

Продолжение. См. № 17, 18/05

Проф. **Б.И.ЛУЧКОВ,**  
МИФИ, г. Москва

# Элементарная астрофизика и космология

## ДЛЯ ШКОЛЬНОГО КУРСА ФИЗИКИ

### Учебный план курса

№ газеты	Лекция
17	Лекция 1. Наш космический дом: Солнце, планеты, Земля
18	Лекция 2. Энергетика звёзд. Галактики, скопления галактик
19	Лекция 3. Эволюция звёзд – от протозвёзд до Сверхновых. Контрольная работа № 1 (срок выполнения – до 15 ноября 2005 г.)
20	Лекция 4. Образование элементов (таблица Менделеева)
21	Лекция 5. Иные миры (экзопланеты, проблема SETI). Контрольная работа № 2 (срок выполнения – до 15 декабря 2005 г.)
22	Лекция 6. Космологические модели. Вселенная Большого взрыва
23	Лекция 7. Эхо из прошлого – реликтовое излучение. Стандартная модель Вселенной
24	Лекция 8. Нерешённые проблемы: чёрные дыры, тёмная материя, тёмная энергия, антропный принцип, барионная асимметрия мира
<p><b>Итоговая работа.</b> В качестве итоговой работы засчитывается, например, разработка занятий по одной из тем, рассматриваемых в рамках данного курса. На основе этой разработки слушателем должны быть проведены уроки, краткий отчёт об их проведении и справка из учебного заведения (акт о внедрении) должны быть отправлены в Педагогический университет не позднее 28 февраля 2006 г.</p>	

## ЛЕКЦИЯ 3. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД – ОТ ПРОТОЗВЁЗД ДО СВЕРХНОВЫХ

Ночь тиха. Пустыня внемлет богу,

И звезда с звездой говорит.

*М.Лермонтов*

Велик и многообразен звёздный мир. Звёзды-карлики и звёзды-гиганты, еле тлеющие звёзды ( $T_{\text{п}} = 3000 \text{ K}$ ) и звёзды яркие, как маяки ( $T_{\text{п}} = 40\,000 \text{ K}$ ), звёзды обычной плотности и звёзды, сжатые в миллионы раз... Есть звёзды-старожилы, экономно существующие миллиарды лет, и светила-скороспелки, не дотягивающие и до миллиона. Кроме одиночных звёзд встречаются двойные, кратные звёздные системы и даже скопления, насчитывающие тысячи звёзд. Звёзды различаются своей активностью – потоками горячей плазмы (звёздный ветер), переменностью блеска, выбросами вещества. Магнитные поля звёзд могут быть в несколько гауссов, как у Солнца, в тысячи раз больше (магнитные звёзды) или даже  $\sim 10^{12}$  Гс (нейтронные звёзды). Только в одном они едины – в

том, что живут и излучают за счёт протекающих в них термоядерных реакций.

### 1. Характеристики звёзд

**Звёздная величина.** Звёздная величина ( $m$ ), или блеск, – мера светового потока. Блеск выражается в относительных единицах, введённых Гиппархом. Звёзды, видимые глазом, были разбиты на 6 категорий, от самых ярких ( $m = 1$ ) до слабых ( $m = 6$ ). Блески звёзд уточнялись, вводились отрицательные и дробные значения, шкала расширилась до больших величин. В связи с особенностями зрения зависимость  $m$  от потока  $I$  имеет логарифмический вид: при изменении  $m$  на 5 единиц поток изменяется в 100 раз. Зависимость даётся выражением

$$m = C - \log_{2,51} I, \quad (1)$$

где  $C$  – постоянная величина. Световые потоки двух звёзд выражаются через их звёздные величины:

$$\frac{I_1}{I_2} = 2,51^{m_2 - m_1}. \quad (2)$$

Блеск самой яркой звезды, голубого гиганта Сириус, составляет  $-1,6$ . Звёздными величинами характеризуют и протяжённые объекты (планеты, галактики). Блеск Солнца  $-26,7$ . Предельные звёздные величины, видимые в крупные телескопы,  $28-30$ .

*Светимость ( $L$ )* – мощность излучения в разных спектральных интервалах. Для изотропного излучения поток и светимость связаны соотношением

$$I = \frac{L}{4\pi r^2}. \quad (3)$$

Светимость объекта определяется, если известно расстояние до него и измерен поток.

*Абсолютная звёздная величина ( $M$ )* – блеск звезды, условно наблюдаемой со стандартного расстояния  $r_0 = 10$  пк. Можно записать:

$$M = C - \log_{2,51} \frac{L}{4\pi R^2}. \quad (4)$$

Из (1) и (4) получаем переход к  $M$ , если известен блеск звезды и расстояние до неё ( $r$  – в пк):

$$M = m - 5 \lg r + 5. \quad (5)$$

Абсолютные звёздные величины Солнца и Сириуса составляют  $4,9$  и  $1,6$ . Солнце – слабая звезда, а Сириус – гигант светимостью в  $20$  раз больше. Формула (5) используется для определения расстояний до звёзд, масса которых известна (метод цефеид).

*Спектральный класс.* Звёзды имеют разный цвет или, точнее, спектральный класс (СК). Последовательность СК (от «ранних» до «поздних»): О, В, А, F, G, K, M. Каждый класс разбит на  $10$  подклассов. Запомнить ряд СК помогает мнемоника (из студенческого фольклора): «Один Бритый Англичанин Финики Жевал, Как Морковь». Недавно открытый класс L легко вписался, слегка изменив вкус: бритый англичанин стал жевать финики, как «Мелкий Лук». Не менее звонкую идиому придумали *american boys*: «O, Be A Fine Girl, Kiss Me Right Now». СК звезды, определяемый по характерным линиям в спектре, однозначно связан с температурой поверхности, равной  $4 \cdot 10^4$  К у звёзд класса О,  $2,5 \cdot 10^4$  К (класс А) и  $3 \cdot 10^3$  К (класс М). Температура солнечной поверхности  $6000$  К. Солнце – звезда спектрального класса G2.

*Радиус.* Кроме Солнца и пары ближайших звёзд, размеры которых различимы в телескоп, все звёзды – точечные объекты. И всё же их радиусы  $R$  хорошо определяются по светимости и спектральному классу звезды. Звёзды – «оптически толстые», они излучают как абсолютно чёрные тела:

$$L = 4\pi R^2 \cdot \sigma T_{\text{п}}^4, \quad (6)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана.

*Масса.* Это самая «трудная» характеристика, т.к. нет универсального способа «взвешивания» звёзд. Точно измеряются только массы звёзд, входящих в видимую двойную систему. Для них по известному орбитальному периоду  $P$ , размеру системы  $a$ , лучевым скоростям компонентов (доплеровскому смещению линий) и третьему закону Кеплера

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(M_1 + M_2)}{4\pi^2}$$

определяются обе массы.

Для спектрально-двойных можно найти только  $M \sin^3 \varphi$ , где  $\varphi$  – неизвестный угол плоскости орбиты к лучу зрения. Совсем неизмерима масса одиночной звезды (пока к ней не подлетит космический корабль). Тем не менее массы всех звёзд можно найти, пользуясь правилом: звёзды одинаковых спектральных классов и абсолютных звёздных величин обладают равными массами.

*Диаграмма спектр–светимость.* Большое значение для выяснения эволюции звёзд имеет диаграмма спектр–светимость, предложенная сначала датским астрономом Э.Герцшпрунгом, а позднее американцем Г.Ресселом (рис. 1). Как видно, звёзды группируются в определённых местах. Наиболее важными являются: Главная последовательность (ГП) и ветви – красных гигантов, сверхгигантов, белых карликов – звёзд ранних СК и малой светимости ( $M = 10-15$ ). Красные гиганты, имея большую по сравнению с Солнцем  $L$  и меньшую  $T_{\text{п}}$ , согласно формуле (6) должны быть большого размера ( $10-100 R_{\text{С}}$ ). Соответственно белые карлики, имея более ранний СК и меньшую  $L$ , будут меньшего размера ( $10^{-2}-10^{-3} R_{\text{С}}$ ).

Указание на то, что звёзды переходят из одной области в другую, было получено при изучении звёздных скоплений. Чем больше возраст скопления, тем резче выражен отход звёзд от ГП вправо и вверх, в область красных гигантов, что объясняется разной скоростью эволюции звёзд. Массивные звёзды в верхней части ГП эволюционируют быстро, покидая её через десятки миллионов лет и становясь красными гигантами, тогда как звёзды массами меньше солнечной, обладая замедленным темпом, пребывают на ГП намного дольше.

*Этапы звёздной эволюции.* В настоящее время созданы не только статические модели звёзд, но и прослежены переходы между эволюционно связанными звёздами. Лучше эволюция изучена для массивных звёзд ( $> M_{\text{С}}$ ). Они наиболее интересны, т.к. сравнительно быстро эволюционируют и образуют наблюдаемое в Галактике звёздное обилие. Звёзды малых масс ( $< M_{\text{С}}$ ) находятся в начале эволюционного пути и поэтому «неактуальны». Раз звезда «живёт» за счёт термоядерных процессов и запасы «горючего» ограничены, она неизбежно должна иметь ограниченный возраст.

*Стадия протозвезды.* Газопылевое облако, поте-

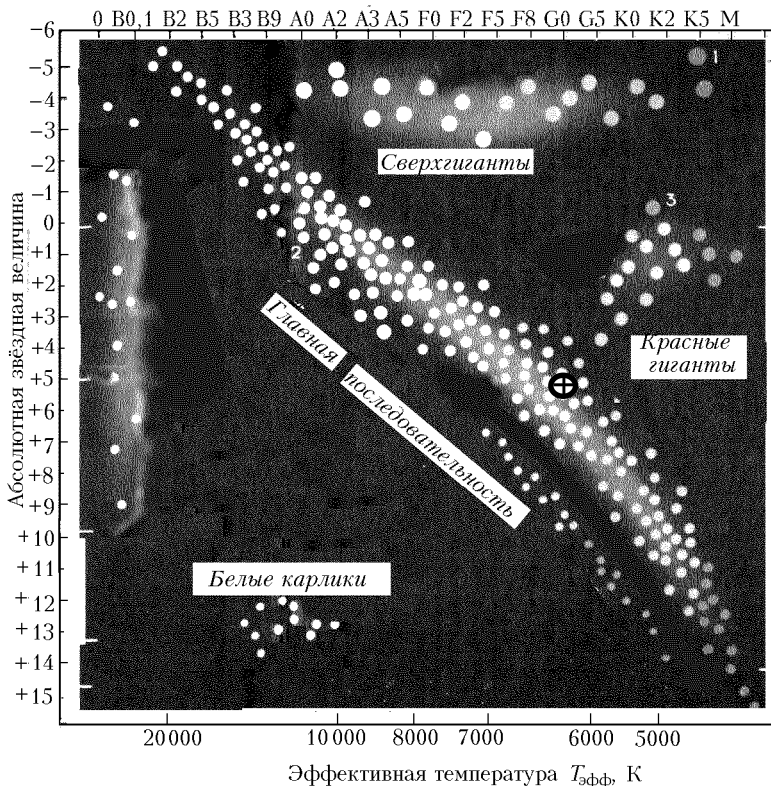


Рис. 1. Диаграмма Герцшпрунга–Рессела (Г–Р) для звёзд Галактики. Крестиком обозначено Солнце

ряв гравитационную устойчивость, сжимается в газовый шар, температура и давление в котором постоянно растут. Когда температура достигает  $10^6$  К, включается термоядерный источник – начинают сгорать в ядерных реакциях «ископаемые» элементы (дейтерий, гелий-3, литий). Из-за невысокой температуры и малой прозрачности вещества тепло передаётся конвекцией. Звезда – сплошная конвективная зона. Температура поверхности не превышает  $10^3$  К, поэтому протозвёзды должны излучать в ИК-диапазоне и из-за конвекции быть сильно переменными. Звёзды с похожими свойствами действительно наблюдаются. Их место на диаграмме Г–Р – справа от ГП, откуда они подходят к ней, становясь нормальными звёздами. Эта стадия очень мимолётна ( $\sim 10^5$  лет), поэтому наблюдаемых протозвёзд мало.

Стадия Главной последовательности наступает, когда температура в центре достигает  $10^7$  К и начинается ядерное горение водорода. Заняв своё место на ГП, определяемое исходной массой, звезда в течение миллиардов лет остаётся в стационарном состоянии ввиду больших запасов водорода. В центре звезды стабильно работает термоядерный реактор на  $pp$ - или  $CN$ -циклах в зависимости от её состава и температуры. Давление нагретого газа в соответствии с уравнением состояния

$$p = R_0 \rho T / \mu, \quad (7)$$

где  $p$ ,  $\rho$ ,  $T$  – давление, плотность и температура,  $R_0$  – универсальная газовая постоянная,  $\mu$  – средний молекулярный вес, противодействует гравитационному сжатию, что обеспечивает устойчивость звезды. За это время она совершает лишь небольшие перемещения в пределах полосы. Светимость звезды в большой степени зависит от массы (формула получена для радиационного переноса):

$$L \sim \mu^4 M^3 / \kappa, \quad (8)$$

где  $\kappa$  – коэффициент поглощения излучения. Из (8) следует, что время жизни на ГП – функция массы звезды:

$$t_{\text{ГП}} \sim M/L \sim 1/M^2. \quad (9)$$

Чем больше  $M$ , тем выше светимость и тем быстрее звезда «прожигает жизнь», истощая запасы водорода. Звёзды с  $M = (10-100)M_C$  живут на ГП  $10^8-10^7$  лет, а с массой  $\sim 0,1M_C$  – более  $10^{10}$  лет.

Стадия красного гиганта. Отход звезды с ГП начинается, когда выгорит 90% водорода в центре, превратившись в гелий. Модель красного гиганта, введённая Гамовым и Кричфилдом, основана на идее «периферийного» горения водорода. Термоядерный источник работает теперь в сферическом слое вокруг гелиевого ядра. В центре энергия не выделяется из-за отсутствия водорода и неучастия гелия в реакциях при  $T < 10^8$  К. Две тенденции определяют поведение звезды на этом этапе: радиальное расширение зоны горения и сжатие и разогрев гелиевого ядра. Светимость звезды возрастает, но из-за значительного увеличения радиуса, вызванного периферийным горением и радиационным давлением,  $T_{\text{п}}$  падает. Звезда смещается с ГП вверх и вправо (рис. 2).

Звёзды разных масс с такими эволюционными треками и образуют ветвь красных гигантов. Красный гигант состоит из трёх зон. Центральное, очень малое по размеру, плотное ядро, в котором сосредоточена большая масса, имеет высокую температуру ( $\sim 5 \cdot 10^7$  К), но энергопассивно. В сферическом слое средней плотности ( $T \sim 2 \cdot 10^7$  К), окружающем ядро, горит водород, поддерживая светимость звезды. Внешняя часть, расположенная за зоной горения, имеет малую плотность и сравнительно низкую температуру, слабо связана с ядром и легко расширяется, увеличивая радиус звезды.  $T_{\text{п}}$  убывает, в связи с чем красные гиганты занимают поздние спектральные классы (от G до M). Темп смещения звезды на диаграмме Г–Р нарастает по мере отхода от ГП. Начальные участки эволюционного трека красный гигант проходит за  $\sim 10^8$  лет, последние – за  $\sim 10^6$  лет. Темп эволюции нарастает в связи с гравитационным сжатием и включением ядерных реакций, идущих только по сильному взаимодей-

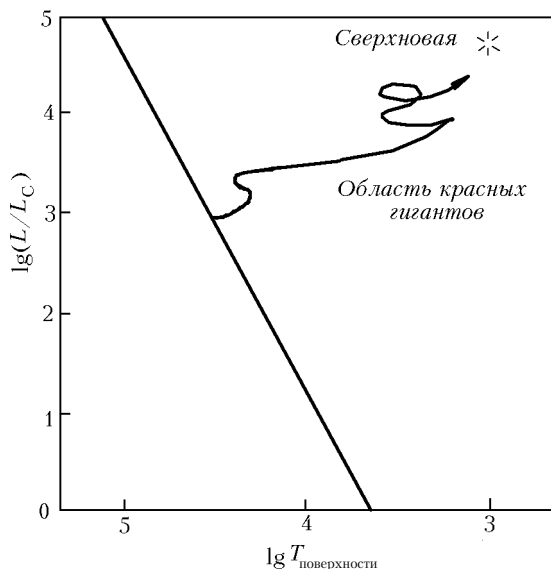


Рис. 2. Эволюционный трек красного гиганта массой  $> 1,2M_{\odot}$

ствию, вероятность которых резко растёт с температурой. Когда ядро нагреется до температуры в центре  $T_{\text{ц}} = 10^8$  К, в нём вспыхивает тройная гелиевая реакция:  $3^4\text{He} \rightarrow 12^{\text{C}}$ . «Гелиевая вспышка» ещё повышает  $T_{\text{ц}}$ , что приводит к «углеродной вспышке», затем «кислородной вспышке» и т.д. – включению всё более тяжёлых ядер в процесс термоядерного горения. При  $T_{\text{ц}} = 10^9$  К идут все выгодные реакции термоядерного синтеза, образуя ядра элементов до группы железа – наиболее «прочные», дальше которых выгодный термояд не идёт. За короткое время ( $\sim 10^3$  лет) звезда соскальзывает с ветви красных гигантов. Дальнейшая её судьба зависит от массы. Относительно «мирный» путь проходят звёзды малой массы ( $< 1,2M_{\odot}$ ). От них остаётся внешняя расширившаяся оболочка, называемая *планетарной туманностью* (со временем исчезающей), и яркая переменная звезда в центре – бывшее ядро красного гиганта.

**Стадия белого карлика.** Происходит новая метаморфоза: обнажённое ядро красного гиганта, остывая, превращается в белый карлик. Его отличительные черты – большая плотность ( $10^5\text{--}10^7$  г/см<sup>3</sup>), высокая  $T_{\text{ц}}$ , однородность и прозрачность вещества. Это звезда низкой светимости (из-за малого размера) с почти полной остановкой термоядерных реакций. Лишь во внешних слоях, где ещё сохранились лёгкие ядра (He, C, O и др.), реакции некоторое время идут. Белый карлик излучает за счёт энергии, накопленной на стадии ядра красного гиганта. Этого запаса при малой светимости ( $L \approx 10^{30}$  эрг/с) хватает на  $10^8$  лет. Постепенно остывая, белый карлик превращается в чёрный карлик – невидимый «огарок» угасшей звезды.

**Звёзды высокой плотности.** Что противостоит силам сжатия в белом карлике? Так как ядерное горючее исчерпано, обычное газовое давление (7), обеспечивавшее равновесие звезды, падает по мере остывания и не сдерживает коллапс. На смену давлению

нагретого газа в телах большой плотности приходит давление вырожденного электронного газа, подчиняющегося статистике Ферми–Дирака:

$$P_{\text{эг}} = n_e E_F, \quad (10)$$

где  $n_e$  – плотность электронов,  $E_F$  – энергия Ферми, максимальная энергия заполненных электронных состояний. Из соотношения неопределённости можно получить  $p_F = Cn^{1/3}$ . Связь энергии и импульса даёт одним из выражений:

а)  $E_F = p_F^2 / (2m_e)$  для нерелятивистского газа ( $E \ll m_e c^2$ );

б)  $E_F = p_F c$  для релятивистского газа ( $E \gg m_e c^2$ ).

Переход от а к б происходит при плотности  $\sim 10^6$  г/см<sup>3</sup>. В результате уравнение состояния вырожденного электронного газа (10) будет двояким:

$$P_{\text{эг}} = A\rho^{5/3} \text{ для } \rho < 10^6 \text{ г/см}^2, \quad (11)$$

$$P_{\text{эг}} = B\rho^{4/3} \text{ для } \rho > 10^6 \text{ г/см}^2. \quad (12)$$

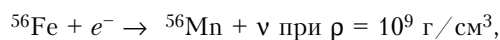
Оценим гравитационное давление:

$$P_{\text{гп}} = \frac{F_{\text{гп}}}{S} \approx \frac{M^2}{R^4} \approx M^{\frac{2}{3}} \rho^{\frac{4}{3}}, \quad (13)$$

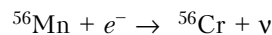
где  $S$  – площадь поверхности звезды,  $R$  – её радиус,  $\rho \sim M/R^3$  – плотность. Из сравнения (11) и (13) следует, что для  $\rho < 10^6$  г/см<sup>3</sup> возрастание  $P_{\text{эг}}$  по мере сжатия звезды происходит быстрее, чем  $P_{\text{гп}}$ , в результате чего звезда, уплотнившись, сдержит гравитационное сжатие. Но для  $\rho > 10^6$  г/см<sup>3</sup> зависимости  $P_{\text{эг}}$  и  $P_{\text{гп}}$  от  $\rho$  одинаковы и противостоять гравитационным силам за счёт увеличения  $\rho$  станет невозможно. Основную роль начнёт играть масса звезды – фактор  $M^{2/3}$  в (13). Расчёты показывают, что до некоторой предельной массы будет сохраняться равенство  $P_{\text{эг}} = P_{\text{гп}}$ , что обеспечит стабильное существование белого, а затем и чёрного карликов (чандрасекаровский предел):

$$M_{\text{пп}} = 1,2M_{\odot}. \quad (14)$$

Для более массивных звёзд вырожденный электронный газ не сможет остановить гравитационное сжатие. Звезда будет продолжать сжиматься, увеличивая плотность. При  $\rho \gg 10^6$  г/см<sup>3</sup> пойдут реакции обратного бета-распада (нейтронизация), когда электроны поглощаются ядрами, изменяя их заряд. Если начать с ядра железа (главного «остатка» реакций синтеза):

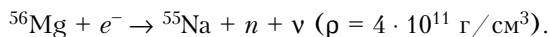


последует продолжение:



и т.д. до ядер, сильно перегруженных нейтронами. Эти ядра нестабильны, но процесс катастрофического сжатия происходит очень быстро. В рассматриваемой цепочке превращений наступит момент, когда

энергия связи нейтронов в ядре станет равной нулю и они начнут покидать ядро:



Дальнейшее сжатие приведёт к выделению свободных нейтронов, так что при  $\rho = 2 \cdot 10^{14} \text{ г/см}^3$  звезда на 99% будет состоять из нейтронов. 1% останется на протоны и электроны, которые займут все нижние энергетические уровни, обеспечив стабильность нейтронного вещества звезды.

*Нейтронные звёзды и чёрные дыры.* В результате нейтронизации вещество коллапсирующей звезды станет нейтронным, а его плотность такой же, как у атомных ядер. Гравитационному сжатию противостоит давление вырожденного нерелятивистского нейтронного газа. Так как нейтрон в 2000 раз тяжелее электрона, нейтронный газ станет релятивистским при более высокой плотности, до которой нейтронная звезда будет стабильна. Для релятивистского нейтронного газа, как и для электронного, газовое давление пропорционально  $\rho^{4/3}$  и может уравнять гравитационное, если масса звезды меньше критической. Расчёты по ОТО дали

$$M_{\text{кр}} = (2,5\div 4)M_{\text{С}}. \quad (15)$$

Конечным этапом эволюции звёзд массами  $(1,2\div 4)M_{\text{С}}$  будет нейтронная звезда. Этот вывод был сделан В.Бааде, Ф.Цвикки и Л.Д.Ландау в 1932 г. Нейтронные звёзды имеют ядерную плотность, радиус  $\sim 10$  км и очень низкую светимость ввиду малой поверхности, поэтому их практически не видно. Но они обнаруживают себя как радиопульсары – источники периодических импульсов радиоизлучения. У молодых пульсаров наблюдается также периодическое рентгеновское и гамма-излучение.

Коллапс звёзд массами  $M > M_{\text{кр}}$  нельзя остановить. Они, сжимаясь до сингулярности ( $R = 0$ ,  $\rho = \infty$ ), становятся чёрными дырами (Р.Оппенгеймер, 1939 г.). Когда звезда сожмётся до размера, называемого *гравитационным радиусом*  $R_{\text{гр}}$ , она исчезнет для наблюдателя, т.к. никакое излучение не может преодолеть её гравитационного потенциала. Выражение для  $R_{\text{гр}}$  было получено ещё Лапласом (1798 г.), но из неправильных посылок, и вторично выведено Эйнштейном в его теории гравитации (ОТО):

$$R_{\text{гр}} = 2GM/c^2. \quad (16)$$

Переход ядра красного гиганта в нейтронную звезду или чёрную дыру наблюдается как вспышка Сверхновой.

## 2. Сверхновые

Вечный покой сердце вряд ли обрадует.  
Вечный покой – для седых пирамид.  
А для звезды, что сорвалась и падает,  
Есть только миг, ослепительный миг.

А.Зацепин

Крайний фланг переменных звёзд, самых неспо-

койных, заняли Сверхновые. Строго говоря, это даже не звёзды, а их предсмертный крик – после исчерпания всех топливных ресурсов и невозможности устоять перед гравитационным сжатием.

Понятие Сверхновой (СН) появилось в начале прошлого века, когда осознали, что редкие яркие вспышки на небе (иногда даже днём) – не близкое, а очень далёкое явление, происходящее в глубинах Галактики или в соседних галактиках. Из исторических хроник и записей придворных астрологов были найдены и позднее отождествлены с небесными объектами «исторические Сверхновые» – те, что произошли за два последних тысячелетия. Их набралось с десяток, на месте, где они вспыхнули, если оно было указано точно, были обнаружены остатки взорвавшейся звезды: расширяющаяся оболочка газа и, в некоторых случаях, пульсар (быстро вращающаяся нейтронная звезда). Знаменитая Крабовидная туманность – остаток СН 1054 г., природная лаборатория физики Сверхновых. Было открыто много ещё более старых остатков СН – остывших, рассеянных в окружающем пространстве, но всё ещё видных в радиодиапазоне.

Сверхновые оказались настолько яркими, что их можно видеть в далёких галактиках, с расстояний в миллиарды световых лет. «Служба Сверхновых» регистрирует ежегодно десятки вспышек СН в других галактиках, а в 1987 г. такая вспышка произошла достаточно близко – в Большом Магеллановом Облаке, карликовой галактике, отстоящей от нас на 55 кпк. СН-1987а, как её называли, дала важные сведения о физике Сверхновых.

В 30-х гг. прошлого века Р.Минковский разделил Сверхновые на два типа – СН-I и СН-II. Наиболее мощная СН-II представляет собой взрыв в результате гравитационного коллапса массивной звезды. В это время звёздная сердцевина состоит из ядер железа (конечного продукта термоядерного горения), углерода, кремния и других элементов, образованных в реакциях синтеза. Из-за резкого сокращения темпа реакций и понижения температуры центральная часть звезды теряет устойчивость, катастрофически сжимаясь. Это, в свою очередь, вызывает разогрев слоёв, где ещё сохранились ядра, пригодные для синтеза, и их быстрое включение в термоядерное горение. Детонация ядерного горючего принимает вид взрыва с выбросом звёздной оболочки, большого числа продуктов ядерного горения и образованием в центре нейтронной звезды или чёрной дыры, в зависимости от массы звезды в момент коллапса. Если масса невелика  $(1,2\div 4)M_{\text{С}}$ , остатком будет нейтронная звезда. У более массивных звёзд нет силы, противостоящей коллапсу. Они превращаются в чёрные дыры – образования, лишённые какой-либо структуры, в идеале сжатые до сингулярности. Из чёрной дыры, обладающей гигантским гравитационным потенциалом, не может вырваться ни материальный объект, ни излучение – никакой информационный сигнал. Эти «невидимки» проявляют себя

только через гравитацию и могут быть замечены по отклонению соседних звёзд и потоков газа.

Вспышка СН-II длится несколько месяцев. Теория предсказывает кратковременный (~10 с) всплеск нейтринного излучения в начале коллапса, уносящий большую часть энергии взрыва. СН-1987а, характерный представитель СН-II, подтвердила этот вывод: короткий нейтринный сигнал был зарегистрирован. Измеренная по этим данным энергия Сверхновой составила  $E_{\text{СН}} = 10^{53}$  эрг, что намного больше иных звёздных вспышек и на порядки превышает стационарную энергетику самых «горячих» звёзд.

Сверхновые долгое время оставались лидерами звёздного мира. Конкурентов среди звёзд, казалось, не могло быть. Но они нашлись, причём, оказалось, были известны уже давно, но умело скрывали свой высокий потенциал.

**Космические гамма-всплески.** В конце 60-х гг. были обнаружены странные космические гамма-всплески – кратковременные (не больше минут) потоки рентгеновского и гамма-излучения, приходящие неизвестно откуда. Гамма-всплески приходили равномерно со всех сторон, не показывая никакого «пристрастия» к плоскости эклиптики, экватору Галактики, другим выделенным направлениям. Их источники ничем себя не проявляли. Судя по спектрам (10 кэВ–10 МэВ), гамма-всплески возникали в процессах с высоким выделением энергии, которые трудно было бы не заметить. Загадка привлекла внимание. На таинственные всплески началась охота, но первое время, в случайном поиске, они попадались редко.

Важный шаг сделала группа ФТИ им. А.Ф.Иоффе, создавшая детектор КОНУС, специально предназначенный для исследования всплесков. Был снижен порог регистрации, что в несколько раз увеличило «улов», и была разработана методика определения небесных координат всплеска. Так как поток далёкого источника представляет собой плоскую волну, оказалось возможным определять два угла, фиксирующих его направление, путём сравнения амплитуд нескольких счётчиков. Расположенные известным образом, они получали долю потока в зависимости от углов ориентации к фронту волны. Точность метода, однако, невелика: радиус «круга ошибок» (где

находится источник) составлял несколько градусов. Число найденных всплесков выросло (примеры – на рис. 3), но их природа оставалась тайной.

Вторым важным шагом стал эксперимент *BATSE* на борту орбитальной станции *GRO-COMPTON* (1991–2001 гг.). Это был хорошо отлаженный американский конвейер, выдававший в среднем по всплеску в сутки с измерением временного профиля, спектра и других атрибутов каждого события. 4-й каталог *BATSE* содержит около 3000 событий – в десятки раз больше, чем было получено в других экспериментах. Полученные сведения сократили число гипотез гамма-всплесков, но не раскрыли тайну их происхождения. Анализ данных привёл к следующим точным фактам:

1. Распределение всплесков по небесной сфере строго изотропно. Нет указаний, выходящих за пределы случайных флуктуаций, на какую-либо группировку на небе.

2. Распределение всплесков по потоку энергии гамма-всплеска  $P$  отличается от ожидаемого  $P^{-3/2}$ , полученного в предположении постоянной плотности источников. Отличие – в уменьшении числа регистрируемых всплесков с ослаблением потока, из чего следует, что плотность источников прогрессивно убывает с расстоянием.

3. Нет никаких особенностей в энергетических спектрах всплесков, «уцепившись» за которые можно было бы определить расстояние до источников (как это делается по характерным линиям в спектрах галактик).

Третий, определяющий, шаг был сделан итало-голландским спутником *BeppoSAX*, запущенным в 1997 г. Он реализовал идею «космического подсолнуха», предложенную у нас ещё в 60-х гг., но тогда не «воп-

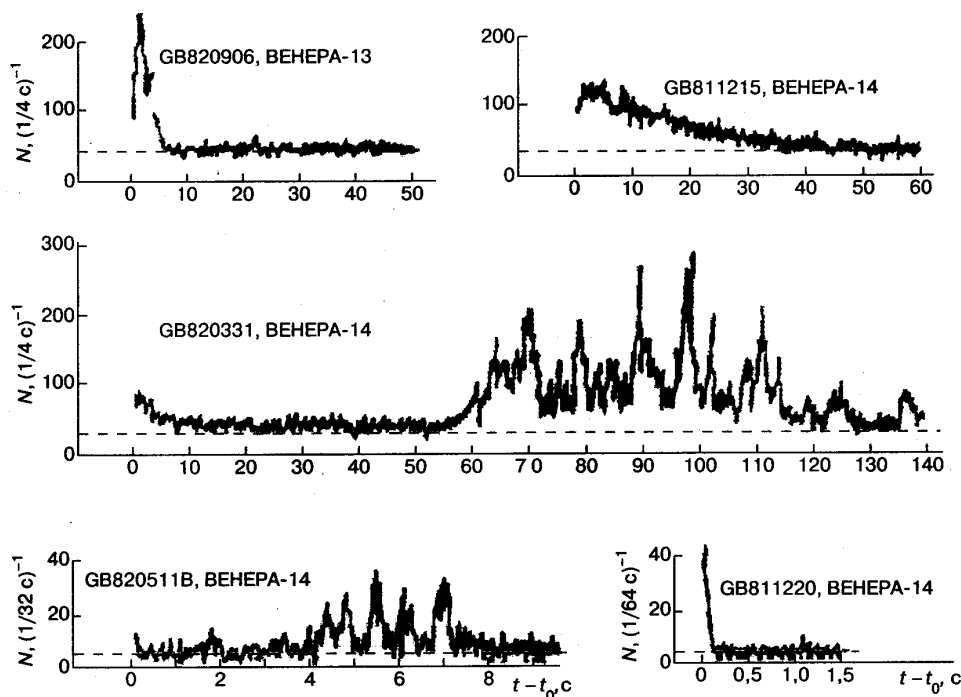


Рис. 3. Временные профили гамма-всплесков (эксперимент КОНУС)

лощённую в металле». «Летучий голландец» имел на борту три вида детекторов: монитор полного обзора, улавливавший гамма-всплески со всей открытой (не затенённой Землёй) небесной сферы и определявший «круг ошибок» в  $\sim 2^\circ$ , и два направленных рентгеновских телескопа – широкого и узкого обзора с угловой точностью  $3'$  и  $50''$  соответственно. Направленные телескопы – «подсолнухи», которые «тянулись» к источнику (как земные к Солнцу), последовательно сжимали «круг ошибок». Успех операции зависел от быстроты обработки данных, что позволяло на следующих витках орбиты направлять «подсолнухи» в нужные участки неба, чтобы уловить затухающее рентгеновское излучение источника.

Результаты не заставили себя ждать: рентгеновские угасающие (транзистентные) источники были найдены, их положение на небесной сфере определено достаточно точно. Теперь можно было ввести в дело оптические телескопы – искать в сжатом «круге ошибок» затухающий объект (оптический транзистент, ОТ).

За пару лет *VerroSAX*, поддержанный главными телескопами (включая 10-метровый *Keck* на Гавайях и космический телескоп им. Хаббла, *HST*), поймал гамма-всплески, сопровождаемые ОТ, в спектре которых нашли смещённые линии. Источники всплесков оказались слабыми объектами ( $20^m$ – $24^m$ ), природа которых могла быть открыта только по измерению параметра  $Z$ . В большинстве случаев  $Z > 0,5$  (рекордное значение 4,5), что указывает на громадные расстояния до источников. Большинство – далёкие объекты, находящиеся на предельных расстояниях. В нескольких случаях ( $Z \ll 1$ ) гамма-всплески исходили от Сверхновых.

Тайна всплесков раскрыта, их источники обнаружены. Но что такое сами объекты, порождающие чудовищные взрывы, энергия которых, как нетрудно подсчитать, зная расстояние до них, достигает  $10^{55}$  эрг? Какие процессы приводят к выделению энергии в жёстком гамма-излучении?

**Космологические фэйрболы.** Источники всплесков получили название *фэйрболы* (*огненные шары*) с высокой температурой, эквивалентной регистрируемым гамма-квантам:  $T = E/k = 10^{11}$  К для  $E = 10$  МэВ, где  $k$  – постоянная Больцмана. Гигантские фэйрболы полыхают на границах Вселенной, а их гамма-излучение, пройдя через весь мир, доносит до нас эхо вселенских катастроф. Они вспыхнули за миллиарды лет до образования Солнечной системы.

Модель космологических фэйрболов объяснила наблюдаемые свойства гамма-всплесков. Послесвечения источников не замечали потому, что они очень слабые, их смогли обнаружить только самые мощные телескопы. Изотропия всплесков по небу – следствие однородности Вселенной в большом масштабе ( $> 100$  Мпк). А уменьшение частоты прихода слабых всплесков (отклонение от зависимости  $P^{-3/2}$ ) – результат разлёта галактик в расширяющемся мире и эффекта Доплера. Наконец, спектральных линий у всплесков нет ввиду теплового,

без особенностей, спектра излучения.

Были предложены варианты модели, отличающиеся деталями нагрева, расширения и излучения фэйрбола. Энергетическим источником служит новый необычный процесс. Выделяемая энергия самых ярких всплесков эквивалентна нескольким массам Солнца, переходящим за секунды в гамма-излучение! Появился термин *Гиперновая*. Для объяснения стали привлекать гипотетический процесс слияния нейтронных звёзд и чёрных дыр в тесных двойных системах. Такие системы в принципе могут существовать, но прежде нигде себя не проявляли. Как сказал один персонаж: «Нельзя ли для прогулок поближе выбрать переулочек?»

**Розеттский камень гамма-всплесков.** Решение принёс уникальный случай – всплеск GRB 030329, зарегистрированный 29 марта 2003 г. орбитальным детектором *HETE* (*NASA*). Это очень яркий всплеск, его ОТ обнаружил телескоп *VLT* Европейской южной обсерватории (Чили) и нашёл смещённую линию с  $Z = 0,168$ . Расстояние до источника всего 800 кпк. Однако он был таким же по форме и длительности, как фэйрболы на краю Вселенной. В течение месяца он был «под колпаком» многих научных групп. Выяснилось, что ОТ очень похож на Сверхновую типа SN-Ic, которую давно связывали со вспышкой звезды Вольфа–Райе (В–Р), редкого класса массивных звёзд. Еще 10 лет назад рассматривался сценарий фэйрбольной модели с коллапсом звезды В–Р, который сейчас оказался наиболее близким к наблюдаемым свойствам ОТ. Подобно историческому Розеттскому камню, который помог расшифровать египетские иероглифы, GRB 030329 стал ключом к решению загадки источников гамма-всплесков. На связь всплесков со звёздами В–Р указывали российские физики А.М.Черепашук и С.С.Герштейн.

**Звёзды Вольфа–Райе.** Это малочисленная группа массивных ( $> 25 M_\odot$ ) звёзд, быстро проходящих свой жизненный путь. Средний возраст – меньше миллиона лет. Звёзды В–Р – молодые звёзды, которые в Галактике могут образовываться только в спиральных рукавах, где много газа и продолжает идти процесс звездообразования. Наблюдаемые в Галактике звёзды В–Р группируются в узкой полосе ( $\pm 10^\circ$ ) вдоль галактического экватора. Их повышенная активность проявляется в интенсивном звёздном ветре, который «срывает» внешние слои звезды. По этой причине в спектрах В–Р нет линий водорода, зато много линий элементов, образованных в термоядерных реакциях. Это звёзды на последнем этапе эволюции, созревшие для взрыва Сверхновой. При такой массе их взрывы – самые мощные.

Звёзды В–Р известны почти 100 лет. Благодаря высокой светимости они наблюдаются не только в Галактике, но и в других звёздных системах. 7-й каталог звёзд В–Р (2001 г.) содержит 450 наименований (все они, как уважаемые особы, имеют собственные име-

на). Из-за сильного поглощения газом и пылью вдоль галактического экватора мы не видим далёких звёзд В–Р. По оценке, их в Галактике 6500 – очень малое число по сравнению с другими типами звёзд, в связи с чем их вспышки – крайне редкое явление в каждой галактике. Их можно наблюдать в основном там, где галактик много, – на космологических расстояниях. По этой причине большая часть гамма-всплесков, побочного продукта взрыва В–Р, приходит от далёких галактик ( $Z \geq 1$ ).

Гиперновая – это взрыв СН-Ис, в результате которого образуется массивная чёрная дыра с аккреционным диском втягиваемого в неё окрестного вещества. Аккреционный диск нагрет до высокой температуры, активен и неустойчив. От него часто наблюдаются выбросы (джеты), скорость которых близка к скорости света. Релятивистский джет, испущенный через несколько секунд после взрыва СН, может догнать плотный звёздный ветер звезды, испущенный до взрыва. Взаимодействие джета со звёздным ветром и порождает гамма-всплеск. Удивительно, что из всех предложенных моделей, именно эта, на первый взгляд, не самая простая, наилучшим образом соответствует наблюдениям.

Нужны дополнительные результаты по близким гамма-всплескам. Ждать придётся недолго: на орби-

ту выведен новый «охотник» – космическая обсерватория *Swift* (NASA), на борту которой три вспомогательных телескопа – оптический, ультрафиолетовый и рентгеновский – для быстрого поиска послесвечения объекта, испустившего гамма-всплеск.

#### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое абсолютная звёздная величина?
2. Как определить расстояние до звезды, если известна её абсолютная звёздная величина?
3. Почему Солнце – звезда спектрального класса G2?
4. Какие звёзды называются красными гигантами и какие – белыми карликами?
5. Какое ядерное горючее в протозвезде, звезде главной последовательности и красном гиганте?
6. Что такое «гелиевая вспышка»?
7. Чем определяется устойчивость белого карлика?
8. Что противостоит гравитационному сжатию в нейтронной звезде?
9. Какие звёзды взрываются как Сверхновые?
10. Почему Солнце не может стать Сверхновой?

#### Литература

- Шкловский И.С. Звёзды. – М.: Наука, 1977.  
 Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика: Гл. XXII «Источники энергии и эволюция звёзд». – М.: Наука, 1980.

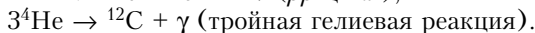
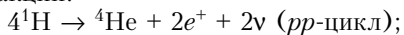
### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

1. Оцените массу Немезиды (гипотетической звезды-компаньона Солнца), зная, что период обращения двойной звёздной системы равен 26 млн лет, а радиус орбиты – 1 пк. (3 балла.)

2. В чём выражается солнечная активность? Каковы её наиболее яркие проявления? (1 балл.)

3. В Солнечной системе – два пояса астероидов: между Марсом и Юпитером и за орбитой Плутона. Как объясняют их происхождение? (2 балла.)

4. Вычислите энерговыделение двух термоядерных реакций:



Массы ядер: 938,3 МэВ ( $^1\text{H}$ ); 3723,6 МэВ ( $^4\text{He}$ ); 11 178 МэВ ( $^{12}\text{C}$ );  $m_e = 0,5$  МэВ,  $m_\nu = 0$ . (2 балла.)

5. В природе есть четыре типа устойчивых звёзд: звезда Главной последовательности, белый карлик, нейтронная звезда, чёрная дыра. Чем определяется в каждом случае устойчивое состояние звезды? (3 балла.)

6. На заключительной стадии эволюции в результате гравитационного коллапса звезда ( $M = 2M_C$ ,  $R = 10^{11}$  см) становится нейтронной ( $R_{\text{нз}} = 10$  км). Какая энергия выделится при вспышке Сверхновой? (2 балла.)

7. Какую видимую звёздную величину имеют звёзды туманности Андромеды, находящейся на расстоянии 800 кпк, если их абсолютные звёздные величины такие же, как Солнца ( $M_C = 4,9$ ) и Сириуса ( $M_{\text{Сир}} = 1,4$ )? (2 балла.)

8. Оцените возраст Солнца, предполагая, что в

момент его образования количество изотопов  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  было одинаково, а в настоящее время они соотносятся как 0,0072. Периоды полураспада изотопов урана:  $7,1 \cdot 10^8$  лет ( $^{235}\text{U}$ ),  $4,5 \cdot 10^9$  лет ( $^{238}\text{U}$ ). (3 балла.)

9. Может ли Солнце стать Сверхновой? (1 балл.)

10. Определите гравитационный радиус Солнца. Есть ли в природе силы, которые могли бы сжать Солнце до такого размера? (1 балл.)

11. Оцените радиус красного гиганта светимостью  $10^{35}$  эрг/с и поверхностной температурой 4000 К (спектральный класс M). (2 балла.)

12. Какова предельная масса белого карлика? (1 балл.)

13. Почему для перехода к гелиевому, углеродному, кислородному «ядерному горючему» требуются всё более высокие температуры? Оцените температуры этих переходов. (3 балла.)

14. Во время вспышки Сверхновой СН-1987А (в Большом Магеллановом Облаке) установка *KAMIOKANDE*, расположенная в глубокой шахте, зарегистрировала сигнал из 12 импульсов за 10 с при среднем фоне в шахте 1 имп/мин, что явилось доказательством нейтринного потока от Сверхновой. Какова вероятность появления этого сигнала в результате случайной флуктуации фона? (2 балла.)

15. Можно ли с помощью потока нейтрино отличить звёзды из антивещества от звёзд вещественного состава? (2 балла.)

16. Какова природа космических гамма-всплесков? Почему большая часть всплесков приходит из далёких галактик? (2 балла.)