эффектных взрывов, сброса оболочек.

Иначе проходит эволюцию звезды с массой примерно равной солнечной.

Интерактивные модели «Синтез гелия» и «Реакции в горячих звездах»

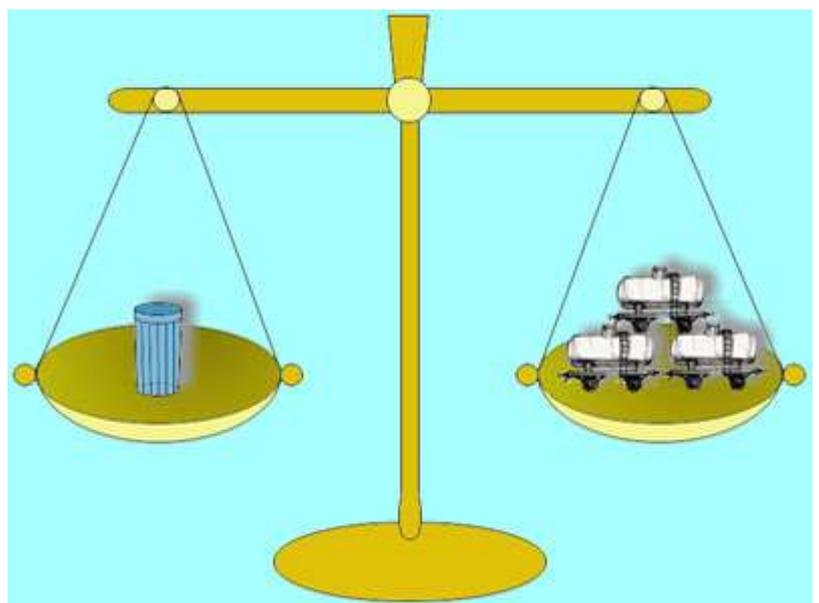
$p + p \rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu_e$   
 $\text{D} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$   
 ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$

Старт  
Сброс



После того, как звезда израсходует свое водородное топливо, его заменяет гелий, а сама звезда раздувается до размеров красного гиганта. Но эта фаза продлится недолго по космическим меркам, примерно 10 % от своей «жизни». Как только звезда начнет испытывать недостаток гелиевого топлива, она станет «переходить» на более тяжелые элементы, вплоть до углерода. Размеры звезды резко уменьшатся, и она превратится в небольшой тусклый звездоподобный объект под названием белый карлик. В стадии белого карлика звезда будет находиться очень долго, для звезд массой  $1 M_{\odot}$  более 25 млрд лет, за это время температура звезды сравнивается с температурой окружающей среды.

**Белые карлики** – результат эволюции звезд, похожих на Солнце. Они имеют массу, не превышающую  $1,4 M_{\odot}$  (в среднем  $0,6 M_{\odot}$ ), радиус в 100 раз меньше солнечного, и, следовательно, плотность в миллион раз больше солнечной, порядка  $10^6 \text{ г/см}^3$ . Светимость белых карликов в 100 или 1000 раз меньше светимости Солнца ( $L \sim 10^{-2} - 10^{-3} L_{\odot}$ ).



*Стакан вещества белого карлика весит тысячи тонн. Вещество белых карликов находится в состоянии нерелятивистского вырожденного газа, при котором давление внутри звезды не зависит от температуры, а зависит только от плотности.*

В процессе превращения из красного гиганта в белый карлик звезда может сбросить свои наружные слои, как легкую оболочку, обнажив при этом ядро.

Астроном Ван Манен в 1913 г. получил спектр белого карлика – звезды Сириуса

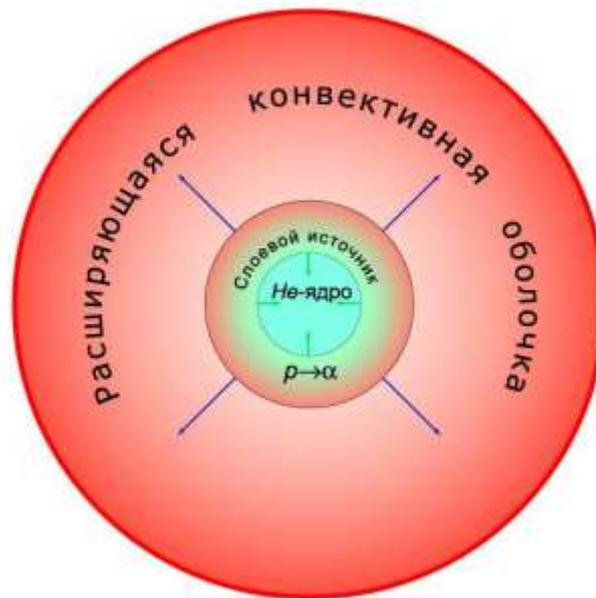


Индийский физик Субраманьян Чандрасекар в 1931 г. доказал, что белые карлики имеют предел массы в  $1,4 M_{\odot}$  (предел Чандрасекара). Основное предсказание теории Чандрасекара – зависимость радиуса белого карлика от его массы – получило наблюдательное подтверждение, что одновременно доказало отсутствие водорода в недрах белых карликов. Позже было показано, что давление в белом карлике не зависит от температуры его недр, газ находится в вырожденном состоянии.

Обычно звезда находится на главной последовательности 9–10 миллиардов лет. После того как она израсходует содержащийся в центральной части водород, внутри звезды происходят крупные перемены. Гелиевое ядро начнет сжиматься, его температура повысится настолько, что начнутся реакции с большим энерговыделением (при температуре  $2 \cdot 10^7$  К, например, начинается горение гелия). В прилегающем к ядру слое, как правило, остается водород, возобновляются протон-протонные реакции, давление в оболочке существенно повышается, и внешние слои звезды резко увеличиваются в размерах. На диаграмме Герцшпрунга – Рассела звезда начинает смещаться вправо – в область красных гигантов.

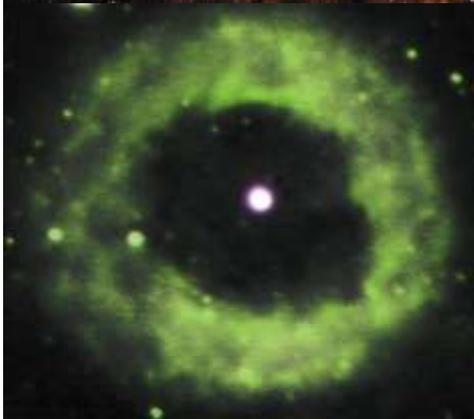
**Красные гиганты** – это холодные звёзды с температурой поверхности около  $T = 3000$ К, большого радиуса  $10\text{--}200 R_{\odot}$ , с высокой светимостью  $L \sim 10^2\text{--}10^4 L_{\odot}$ ). Красные гиганты имеют маленькое ядро, состоящее из гелия. Термоядерный синтез происходит в слое, а не в центре.

## Строение красного гиганта



Строение красного гиганта.

В процессе превращения из красного гиганта в белый карлик звезда может сбросить свои наружные слои, как легкую оболочку, обнажив при этом ядро. Газовая оболочка ярко светится под действием мощного излучения звезды.



Планетарные туманности, светящиеся газовые оболочки умирающих звезд солнечного типа, которые исчерпали запас термоядерного горючего и сбросили оболочку. Эта фаза длится примерно 10000 лет. Размеры туманностей примерно в 1000 раз превосходят размеры Солнечной системы.

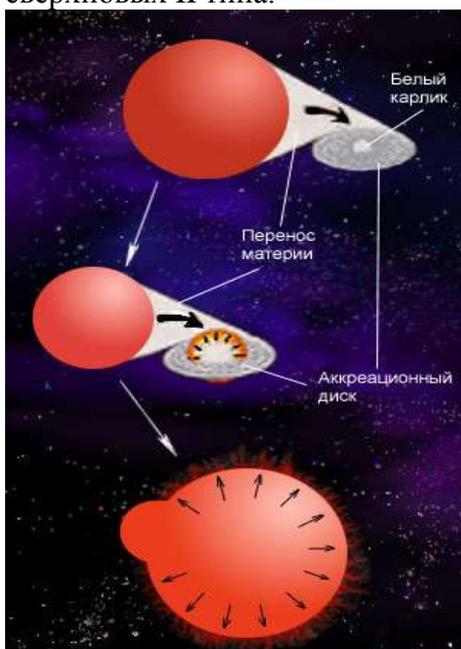
Но путь звезды более массивной протекает иначе. В центральных областях звезды при высоких температурах происходят реакции непосредственного слияния тяжелых ядер, после чего происходит эффектный взрыв сверхновой. Вспышки сверхновых – один из самых мощных катастрофических природных процессов. Фантастическое выделение энергии – столько, сколько Солнце вырабатывает за миллиарды лет – сопровождает взрыв сверхновой. Сверхновая звезда может излучать больше, чем все звезды галактики вместе взятые.

**Сверхновыми** называются звезды, взрывающиеся и достигающие в максимуме абсолютной звездной величины от  $-11^m$  до  $-18^m$ . Плотное ядро коллапсирует, увлекая за собой в свободное падение к центру наружные слои звезды. Когда ядро сильно уплотняется, его сжатие прекращается, и на верхние слои обрушивается встречная ударная волна, а также выплескивается энергия огромного числа нейтрино. В результате оболочка разлетается со скоростью 10 000 км/с, обнажая нейтронную звезду либо черную дыру. При вспышке сверхновой выделяется энергия  $10^{46}$  Дж.

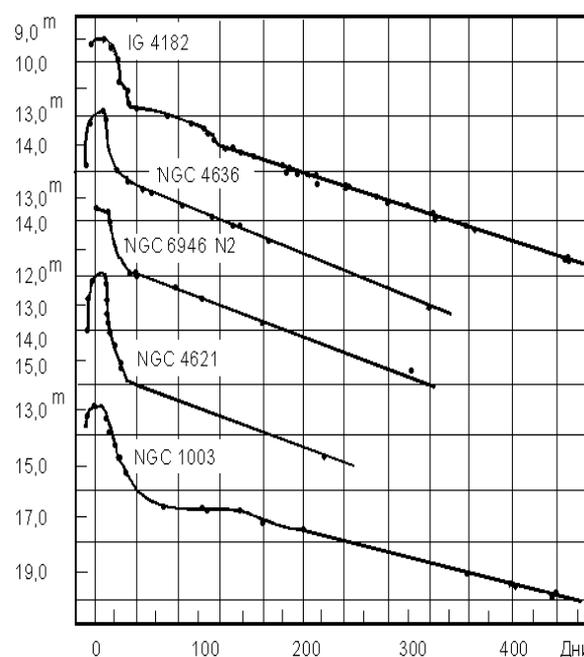
Учащимся рекомендуется показать разницу между двумя типами сверхновых, так как это используется для определения расстояний до галактик.

По характеру спектра вблизи эпохи максимума различают два типа сверхновых. Сверхновые I и II типа различаются по спектрам и по светимости. В 1941 году Р. Минковский разделил сверхновые на два основных типа по характеру спектров.

**Сверхновые I типа** вблизи максимума отличаются непрерывным спектром, в котором не видно никаких линий. Позднее появляются в спектре линии поглощения, сильно расширенные. Это соответствует расширяющейся в окружающее пространство оболочке со скоростью 10–15 тыс. км в секунду, массой более  $0,3 M_{\text{Солнца}}$ . При вспышке сверхновой I типа от звезды отрывается оболочка с массой порядка  $0,3\text{--}1 M_{\odot}$ , которая расширяется в межзвездное пространство. Наиболее интенсивны линии однократно ионизованных кальция и кремния, сдвинутых из-за эффекта Доплера. Сверхновые I типа поддерживают максимальный блеск примерно неделю, после этого примерно месяц их светимость плавно уменьшается со скоростью  $0,1^m$  в сутки. В спектрах отсутствуют яркие эмиссионные линии водорода. В среднем абсолютная звездная величина сверхновых Ia типа равна  $-19,3^m \pm 0,2^m$ . Вспышки сверхновых Ia типа намного мощнее, чем вспышки сверхновых II типа.

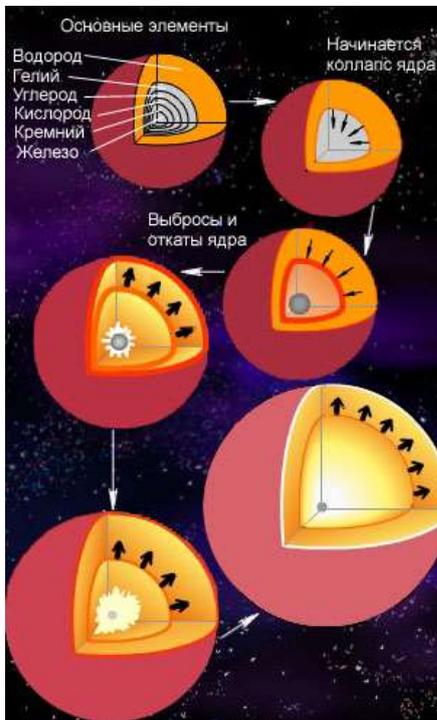


Модель вспышки сверхновой I типа.

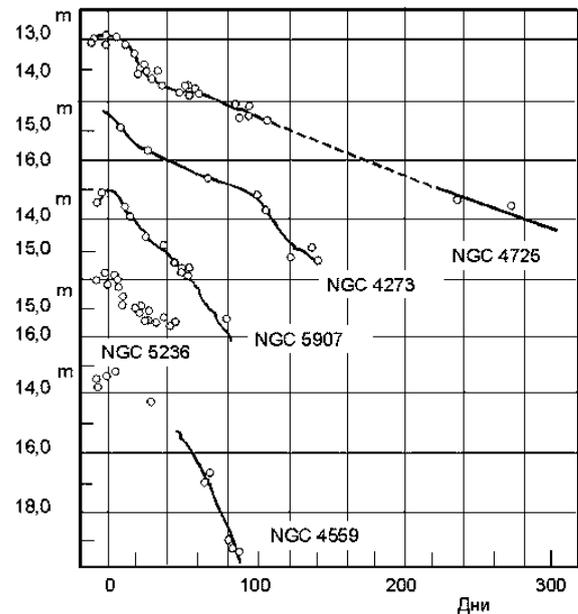


Изменение блеска сверхновых I типа. (Из книги И.С. Шкловского «Сверхновые звезды и связанные с ними проблемы».)

Ко II типу были отнесены сверхновые, спектры которых показали присутствие очень интенсивных эмиссионных линий водорода, ультрафиолетовая часть спектра у них яркая. В настоящее время стало ясно, что кривые блеска сверхновых II типа весьма разнообразны, по-видимому, в этой группе объединяются различные объекты. У некоторых сверхновых II типа на кривой блеска вскоре после максимума может наблюдаться достаточно продолжительный участок с медленным спаданием светимости на протяжении 100 суток – так называемое «плато». В среднем абсолютная звездная величина сверхновых Ia типа равна  $-17,5^m \pm 0,4^m$ .

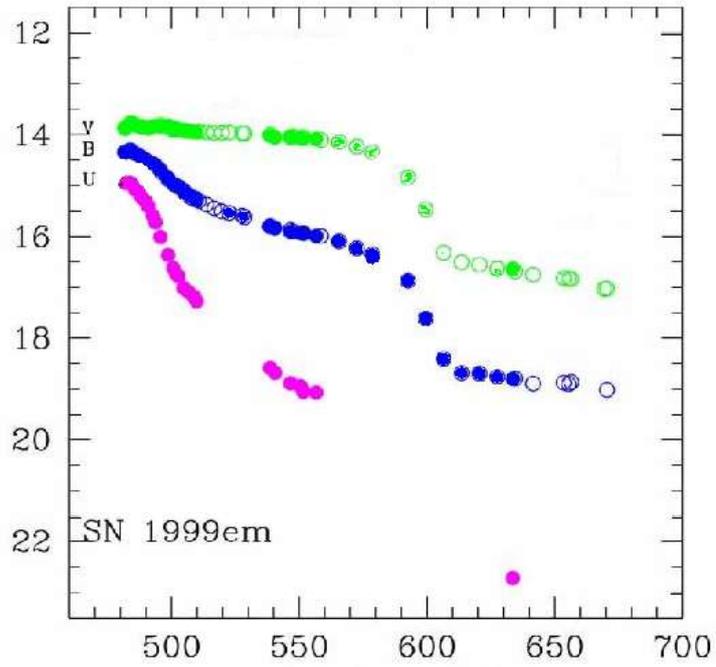


Модель вспышки сверхновой II типа.



Изменение блеска сверхновых II типа. (Из книги И.С. Шкловского «Сверхновые звезды и связанные с ними проблемы».)

Сверхновые II типа связаны с молодыми, массивными звездами, в их оболочках в большом количестве присутствует водород на конечной стадии эволюции. Вспышки сверхновых II типа считают конечной стадией эволюции звезд, начальная масса которых составляет больше 8–10 масс Солнца.



*Рис.17. Изменение блеска Сверхновой II типа SN 1999em в диапазонах U, B, V..  
Продолжительность стадии «плато» - около 100 суток*



NGC628, 2003 год

NGC 3184, 1999 год



В 2005 году галактике M51 взорвался красный сверхгигант как сверхновая. Вспышка II типа.

До вспышки сверхновой 2005 год

Во время вспышки сверхновой. (В центре фотографии, на спиральной ветви)

В результате вспышек сверхновых тяжелые химические элементы поступают в межзвездную среду и из этого вещества образуются звезды второго и последующих поколений и планетных систем.

Вспышка сверхновой 1054 года в нашей Галактике относят ко II типу, что подтверждается современными наблюдательными данными.

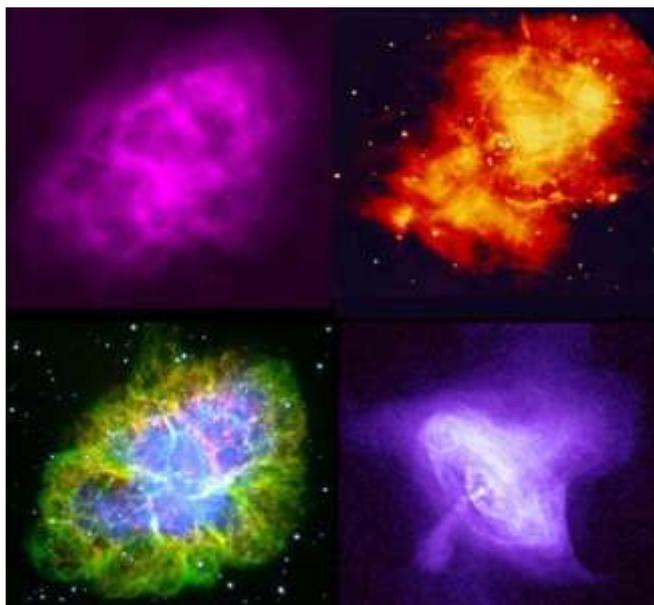


Крабовидная туманность.

Расстояние до Крабовидной туманности – около 6000 св. лет, диаметр – немного меньше 10 св. лет (2,3 пк). Оболочка после вспышки Сверхновой в Тельце расширяется со скоростью более 1200 км/с.

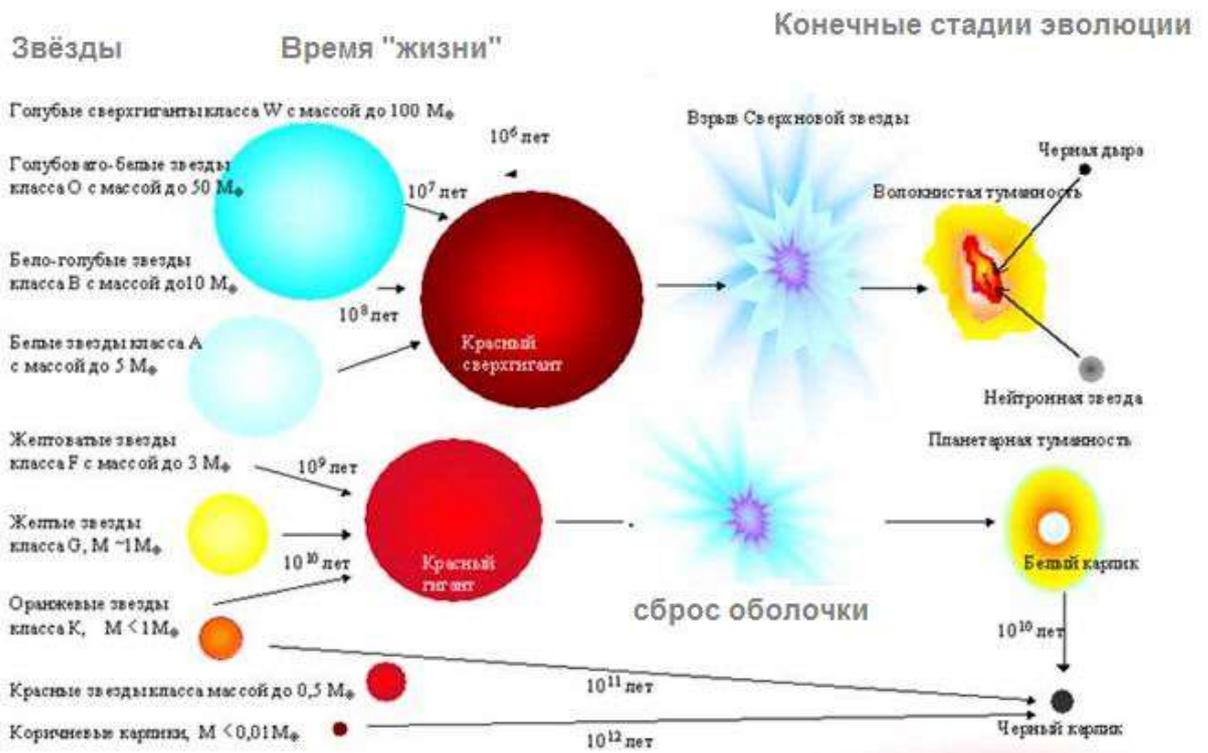
Крабовидная туманность расширяется со скоростями в 1200 км/с и встречается с межзвездным веществом, сгребая и уплотняя его перед собой, при этом сброшенная взрывом оболочка звезды тормозится. Столкновение расширяющейся оболочки с

неподвижным межзвездным газом порождает ударную волну, в которой газ нагревается до миллионов К и становится источником рентгеновского излучения.



*Излучение от Крабовидной туманности регистрируется во всех областях спектра (радиодиапазон, инфракрасная, видимая и рентгеновская области спектра).*

**Нейтронная звезда** обладает значительным магнитным полем. Скорее всего, поле имеет дипольный характер, а его ось наклонена к оси вращения нейтронной звезды. Система силовых линий магнитного поля вращается с огромной угловой скоростью, с какой вращается сама нейтронная звезда. На поверхности нейтронной звезды нейтроны могут распадаться на протоны и электроны. Сильное магнитное поле подхватывает заряженные частицы и разгоняет их до околосветовых скоростей. Частицы высоких энергий, отрывающиеся от поверхности нейтронной звезды и ускоряемые сильным электрическим полем, создают поток, исходящий от нейтронной звезды и похожий на солнечный или звездный ветер. Магнитное поле увлекает этот поток во вращение вместе с нейтронной звездой. Так вокруг нее возникает расширяющаяся и вращающаяся магнитосфера. Движущиеся электроны генерируют электромагнитные волны, которые излучаются узким быстро вращающимся пучком. Таким образом, источником энергии служит быстрое вращение нейтронной звезды, которая совершает около 30 оборотов/с. Крабовидная туманность является мощным источником синхротронного радиоизлучения.



Эволюция звёзд в зависимости от массы (схема Румянцева Ю. А.)

**Задача 1.** В Крабовидной туманности обнаружен оптический пульсар с периодом 0,33с. Оцените размер пульсара.

**Решение.**

Пульсар – вращающаяся звезда. За один оборот она посылает один импульс. Чтобы скорость поверхности пульсара не превосходила скорости света

$$\frac{2\pi R}{P} \leq c$$

где  $R$  – радиус пульсара,  $P$  – период пульсара.

$$R \leq \frac{cP}{2\pi}$$

$$R = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 0,033}{2 \cdot 3,14} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м. (1,5 млн м). } 1,5 \text{ 000.000 м}$$

Меньше Земли.

Земля 6400 км = 6.400.000 м

Размер пульсара не может быть больше расстояния, за которое свет проходит время, равное периоду.

$$R = ct$$

$$R = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 0,033 \text{ с} = 0,099 \cdot 10^8 \text{ м} = 99 \cdot 10^3 \text{ м} = 100 \text{ км.}$$

**Задача 2.**

В 1054 году в нашей Галактике вспыхнула сверхновая. В настоящее время на этом месте наблюдается Крабовидная туманность. Измерение лучевых скоростей газа в туманности показало, что она расширяется со скоростью около 1200 км/с от центра. Угловые размеры туманности около 5'. Оценить примерное расстояние до Крабовидной туманности.

**Решение.**

$$d = 5'$$

$$v = 1200 \text{ км/с}$$

$$t = 950 \text{ лет.}$$

$R$  –?

Крабовидная туманность начала расширяться 950 лет тому назад, скорость расширения около 1200 км/с. Поэтому линейный размер  $D$  Крабовидной туманности:

$$D = 2 \cdot t \cdot v = 2 \cdot 950 \cdot 3,15 \cdot 10^7 \cdot 1200 \cdot 100 = 2,3591000 \cdot 100 \cdot 10^7 \text{ м} = 2,3,591 \cdot 10^{15} / 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м} = 2 \cdot 1,16 \text{ пк} = 2,32 \text{ пк.}$$

(т. к.  $1 \text{ пк} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м}$ ).

Расстояние до Крабовидной туманности:

$$R = \frac{D \cdot 206265''}{d''} = \frac{2,32 \text{ пк} \cdot 206265''}{5 \cdot 60''} 159,5 \text{ пк} \approx 1,6 \text{ кпк.}$$

Более точные оценки расстояния до Крабовидной туманности дают расстояние 2 кпк.

### Задача 3.

Пульсар NP 0531 – знаменитый пульсар в Крабовидной туманности – имеет период  $T = 0,033 \text{ с}$ . Оценить его плотность.

**Решение**

$$\text{Период вращения пульсара } T = \frac{2\pi R}{V}$$

Предельную скорость вращения нейтронной звезды можно найти из второго закона Ньютона.

$$\frac{GM}{R^2} = \frac{V^2}{R}$$

Быстрее вращаться пульсар не может: центробежная сила его просто разорвет. Отсюда

$$T = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}}$$

Плотность пульсара в Крабовидной туманности  $\rho = 3\pi/GT^2 = 1,3 \cdot 10^{14} \text{ кг/м}^3$ .

### Задача 4.

Предположим, что в нашей Галактике на расстоянии  $R = 5000 \text{ пк}$  от Солнца вспыхнула Сверхновая звезда I типа с абсолютной видимой величиной  $M = -19$ . Будет ли эта Сверхновая ярче Венеры?

**Решение.**

$$\text{Абсолютная звездная величина } M = m + 5 - 5 \lg R.$$

$$\text{Видимая звездная величина } m = M - 5 + 5 \lg R.$$

$$m = M - 5 + 5 \lg R = -19 - 5 + 5 \lg 5000 = -19 - 5 + 5 \cdot 3,69 = -19 - 5 + 18,49 = -5,5.$$

То есть она будет ярче Венеры. С учетом межзвездного поглощения, ее блеск уменьшится на 1 – 1,5 звездные величины, но все равно эта предполагаемая Сверхновая будет ярче Юпитера и Венеры.

### Задача 5.

Расстояние до Крабовидной туманности  $R \approx 2 \text{ кпк}$ . В Крабовидной туманности Сверхновая взорвалась в 1054 году. Сколько лет назад взорвалась Сверхновая 1054 года?

**Решение.**

Расстояние до Крабовидной туманности  $R \approx 2 \text{ кпк} \approx 6520 \text{ св. лет}$ . С 1054 года прошло 950 лет.  $6520+953 = 7473 \text{ лет}$ , поэтому прошло более 7 тысяч лет с тех пор, когда взорвалась звезда, сбросив оболочку. О большей точности говорить не имеет смысла.