

АСТРОФИЗИКА. ЗВЕЗДНАЯ АСТРОНОМИЯ

Астрофизика изучает физические свойства небесных тел. «В необычных астрофизических условиях законы физики предстают перед исследователями в ином ракурсе, более глубоко раскрывая свое содержание», - писал известный советский астрофизик С.Б. Пикельнер (1921-1975).

§ 7. Физика звезд

Одним из самых распространенных объектов во Вселенной, в которых сосредоточена большая часть массы видимого вещества, являются звезды. *Звезды представляют собой самосветящиеся плазменные (газовые) шары, в которых энергия гравитационного притяжения вещества уравнивается его тепловой энергией, выделяемой в термоядерных реакциях, происходящих в их недрах.* Основными параметрами являются спектр, светимость, масса и радиус.

Ближайшей к Земле звездой является Солнце, для которой указанные параметры легко найти из наблюдений, зная астрономическую единицу. *Светимостью звезды L называется энергия, излучаемая звездой в единицу времени.* Светимость Солнца вычисляется по формуле

$$L_C = 4\pi a_3^2 Q, \quad (7.1)$$

где *солнечная постоянная Q , т.е. полное количество лучистой энергии, проходящей через единицу времени через единицу площади, перпендикулярной направлению на Солнце на расстоянии $a_3 = 1a.e.$* Подставляя в (7.1) значения $1a.e. = 1,5 \cdot 10^{11} м$ и $Q = 1,95 \text{ кал}/(см^2 \cdot \text{мин})$, получаем искомое значение светимости Солнца $L_C = 3,84 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$. *Радиус Солнца* вычисляется по формуле

$$R_C = a_3 \theta_3, \quad (7.2)$$

где $\theta_3 = 16'$ - угол, под которым с Земли виден радиус Солнца.

Подставляя в (7.2) значения астрономической единицы и углового радиуса Солнца в радианах, получаем искомое значение радиуса Солнца (см. § 1) $R_C = 7 \cdot 10^8 м$.

Для нахождения *массы Солнца* необходимо использовать III закон Кеплера с учетом движения Солнца относительно планеты (ниже см. задачи) В результате получаем (см. § 1) $M_C = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ кг}$. Астрономическая единица определяется по формуле

$$a_3 = \frac{R_3}{P_C}, \quad (7.3)$$

где R_3 - радиус Земли (см. § 1), p_c - *параллакс Солнца*, который определяется как угол смещения Солнца при перемещении точки наблюдения, где Солнце видно в зените, в точку, где оно видно на горизонте. Параллакс Солнца $p_c = 8,79''$. Подставляя в (7.3) значения радиуса Земли $R_3 = 6,37 \cdot 10^6$ м и параллакса Солнца в радианах получаем искомое значение астрономической единицы.

Излучение звезд имеет непрерывный спектр, на который наложены линии поглощения или излучения. *Непрерывный и дискретный спектры* образуются в атмосферах звезд. Непрерывный спектр Солнца идет с ее видимой поверхности, называемой *фотосферой*. Выше расположена *хромосфера*, где образуются фраунгоферовские линии поглощения при прохождении через нее излучения фотосферы. Внешний слой солнечной атмосферы, расположенный над хромосферой, называется *короной*. Во время солнечных затмений фотосфера Солнца закрыта Луной, поэтому появляется возможность наблюдения излучения короны и хромосферы. Излучение хромосферы в этом случае имеет эмиссионные линии.

Важной характеристикой излучения является его *интенсивность* I_ν , которая определяется как количество энергии в единицу времени, на единицу площадки перпендикулярной направлению излучения, распространяющегося внутри единичного телесного угла, в единичном интервале частот. Интенсивность излучения I_ν с частотой ν , проходящего путь ds звездной атмосфере, определяется балансом между излучением и поглощением, описываемым с помощью *уравнения переноса*

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_\nu I_\nu + \epsilon_\nu, \quad (7.4)$$

где α_ν - *коэффициент поглощения* на пути ds , ϵ_ν - *коэффициент излучения* в объеме $dsd\sigma$. *Поток излучения*

$$H_\nu = \int I_\nu \cos\theta d\Omega. \quad (7.5)$$

Элемент *телесного угла*

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi, \quad (7.6)$$

где θ - *полярный угол*, под которым падает излучение на площадку $d\sigma$, φ - *азимутальный угол*. Светимость звезды L связана с ее радиусом R и потоком, проинтегрированным по всем частотам

$$H = \int_0^\infty H_\nu d\nu, \quad (7.7)$$

соотношением

$$L = 4\pi R^2 H. \quad (7.8)$$

Поскольку *непрерывный спектр звезды близок к планковскому спектру*, то ее температура T и длина волны, на которую приходится максимум интенсивности излучения λ_m , подчиняются *закону смещения Вина*

$$T\lambda_m = b, \quad (7.9)$$

где постоянная $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

В основу классификации звезд положена диаграмма Герцшпрунга-Рассела (1910 г.), дающая зависимость светимости звезд от их спектра или температуры (см. рис.). Спектральные классы звезд схематически можно расположить в линию:

$$\text{O} - \text{B} - \text{A} - \text{F} - \text{G} - \text{K} - \text{L} - \text{M} \quad (7.10)$$

в порядке убывания температуры от 30000 К до 2000 К. На диаграмме Герцшпрунга-Рассела выделяются три ветви: **главная последовательность**, ветвь красных гигантов и ветвь белых карликов. Светимости звезд ограничены сверху **эддингтоновским пределом**

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi M m_p c}{\sigma_m} = 10^{31} \frac{M}{M_\odot} \text{ Вт}. \quad (7.11)$$

где M - масса звезды, $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ - масса протона, **томсоновское сечение рассеяния**

$$\sigma_m = \frac{8\pi}{3} r_e^2 = 6,65 \cdot 10^{-29} \text{ м}^2, \quad (7.12)$$

где **классический радиус электрона**

$$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2,82 \cdot 10^{-15} \text{ м}, \quad (7.13)$$

заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, **масса электрона** $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.

Массы звезд находятся в интервале от 0,1 до 100 M_\odot . Радиусы звезд могут быть вычислены, исходя из **закона Стефана-Больцмана для планковского излучения**

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4, \quad (7.14)$$

где **постоянная Стефана-Больцмана**

$$\sigma = \frac{\pi^2 k_B^4}{60 \hbar^3 c^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4), \quad (7.15)$$

где **постоянная Больцмана** $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К}$, **постоянная Планка** $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Из формулы (7.14) получаем для радиуса звезды

$$R = R_\odot \left(\frac{T_\odot}{T} \right)^2 \sqrt{\frac{L}{L_\odot}}, \quad (7.16)$$

где $T_\odot = 6000 \text{ К}$ - **температура фотосферы Солнца**.

Рассмотрим сначала **звезды главной последовательности**, которые **называются нормальными или стационарными звездами**. Их физическое состояние определяется условиями **гидростатического равновесия**

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r \rho}{r^2}, \quad (7.17)$$

где P - **полное давление**, ρ - **плотность**, r - **расстояние до центра звезды**, **масса внутри сферы радиуса r**

$$M_r = 4\pi \int_0^r \rho r^2 dr, \quad (7.18)$$

и энергетического равновесия

$$\frac{dP_u}{dr} = -\frac{\kappa \rho}{c} \cdot \frac{L_r}{4\pi r^2}, \quad (7.19)$$

где κ - коэффициент поглощения на единицу плотности, светимость внутри сферы радиуса r

$$L_r = 4\pi \int_0^r \varepsilon \rho r^2 dr, \quad (7.20)$$

ε - количество энергии, испускаемой единицей массы в единицу времени.

Полное давление

$$P = P_g + P_u, \quad (7.21)$$

где давление газа P_g определяется из уравнения состояния идеального газа

$$P_g = \frac{R_*}{\mu} \rho T, \quad (7.22)$$

универсальная газовая постоянная $R_* = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$, μ - молекулярный вес, а давление излучения дается формулой

$$P_u = \frac{4\sigma T^4}{3c}, \quad (7.23)$$

(см. ниже задачи). Введем обозначение

$$P_g = \beta P, \quad (7.24)$$

где β - доля газа в полном давлении.

Используя теорию Эмдена (1907 г.) и Эддингтона (1926 г.) внутреннего строения звезд, были получены соотношения

$$1 - \beta = C_1 M^2 \beta^4 \quad (7.25)$$

и

$$\frac{L}{M} = C_2 (1 - \beta), \quad (7.26)$$

C_1, C_2 постоянные. Из формул (7.25), (7.26) легко найти зависимости светимости звезды от ее массы (см. ниже задачи).

Для звезд с малым световым давлением и малой массой, т.е. при $\beta \approx 1$, имеем

$$L \sim M^3, \quad (7.27)$$

а для звезд с большим световым давлением и большой массой, т.е. при $\beta \ll 1$, получаем эддингтоновскую светимость (7.11)

$$L \sim M. \quad (7.23)$$

Из теории Эмдена можно давление, температуру и плотность в центре звезды, ничего не предполагая о природе источников ее энергии. Для этого достаточно только использовать условие гидростатического равновесия для газа с политропным уравнением состояния

$$P = \text{const} \cdot \rho^k, \quad (7.24)$$

где k - показатель политропы. В частном случае адиабаты $k = \gamma$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}, \quad (7.25)$$

где C_p, C_v - *теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме* соответственно. Уравнение состояния зависит от расстояния до центра звезды. В центральной области оно близко к уравнению состояния ультрарелятивистской плазмы ($\gamma = \frac{4}{3}$). По мере удаления от центра, оно сначала переходит в уравнение состояния атомарного водорода ($\gamma = \frac{5}{3}$), а затем в уравнение состояния молекулярного водорода ($\gamma = \frac{7}{5}$).

Температура в центре звезды дается формулой

$$T_c = -\frac{(\gamma-1)\mu G}{\gamma R_* x_1 y'(x_1)} \cdot \frac{M}{R}, \quad (7.26)$$

В центре звезды $\gamma = \frac{4}{3}$. Подставляя в формулу (7.26) величины $\gamma = \frac{4}{3}$, $-x_1 y'(x_1) = 3,42$, $\mu = 1$, $M = M_C$, $R = R_C$, получаем температуру в центре Солнца $T_c = 2 \cdot 10^7 K$, что хорошо согласуется с моделями термоядерного синтеза.

Из теории Эмдена могут быть получены формулы для **гравитационной энергии звезды**

$$E_{gp} = -\frac{3(\gamma-1)}{5\gamma-6} \cdot \frac{GM^2}{R}, \quad (7.27)$$

тепловой (или внутренней) энергии газа

$$E_{газ} = \frac{1}{5\gamma-6} \cdot \frac{GM^2}{R} \quad (7.28)$$

и **полной энергии**

$$E_{пол} = -\frac{3\gamma-4}{5\gamma-6} \cdot \frac{GM^2}{R}, \quad (7.29)$$

равной сумме гравитационной и газовой энергий:

$$E_{пол} = E_{gp} + E_{газ} \quad (7.30)$$

Из (7.27) – (7.30) получаем

$$E_{пол} = (4-3\gamma)E_{газ} = \frac{3\gamma-4}{3(\gamma-1)} E_{gp}. \quad (7.31)$$

Условие устойчивости звезды $E_{пол} < 0$ выполняется при $\gamma > \frac{4}{3}$. При $\gamma = \frac{5}{3}$

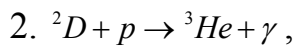
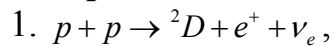
получаем $E_{пол} = -E_{газ} = \frac{1}{2} E_{gp}$. Отсюда следует, что $\Delta E_{газ} = -\Delta E_{пол}$, т.е.

теплоемкость звезды отрицательна (см. ниже задачи). **Это означает, что поглощение энергии ведет к охлаждению, а излучение к разогреву звезды.** При изменении полной энергии на $\Delta E_{пол} > 0$ за счет термоядерных реакций радиус звезды R увеличивается согласно (7.29), что приводит к ее охлаждению. При излучении света с поверхности фотосферы, с изменением ее полной энергии на $\Delta E_{пол} < 0$, радиус звезды R уменьшается, что приводит

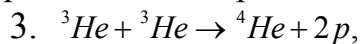
к ее разогреву согласно (7.28). Таким образом, равновесие восстанавливается. Поэтому *термоядерные реакции идут в течение миллиардов лет и не носят взрывной характер.*

Ядерные реакции синтеза водорода в гелий для звезд, находящихся на главной последовательности диаграммы Герцишпрунга-Рассела, идут по двум циклам: водородному (p-p) для звезд с массами $M \leq 1,3M_{\odot}$ и углеродному (CNO) для звезд с массами $M > M_{\odot}$.

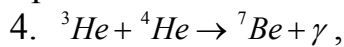
Водородный цикл состоит из следующих реакций:



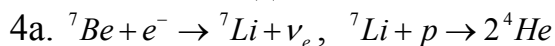
в центре Солнца с вероятностью 65%



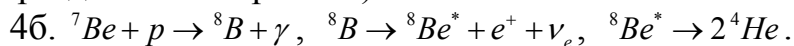
или с вероятностью 35%



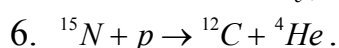
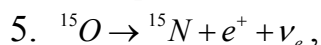
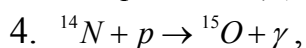
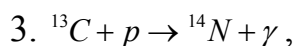
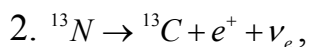
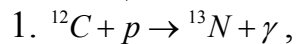
после чего возможны два канала:



или (гораздо менее вероятно)



Углеродный цикл состоит из следующих реакций:



Таким образом, *водородный и углеродный циклы сводятся к возникновению одного ядра 4He из четырех протонов с образованием электронных нейтрино и γ -квантов. Энергия, выделяемая при этом, определяется дефектом массы образующегося ядра гелия $\Delta E = (4m_p - m_{He})c^2 = 27,3 \text{ МэВ}$.*

§ 8. Образование и эволюция звезд

Первое научное объяснение образования звезд было дано

И. Ньютоном в его письме к Р. Бентли от 10 декабря 1692 г.: «...если бы все вещество Вселенной было равномерно распределено по бесконечному пространству, оно никогда не могло бы объединиться в одну массу, но часть его сгущалась бы тут, а другая там, образуя бесконечное число огромных масс, разбросанных на огромных расстояниях друг от друга по всему

бесконечному пространству. Именно так могли бы образоваться Солнце и неподвижные звезды...»

Следует упомянуть об одном крупном заблуждении в истории звездной астрономии. Долгое время считалось, что звезды образуются из туманностей. В ночь с 20 на 21 августа 1985 г. в центре туманности Андромеды появилась яркая точка. Э. Хартвиг из обсерватории Дерптского университета (Россия) писал: «... в этой туманности уже есть центральное солнце...» Значительно позже стало известно, что это была вспышка сверхновой. Развитие спектральной техника положило конец этому заблуждению. Наблюдая спиральные туманности, В. Слайфер из Ловелловской обсерватории (США) показал, что они движутся с огромными скоростями. В 1917 г. он пришел к убеждению, что это звездные острова во Вселенной, т.е. галактики, из которых не могли формироваться звезды.

Объяснение И. Ньютона носило качественный характер, и лишь в 1902 г. *английский физик Дж. Джинс решил задачу о гравитационной неустойчивости вещества, из которого могут образовываться звезды.* Он нашел критерий гравитационной неустойчивости, которые в последствии стал носить его имя. *Критерий Джинса образования звезды, из дозвездного вещества, имеет вид:*

$$|U| \sim \frac{GM^2}{\lambda} > W \sim Mc_s^2, \quad (8.1)$$

где U - *потенциальная энергия*, W - *кинетическая энергия*, M - *масса протозвезды* (объекта звездной массы на стадии сжатия), λ - *характерный размер протозвезды*, c_s - *скорость звука* в протозвезде. Поскольку

$$M \sim \rho \lambda^3, \quad (8.2)$$

где ρ - *плотность протозвезды*

и

$$c_s = \sqrt{\frac{\gamma R_* T}{\mu}}, \quad (8.3)$$

где T - *температура протозвезды*, μ - *молекулярный вес вещества протозвезды*, то критерий Джинса состоит в том, что сжатие протозвезды происходит при

$$\lambda > \lambda_J \text{ и } M > M_J, \quad (8.4)$$

где *длина Джинса*

$$\lambda_J = \frac{c_s}{\sqrt{G\rho}} \sim \sqrt{\frac{T}{\rho}}, \quad (8.5)$$

где *масса Джинса*

$$M_J \sim \frac{c_s^3}{\sqrt{G^3\rho}} \sim \sqrt{\frac{T^3}{\rho}}. \quad (8.6)$$

Звезды в основном образуются в облаках молекулярного водорода межзвездной среды (см. § 10), имеющих температуру $T \sim 10\text{K}$ и плотность числа молекул $n \sim 10^3$. В этом случае $\lambda_J \sim 0,3\text{пк}$ и $M_J \sim 4M_C$. Облако, из

которого образуется звезда, сначала сжимается изотермически, т.е. при $T = const$, когда оно прозрачно для излучения. В этом случае, как показал Ф. Хойл в 1953 г., возможна **фрагментация** облака, т.к. масса Джинса уменьшается с ростом плотности по закону $M \sim \frac{1}{\sqrt{\rho}}$. Этим объясняется тот

факт, что **звезды часто образуются группами** (звездные скопления, кратные звезды). Затем сжатие становится адиабатическим, т.е. при $T \sim \rho^{\gamma-1}$, когда облако непрозрачно для излучения. Масса Джина в этом случае зависит от плотности по закону $M \sim \rho^{\frac{3\gamma-2}{2}}$, т.е. она начинает расти при $\gamma > \frac{4}{3}$, и фрагментация прекращается. Температура внутри протозвезды повышается. Начинаются ядерные реакции, и протозвезда превращается в звезду, которая после попадания на главную последовательность прекращает сжиматься, и находится в состоянии равновесия (нормальная звезда, см. § 7) достаточно долго. Для звезды с массой равной массе Солнца стадия сжатия длится около 10^6 лет, а пребывание на главной последовательности – около 10^{10} лет.

Равновесие нормальной звезды поддерживается за счет горения водорода. После выгорания водорода ее оболочка расширяется, а ядро сжимается, и в нем начинает гореть гелий с образованием более тяжелых элементов (от углерода до железа). **Оболочка звезды сбрасывается либо медленно (за $10^6 - 10^9$ лет), превращаясь в красный гигант, либо быстро (за 10^2 суток), взрываясь как сверхновая.** При дальнейшем расширении красного гиганта может образоваться планетарная туманность (см. § 10). **Ядро превращается в компактный астрофизический объект, т.е. белый карлик, нейтронную звезду или черную дыру** (см. § 9).

Отметим, что **при попадании в полосу неустойчивости на диаграмме Герцшпрунга-Рассела возможно образование нестационарных звезд, в том числе переменных, новых и сверхновых. Блеск переменных звезд изменяется в пределах нескольких порядков. Новые звезды меняют блеск в тысячи и миллионы раз. Светимость сверхновых может достигать суммарной светимости всех звезд в Галактике.**

В заключение приведем различные **сценарии эволюции после главной последовательности одиночных звезд различной начальной массы** $M = M_o + M_я$, где M_o - масса оболочки, $M_я$ - масса ядра.

1. При $0,1M_c < M < 0,5M_c$ образуется Не белый карлик с массой $M_я < 0,5M_c$, оболочки почти нет, поэтому красный гигант не образуется.
2. При $0,5M_c < M < 3M_c$ ядро превращается в С-О белый карлик с массой $M_я \sim 0,5M_c$, а оболочка с массой $M_o < 2,5M_c$ медленно расширяется, превращаясь в красный гигант, а затем в планетарную туманность (см. § 10).

3. При $3M_C < M < 8M_C$ ядро образует С-О белый карлик с массой $0,5M_C < M < M_C$, а оболочка с массой $M_o < 7,5M_C$ медленно расширяется, образуя красный гигант, а затем планетарную туманность.
4. При $8M_C < M < 10M_C$ ядро превращается в О-Ne-Mg белый карлик с массой $1,2M_C < M < 1,3M_C$, а оболочка с массой $M_o < 8,8M_C$ медленно расширяется, превращаясь в красный гигант, а затем в планетарную туманность.
5. При $10M_C < M < 30M_C$ ядро становится нейтронной звездой с массой $M < 2M_C$, а оболочка взрывается как сверхновая.
6. При $M > 30M_C$ ядро коллапсирует в черную дыру с массой $4M_C < M < 10M_C$, а оболочка с массой $M_o > 20M_C$ взрывается как сверхновая с испусканием гамма-всплеска.

§ 9. Белые карлики, нейтронные звезды (пульсары) и черные дыры. Квантовые эффекты

Белые карлики и нейтронные звезды представляют собой компактные астрофизические объекты, в которых гидростатическое равновесие обеспечивается давлением вырожденного фермионного газа. В случае белых карликов это давление электронного газа, а для нейтронных звезд – нейтронного. **Вырожденный фермионный газ подчиняется принципу Паули, согласно которому фермионы занимают все состояния с импульсами от нуля до импульса Ферми**

$$p_F = \left(\frac{3h^3 n}{8\pi} \right)^{1/3}, \quad (9.1)$$

где n - **плотность фермионов**, $h = 2\pi\hbar$. Иными словами среднее расстояние между фермионами меньше **длины де Бройля**. Это означает, что вырожденный фермионный газ представляет собой макроскопическую квантовую систему. **Условие вырождения** имеет вид

$$kT \ll \varepsilon_F, \quad (9.2)$$

где T - **температура фермионов**.

При $p_F \ll mc$ **энергия фермионов** $\varepsilon_F = \frac{p_F^2}{2m}$ (нерелятивистский случай).

При $p_F \gg mc$ имеем $\varepsilon_F = cp_F$ (ультрарелятивистский случай).

При $p_F = mc$ из формулы (9.1) получаем характерную **плотность фермионов**

$$n = \frac{8\pi m^3 c^3}{3h^3}, \quad (9.3)$$

где m - **масса фермиона**.

Из теории Эмдена в нерелятивистском случае для одноатомного газа ($\gamma = \frac{5}{3}$) получено следующее соотношение между массой M и радиусом R белого карлика

$$MR^3 = const, \quad (9.4)$$

которая качественно согласуется с наблюдениями.

В ультрарелятивистском случае ($\gamma = \frac{4}{3}$) получаем формулу для **предельной массы компактного астрофизического объекта с вырожденным фермионным газом, т.е. белого карлика или нейтронной звезды**

$$M = \frac{5,75M_c}{\mu^2}, \quad (9.5)$$

где μ - **число нуклонов на один фермион** вырожденного газа.

Для **белых карликов**, в которых водород почти выгорел, $\mu = 2$ (на один электрон приходится два нуклона) и **предельная масса равна $1,44M_c$ (предел Чандрасекара)**. Для **нейтронных звезд** $\mu = 1$ и **предельная масса равна $5,75M_c$** . Учет эффектов ОТО и неидеальности нейтронного газа снижает этот предел до $2,5M_c$. **При массе ядра звезды превышающей $2,5M_c$ гидростатическое равновесие невозможно, и происходит гравитационный коллапс, т.е. образуются черные дыры - точечные сингулярные объекты с горизонтом событий, описываемые метрикой Шварцшильда** (см. § 5).

Плотность компактной звезды

$$\rho = \mu n m_H, \quad (9.6)$$

где m_H - **масса атома водорода**.

Для белого карлика $n = n_e$, где n_e - **плотность электронов**, и $\mu = 2$, а для нейтронной звезды $n = n_n$, где n_n - **плотность нейтронов**, и $\mu = 1$. Тогда из формул (9.3), (9.5) и (9.6) получаем формулы для **отношения плотностей нейтронной звезды и белого карлика**

$$\frac{\rho_{н.з.}}{\rho_{б.к.}} = \frac{1}{2} \left(\frac{m_n}{m_e} \right)^3 \quad (9.7)$$

и **отношения радиусов белого карлика и нейтронной звезды**

$$\frac{R_{б.к.}}{R_{н.з.}} = \frac{m_n}{2m_e}. \quad (9.8)$$

Белые карлики имеют радиусы порядка 10^4 км и плотности порядка 10^5 г/см³. При повышении плотности происходит **нейтронизация вещества**



приводящая к образованию нейтронных звезд. Радиусы нейтронных звезд порядка 10 км, а их плотности порядка ядерной плотности, т.е. 10^{15} г/см³.

Вращающиеся нейтронные звезды с магнитным полем наблюдаются в виде пульсаров, т.е. объектов, радиоизлучение которых испытывает пульсации с периодом от нескольких микросекунд до тысяч

секунд. Магнитные поля пульсаров могут достигать 10^{14} эс. **Периоды пульсаров могут уменьшаться за счет потери энергии на излучение гравитационных волн** (см. §5). **Черные дыры** могут вращаться, но **не могут иметь собственного магнитного поля**.

Важным классическим эффектом, который характеризует компактные астрофизические объекты, является **аккреция**, т.е. падение на них вещества. **В тесных двойных системах происходит образование вращающихся аккреционных дисков за счет перетекания вещества с нормальной звезды на компактный объект**. Нагрев вещества аккреционного диска происходит за счет турбулентности плазмы с вмороженным в нее магнитным полем. Аккреция на белые карлики может приводить к вспышке сверхновой. Тепло при аккреции выделяется как в самом диске, так и при ударе вещества о поверхность белого карлика или нейтронной звезды. **У черной дыры нет поверхности**, поэтому нагревается только диск. **Излучение при аккреции происходит в рентгеновском и оптическом диапазонах**. В частности, рентгеновские и оптические пульсары обусловлены аккрецией вещества на вращающиеся нейтронные звезды с сильными магнитными полями.

Наблюдения компактных астрофизических объектов с массами, превышающими предел Чандрасекара, показывают, что их электромагнитное излучение бывает двух типов: с постоянным периодом изменения интенсивности, если их масса меньше $2M_c$, и аperiодическое, если их масса больше $4M_c$. Первые интерпретируются как нейтронные звезды, вторые как черные дыры. **Отсутствие объектов с массами $2M_c < M < 4M_c$ свидетельствует о различии механизмов образования нейтронных звезд и черных дыр**.

Светимость при аккреции на компактные астрофизические объекты ограничена эддингтоновским пределом (7.11), т.е. для объектов с массами порядка массы Солнца она не превышает 10^{31} вт.

При падении вещества под горизонт черной дыры происходит потеря информации для внешнего наблюдателя (см. §5). **Это означает появление энтропии, следовательно, температуры. Горизонт черной дыры излучает как абсолютно черное тело с температурой Хокинга**

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B GM}, \quad (9.10)$$

где M - масса черной дыры. **Этот эффект называется испарением черной дыры за счет излучения Хокинга**. Мощность излучения Хокинга дается формулой (7.14). Для черных дыр звездных масс температура Хокинга ничтожно мала и составляет 10^{-7} К.

Таким образом, квантовые эффекты компактных астрофизических объектов связаны с вырождением фермионного газа для белых карликов и нейтронных звезд и излучением Хокинга для черных дыр.

Оставшиеся параграфы этой главы посвящены *звездной астрономии*, которая изучает свойства звездных систем: скоплений звезд, галактик и в том числе нашей Галактики, а также скоплений галактик.

§ 10. Структура и динамика Галактики. Межзвездная среда. Магнитные поля. Космические лучи

Звездная система, в которой находится Солнце (включая Солнечную систему и Землю) называется Галактикой или галактикой Млечный Путь. Млечный Путь наблюдается с поверхности Земли в виде широкой светлой полосы, тянущейся через все небо, вследствие того, что Солнце находится внутри диска, в котором сосредоточена большая часть звезд Галактики. *Ближайшая к Солнцу звезда «Проксима Центавра» находится от нас на расстоянии 1,3 пк.* Яркие звезды, видимые невооруженным глазом, находятся в ближайшей окрестности Солнца. Форму Галактики и положение в ней Солнца определил в 1785 г. английский астроном *Уильям Гершель* (1738-1822), которого можно считать основателем звездной астрономии.

Галактика состоит из плоской составляющей Галактики, т.е. *диска*, диаметром около 30 кпк и толщиной порядка 100 пк и сферической составляющей, т.е. *гало*, внешняя часть которого называется *коронай*, диаметром до 50 кпк. В центральной части диска имеется утолщение, называемое *балджем*, диаметр которого около 600 пк ¹. В центре балджа находится *ядро Галактики* размером около 10 а.е. Предполагается, что в его центре находится гигантская черная дыра с массой около $10^6 M_{\odot}$. *Общее число звезд в Галактике составляет около 200 миллиардов. Галактика вращается.* При этом *диск, имеющий спиральную структуру, вращается в несколько раз быстрее, чем гало. Корона не вращается вообще.* Помимо звезд в Галактике имеется *межзвездная среда, состоящая из газа и пыли, а также магнитные поля и удерживаемые ими космические лучи.* Происхождение космических лучей связывают с ускорением частиц при взрывах сверхновых.

Структура Галактики связана с ее звездным составом, который принято называть населением. К населению I относятся звезды с высоким содержанием тяжелых элементов, встречающиеся в спиральных ветвях: O и B звезды, сверхгиганты, цефеиды, рассеянные звездные скопления. Там же содержится основная доля пыли и газа, из которых образуются молодые звезды не старше 1 миллиарда лет. К населению II относятся старые звезды гало с низким содержанием тяжелых элементов и возрастом более 10 миллиардов лет: субкарлики, звезды типа RR Лиры и шаровые скопления.

¹ 1 парсек составляет 206 265 а.е. или 3,26 светового года, т.е. $3,0857 \cdot 10^{16}$ м

Сверхгиганты и субкарлики лежат соответственно в верхней и нижней части диаграммы Герцшпрунга-Рассела.

Цефеиды и звезды типа RR Лиры относятся к переменным звездам (см. § 8). Цефеиды относятся к пульсирующим гигантам и сверхгигантам спектральных классов F и G с постоянным периодом изменения радиуса. Так как период пульсаций цефеид ($P > 1$ сут) зависит от их светимости, они служат для определения расстояний до далеких объектов, в которых они находятся (например, до рассеянных скоплений в Галактике или до других галактик). Звезды типа RR Лиры относятся к короткопериодическим пульсирующим звездам ($P < 1$ сут) спектрального класса A, светимость которых в сотни раз превышает светимость Солнца.

Звездные скопления (см. § 8) делятся на два типа: *рассеянные -- с числом звезд до 10^4 и шаровые -- с числом звезд более 10^5 .*

Остановимся подробнее на *межзвездной среде*, играющей большую роль в круговороте вещества в Галактике. **Из межзвездной среды в результате джинсовской неустойчивости образуются звезды** (см. § 8). В процессе эволюции звезды теряют свою массу как в виде звездного ветра (подобного солнечному) так на конечной стадии при образовании компактных астрофизических объектов, сопровождающимся сбросом оболочки в виде планетарной туманности или остатка сверхновой. Сверхновые первого поколения (население II) выбрасывают в межзвездную среду тяжелые элементы, являющиеся продуктом ядерных реакций в их недрах, что объясняет высокое содержание тяжелых элементов в звездах второго поколения (населения I).

Межзвездная среда, составляющая несколько процентов видимого вещества Галактики, имеет сложную структуру. Она *состоит из газа, 90 % которого составляет водород, и пыли, масса которой не превышает 1 % от массы газа. Межзвездный водород может находиться в трех состояниях: атомарный водород HI, ионизованный водород HII и молекулярный водород H_2 .*

Кроме молекул водорода в *межзвездной среде встречаются* и более *сложные молекулы, входящих в состав т.н. мазерных конденсаций*, светимость которых может достигать 10^{35} эрг/с, т.е. сравнима со светимостью ярких звезд. **Аномально высокая светимость мазерных конденсаций в линиях сантиметрового диапазона связана с усилением эмиссии излучения молекул OH, CN, SiO и H_2O , H_2O в линиях сантиметрового диапазона за счет индуцированного излучения в системах с инверсной населенностью уровней в условиях отсутствия локального термодинамического равновесия**, имеющего место в межзвездной среде.

Плотность межзвездного газа n меняется от 10^{-3} до 10^6 частиц в кубическом сантиметре. **Наиболее плотные области межзвездной среды**

($n > 10^3 \text{ см}^{-3}$) называются туманностями. Они делятся на диффузные -- с плотностью $n < 10^4 \text{ см}^{-3}$ и планетарные, имеющие форму сферической оболочки, с плотностью до 10^6 см^{-3} (см. § 8).

Межзвездный атомарный водород состоит из облаков размером порядка нескольких парсек, находящихся в динамическом равновесии с ионизированной межоблачной средой, т.е. во всем объеме (внутри и вне облаков)

$$p = nkT = \text{const} \quad (10.1)$$

где p - давление, n -- число частиц в единице объема, T -- температура водорода. Таким образом, в межзвездной среде реализуется изобарический процесс, при котором

$n_1 T_1 = n_2 T_2$, где $n_1 = 10 \text{ см}^{-3}$ и $T_1 = 10^2 \text{ K}$ для облаков HI, а $n_2 = 0,1 \text{ см}^{-3}$ и $T_2 = 10^4 \text{ K}$ для межоблачной среды. Спиральные рукава, в которых локализован атомарный водород, наблюдаются в радиодиапазоне на линии $\lambda = 21,1 \text{ см}$, что соответствует частоте $\nu = \frac{c}{\lambda} = 1420 \text{ МГц}$.

Излучение с длиной волны 21 см обусловлено переходом между подуровнями сверхтонкой структуры атома водорода. На нижнем подуровне суммарный спин электрона и протона $S=0$, а на верхнем возбужденном подуровне $S=1$. Этот переход является магнитным дипольным. Его частота дается формулой

$$\nu = \frac{32}{3} \frac{\mu_e \mu_p}{h a_B^3}, \quad (10.2)$$

где $h = 2\pi\hbar$, в которую входят магнетон Бора μ_e , - магнитный момент протона μ_p и боровский радиус a_B , имеющие следующий вид:

$$\mu_e = \frac{e\hbar}{2m_e c}, \quad \mu_p = 2,7928 \frac{m_e}{m_p} \mu_e, \quad a_B = \frac{\hbar^2}{m_e e^2}.$$

Вероятность магнитного дипольного перехода в единицу времени из состояния $S=1$ в состояние $S=0$ выражается через частоту ν как

$$w = \frac{1}{3} \frac{e^2}{\hbar c} \frac{(h\nu)^3}{\hbar m_e^2 c^4} = 2,85 \cdot 10^{-15} \text{ с}, \quad (10.3)$$

что соответствует 1 переходу за 11 миллионов лет!

В облаках водорода с плотностью $n > 10^2 \text{ см}^{-3}$ с температурой $T < 10 \text{ K}$ атомарный водород HI переходит в молекулярный водород H_2 . В плотных холодных молекулярных облаках ($n \sim 10^3, T \sim 10 \text{ K}$) могут образовываться звезды (см. § 8).

Молекулярные облака часто содержат пыль, состоящую из твердых частиц размером от 0,01 до 1 мкм. В состав пылинок входят как легкие элементы H, O, C, Si так и металлы Mg и Fe. **Пыль ослабляет свет звезд и перерабатывает ультрафиолетовое излучение в инфракрасное.** По инфракрасному излучению наблюдают изотермическую стадию сжатия

протозвезды, образовавшейся в небольшом плотном газовой-пылевом облаке, т.н. глобуле.

Области ионизованного межзвездного водорода НII (зоны Стрёмгрена) радиусом около нескольких десятков парсек образуются вокруг молодых горячих звезд спектральных классов O и B за счет их ультрафиолетового излучения с длиной волны $\lambda < 912 \text{ \AA}$, т.е. в области континуума серии Лаймана.

Ультрафиолетовое излучение O и B звезд в областях НII, далеких от локального термодинамического равновесия, перерабатывается в видимое оптическое излучение серии Бальмера, по которому области НII наблюдаются в виде эмиссионных туманностей на фоне нейтрального водорода HI в спиральных ветвях Галактики. Области НII являются индикаторами зон активного звездообразования, где много молодых горячих звезд высокой светимости.

Рассмотрим теперь т.н. легкие компоненты Галактики, вклад которых в ее полную массу незначителен, но их плотность энергии сравнима с плотность энергии суммарного излучения звезд, т.е. составляет около 1 эВ в 1 кубическом сантиметре. Речь идет *о крупномасштабном магнитном поле Галактики и космических лучах, которые оно удерживает.*

Хотя нет прямых измерений величины магнитного поля Галактики, имеются многочисленные косвенные данные, свидетельствующие в пользу его существования: поляризация света звезд, вращение плоскости поляризации дискретных радиоисточников, удержание космических лучей в Галактике, *синхротронное излучение релятивистских электронов*, ориентация пыли вдоль диска и др.

Происхождение магнитного поля Галактики связывают с турбулентностью и дифференциальным вращением газа при образовании спиральных ветвей, где оно в основном и сосредоточено. *Величина магнитного поля Галактике в диске составляет около $10^{-6} - 10^{-5}$ э.* В гало магнитное поле в несколько раз меньше.

Космические лучи изотропны и состоят в основном из протонов (более 90%), α -частиц (7%), электронов (1%), тяжелых ядер (менее 1%) с энергиями от 10^6 до 10^{20} эВ. По сравнению со звездным составом в космических лучах гораздо больше ядер лития, бериллия и бора и ядер с $Z \geq 20$. Это означает, что космические лучи прошли слой вещества не менее $3g/cm^2$. Чтобы набрать такое количество вещества, космические лучи должны были продиффундировать вдоль запутанных силовых линий магнитного поля Галактики десятки миллионов лет. Учитывая *плотность энергии космических лучей*, получаем, что их источники должны иметь мощность порядка 10^{41} эрг/с , которая *вполне обеспечивается взрывами сверхновых в Галактике.* Косвенным подтверждением этого является наблюдаемое в радиодиапазоне *синхротронное излучение релятивистских электронов в остатках вспышек некоторых сверхновых в Галактике* (Кассиопея А, Крабовидная туманность и др.). Однако космические лучи сверхвысоких энергий (больше 10^{19} эВ) могут иметь внегалактическое происхождение.

Энергетический спектр космических лучей является степенным

$$P = KE^{-\gamma} \text{ частиц / см}^2 \text{сМэВ}, \quad (10.4)$$

где E -- энергия частицы, γ -- показатель спектра. В широком диапазоне энергий и типов частиц космических лучей показатель спектра $\gamma \approx 2,5$.

Электронная компонента космических лучей взаимодействует с электромагнитными полями различного происхождения, давая нетепловое излучение: синхротронное -- при движении по спирали вокруг магнитных силовых линий или обратное комптоновское -- при рассеянии релятивистских электронов на квантах реликтового излучения (см. гл III). При прямом эффекте Комптона кванты рассеиваются на покоящихся электронах, уменьшая свою частоту, а **при обратном эффекте Комптона кванты рассеиваются на релятивистских электронах, увеличивая свою частоту**. Спектр как синхротронного, так и обратного комптоновского излучения имеет показатель равный $\frac{\gamma_e - 1}{2}$, где γ_e -- показатель спектра космических электронов. Отношение средних частот синхротронного излучения $\langle \nu_{\text{син}} \rangle$ и обратного комптоновского излучения $\langle \nu_{\text{ок}} \rangle$ имеет вид

$$\frac{\langle \nu_{\text{ок}} \rangle}{\langle \nu_{\text{син}} \rangle} = 2 \cdot 10^4 \frac{T}{H}, \quad (10.5)$$

где T -- температура реликтового излучения в K , H -- магнитное поле в эрстедах. Отсюда видно, что **синхротронное излучение Галактики попадает в радиодиапазон, а обратное комптоновское в рентгеновский диапазон**. Показатель спектра этих нетепловых излучений одинаков и равен 0,75.

В заключение остановимся на динамике Галактики. **Движение звезд в Галактике происходит вокруг ее центра по незамкнутым траекториям типа розетки (поворачивающийся эллипс): с эксцентриситетом $e < 0,3$ для населения I и $e > 0,5$ для населения II**. Интегральное движение звезд может рассматриваться как дифференциальное вращение Галактики в целом вокруг оси, проходящей через ее полюса. Вращение Галактики происходит по часовой стрелке, если смотреть со стороны ее северного полюса, находящегося в созвездии Волосы Вероники. **Зависимость линейной скорости вращения от расстояния до центра Галактики называется кривой вращения**. Балдж вращается почти с постоянной угловой скоростью $\omega \sim 3 \cdot 10^{-14} \text{ с}^{-1}$, т.е. твердотельно, а внешняя часть диска почти с постоянной линейной скоростью $v \sim 200 \text{ км/с}$.

Солнце находится на расстоянии около 8 кпк от центра Галактики и на расстоянии около 6 пк к северу от плоскости Галактики. В районе Солнца Галактика вращается со скоростью около 250 км/с. Солнце совершает полный оборот вокруг центра Галактики около 200 миллионов лет. Кроме того, Солнце движется со скоростью около 20 км/с относительно ближайших звезд в направлении созвездия Геркулеса.

Точка на небесной сфере, с координатами $\alpha = 270^\circ$, $\delta = +30^\circ$, на которую направлен вектор скорости Солнца называется апексом.

Движение звезд в диске Галактики происходит почти по круговым орбитам. Приравнивая центростремительную силу

$$F_y = \frac{mv^2}{R}, \quad (10.6)$$

где m -- масса звезды, v -- ее линейная скорость вращения, R -- расстояние до центра Галактики, силе тяготения

$$F_g = \frac{GMm}{R^2}, \quad (10.7)$$

где M -- масса Галактики, можно получить следующую формулу, связывающую скорость вращения звезды с ее расстоянием до центра Галактики

$$v^2 = \frac{GM}{R}. \quad (10.8)$$

Для звезд находящихся на краю диска можно считать, что вся масса Галактики сосредоточена в ее центре. Отсюда масса Галактики находящаяся в пределах радиуса R равна

$$M = \frac{v^2 R}{G}. \quad (10.9)$$

Полагая $R = 15 \text{ кпк}$ и $v = 200 \text{ км/с}$, получаем $M = 1,4 \cdot 10^{11} M_\odot$. Из (10.8) при $M = \text{const}$ имеем, что $v \propto R^{-1/2}$. Отсюда **скорости звезд на периферии Галактики должны подчиняется третьему закону Кеплера** согласно формуле (1.13), которая в этом случае принимает вид

$$v^2 R = \text{const}. \quad (10.10)$$

В то время как **из кривой вращения Галактики следует, что на ее периферии скорость вращения звезд почти постоянна.** Это расхождение теории с наблюдениями привело к выводу о наличии на периферии Галактики **некоторой скрытой массы**, которая согласно (10.8) при $v = \text{const}$ линейно растет с расстоянием до центра Галактики.

Если считать, что закон всемирного тяготения справедлив в Галактике, то наличие скрытой массы (иначе называемой темной материей) в гало и короне Галактики неизбежно. Хотя природа темной материи остается неизвестной, обычно ее связывают с ненаблюдаемыми слабо взаимодействующими массивными частицами WIMPs (сокращение от Weakly Interacting Heavy Particles): массивными нейтрино, суперпартнерами или лептокварками (см. § 18).

Спиральная структура Галактики, согласно общепринятой точке зрения, **связана с существованием волн плотности**, имеющих постоянную

угловую скорость в диске, который вращается дифференциально. Механизмы возбуждения и поддержания волн плотности остаются невыясненными. *Солнце находится в т.н. области коротации, где угловая скорость волн плотности совпадает с угловой скоростью вращения диска.* Это возможно имеет далеко идущие последствия для происхождения жизни в Солнечной системе.

§ 11. Внегалактическая астрономия. Нормальные галактики. Галактики с активными ядрами. Квазары

Раздел звездной астрономии, изучающий галактики, т.е. гигантские звездные системы, расположенные вне нашей Галактики, называется внегалактической астрономией.

Изучение галактик начал еще У. Гершель в конце XVIII века. Сначала возникла проблема дифференциации галактик от туманностей. Первый каталог туманных пятен, опубликованный Мессье в 1781 г., содержал как галактики и скопления галактик, так и туманности. Только к концу 20-х годов XX века удалось доказать внегалактическое происхождение некоторых туманностей, разрешив их на отдельные звезды. Например, в туманности Андромеды (M 31 по каталогу Мессье) Хабблом были обнаружены цефеиды (см. §10), по которым удалось оценить расстояние до нее. По современным данным расстояние от Солнца до M 31 составляет 690 кпк, что на порядок превышает размеры Галактики.

Галактики образуют группы, состоящие из десятков объектов, и скопления, насчитывающие до нескольких тысяч галактик (см. § 12). Образование галактик и скоплений галактик будет рассмотрено в главе III. *Наша Галактика входит Местную группу галактик, в которой самыми яркими и массивными являются наша Галактика и галактика Андромеды M 31, имеющие по десятку спутников (карликовых галактик) каждая. Масса M 31 в полтора раза превышает массу нашей Галактики. Кроме того, около десятка карликовых галактик находится на периферии Местной группы. Размер Местной группы галактик около 1 Мпк.*

Согласно морфологической классификации, предложенной Хабблом еще в 1925 г., *галактики делятся на эллиптические E, линзовидные S0, спиральные S и неправильные Ir. Отнесение галактики к тому или иному морфологическому типу зависит от вклада диска, сферической составляющей, присутствия газа и пыли, наличия спиральной структуры и активных ядер.* Для описания галактик широко используется отношение массы к светимости M/L , где M в M_c , а L в L_c .

У эллиптических галактик $\left(\frac{M}{L} = 22; M = 2,0 \cdot 10^{11} M_c\right)$ нет звездного и газо-полевого диска и спиральных ветвей. Они составляют около 25% от общего числа галактик. Эллиптические галактики делятся на подтипы в

зависимости от степени вытянутости от сферических E0 до чечевицеобразных E7. Цифры после E означают величину, равную $10\left(1-\frac{b}{a}\right)$, где a и b -- большая и малая полуоси эллипса соответственно.

У неправильных галактик $\left(\frac{M}{L} = 0,9; M = 1,0 \cdot 10^9 M_c\right)$ нет спиральной структуры, сферической составляющей и активного ядра. Они составляют около 5% от общего числа галактик.

Линзовидные галактики $\left(\frac{M}{L} = 22; M = 2,0 \cdot 10^{11} M_c\right)$ не имеют газополевого диска и спиральной структуры. Они составляют около 20% от общего числа галактик.

У спиральных галактик присутствуют все компоненты: диск, сферическая составляющая, звездный и газополевой диски, спиральная структура и возможно активное ядро. Они составляют около 50% от общего числа галактик. **Примерно половина спиральных галактик имеет бар, т.е. яркую перемычку, проходящую через ядро.** Спиральные галактики делятся на подтипы (Sa, Sb, Sc, S0a, Sab и т.д.) в зависимости от вклада диска, развитости спиральной структуры и наличия бара. Для галактик Sa имеем $\frac{M}{L} = 6,4; M = 1,6 \cdot 10^{11} M_c$, для галактик Sb имеем $\frac{M}{L} = 3,6; M = 1,3 \cdot 10^{11} M_c$ и для галактик Sc имеем $\frac{M}{L} = 1,4; M = 1,6 \cdot 10^{10} M_c$.

Галактики можно расположить в виде последовательности

$$E0 - E1 - E2 - E3 - E4 - E5 - E6 - E7 - S0 - Sa - Sb - Sc - Irr, \quad (11.1)$$

вдоль которой увеличивается удельный момент вращения J/M , уменьшается масса M и отношение M/L .

Момент вращения спиральной галактики

$$J = MVR, \quad (11.2)$$

где V скорость вращения на расстоянии R от ее центра. В случае твердотельного вращения сфероида с постоянной плотностью, например для балджа, легко получить, что $J \sim M^{5/3}$. **Удельный момент вращения нашей Галактики $\frac{J}{M} = 5 \cdot 10^{29} \text{ см}^2 / \text{с}$.**

Наша Галактика относится к типу SBbc, т.е. она **является спиральной** типа, промежуточного между b и c, **и имеет бар.**

Галактики, имеющие неактивные ядра, называются нормальными галактиками. Интегральная светимость нормальных галактик определяется светимостью входящих в них звезд, а не ядра галактики. К нормальным галактикам относятся 99% от общего числа галактик.

Галактики, светимость которых определяется не только светимостью входящих в них звезд, но и светимостью ядра галактики, называются галактиками с активными ядрами. Светимость галактик с

активными ядрами на несколько порядков превышает светимость нормальных галактик.

Галактики с активными ядрами делятся на сейфертовские галактики, радиогалактики и квазары.

Сейфертовские галактики являются спиральными галактиками с яркими ядрами. Излучение сейфертовских галактик, характеризующееся широкими эмиссионными линиями в оптическом диапазоне с ультрафиолетовым избытком, переменное и имеет нетепловой спектр. Ядра сейфертовских галактик являются источниками излучения во всех диапазонах электромагнитного спектра. В оптическом диапазоне мощность излучения порядка 10^{42} эрг/с, в радиодиапазоне мощность доходит до 10^{41} эрг/с, в рентгеновском диапазоне до 10^{45} эрг/с.

Радиогалактики являются эллиптическими галактиками, синхротронное излучение которых в радиодиапазоне на несколько порядков превышает радиоизлучение нормальных галактик. Радиоизлучение и радиогалактик и нормальных галактик связано с наличием во всех галактиках магнитных полей и удерживаемых ими космических лучей, эффекты, связанные с которыми в нашей Галактике, были рассмотрены выше (см. § 10). Радиогалактики имеют двойные радиокомпоненты, симметрично расположенного относительно активного ядра, что объясняется выбросом двух джетов релятивистских электронов из ядра радиогалактики в двух противоположных направлениях. ***Мощность радиоизлучения нашей Галактики составляет $4,4 \cdot 10^{38}$ эрг/с, а мощность излучения мощнейшей радиогалактики 3C 295 составляет $2,7 \cdot 10^{45}$ эрг/с. Для сравнения светимость нашей Галактики в оптическом диапазоне составляет $1,9 \cdot 10^{44}$ эрг/с.***

Наиболее мощными источниками излучения активных ядер во всех электромагнитных диапазонах являются квазары (сокращение от квазизвездные источники радиоизлучения), радиоизлучение которых было отождествлено в 1963 г. М. Шмидтом (США) со звездообразными оптическими объектами, имеющими очень малые угловые размеры (меньше $10''$). Мощность их излучения доходит до 10^{47} эрг/с. Спектр квазаров содержит широкие эмиссионные линии. Излучение переменное и имеет нетепловой спектр. Мощность излучения ядра квазара намного превышает мощность излучения эллиптической галактики, в которой оно находится. ***Квазары имеют большие красные смещения с $z > 4$, отсюда следует, что они находятся на расстояниях, составляющих миллиарды световых лет.***

Природа активных ядер галактик, содержащих компактные звездообразные объекты, по современным представлениям, связана с аккрецией вещества на сверхмассивную вращающуюся черную дыру. По-видимому, ***ядра всех галактик, включая нормальные галактики и нашу Галактику в том числе, содержат массивные черные дыры.*** Отличие нормальных галактик от галактик с активными ядрами связано с массой сверхмассивной черной дыры. Масса черной дыры в ядре нормальной

галактики не превышает $10^6 M_C$, в то время как у квазаров масса черной дыры может доходить до $10^9 M_C$. Переменность (рекуррентность) излучения активных ядер обычно связывается с плазменными неустойчивостями (приводящими к выбросу джетов из ядра) и с неоднородностями вещества аккреционного диска вокруг сверхмассивной черной дыры (см. §9). Эффективность энерговыделения при гравитационном коллапсе на керровскую черную дыру равно 0,42 от массы покоя вещества аккреционного диска. Существует мнение, что **все галактики проходят стадию активного ядра**. Время активной фазы для квазаров не превышает 10^6 лет, для сейфертовских галактик не превышает 10^8 лет, а для радиогалактик не превышает 10^9 лет.

В заключение отметим, что совсем недавно обнаружена корреляция между анизотропией космических лучей сверхвысоких энергий и направлениями на активные ядра галактик, что является прямым подтверждением существования источников космических лучей в других галактиках.

§ 12. Скопления галактик. Крупномасштабная структура

Скопления галактик содержат от 50 до 10000 галактик. Диаметр скоплений составляет от 2 до 10 Мпк. Дисперсия скоростей галактик в скоплении порядка 1000 км/с. Скопления, имеющие почти сферическую форму, называются правильными, а асимметричные -- неправильными. В состав скоплений входят галактики разных типов. Как правило, эллиптические галактики концентрируются к центру скопления, а спиральные находятся на его периферии. Ближайшее к нам крупное скопление, состоящее более чем из 1000 галактик и являющееся неправильным, находится в созвездии Девы (Virgo) на расстоянии около 18 Мпк. Скопление в созвездии Волосы Вероники (Coma), состоящее более чем из 10000 галактик и являющееся правильным, находится на расстоянии 99 Мпк от нашей Галактики. В типичном скоплении только 5% полной массы сосредоточено в галактиках, около 10% составляет межгалактический газ с температурой свыше $10^7 K$, наблюдаемый в рентгеновском диапазоне, остальное приходится на скрытую массу (темную материю).

Скопления галактик образуют сверхскопления, масса которых превышает $10^{15} M_C$. Сверхскопления в свою очередь образуют ячеистую крупномасштабную структуру Вселенной. Размер ячеек, состоящих из скоплений и сверхскоплений, порядка 100 Мпк. Между ячейками находятся пустоты (войды), где практически нет галактик. **На масштабах, превышающих 100 Мпк, Вселенная однородна и изотропна.**

Поведением Вселенной на больших масштабах занимается космология (см. главу III).

Подводя итог всему вышеизложенному, рассмотрим *иерархию масштабов мегамира*. Организация структуры начинается на звездном уровне. Звезды, подобно Солнцу, могут быть окружены планетами. Размеры планет составляют от нескольких километров до сотен тысяч километров, размеры нормальных звезд составляют от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов километров. Размеры компактных астрофизических объектов, являющихся конечной стадией эволюции звезд, составляют от нескольких километров для черных дыр, десятков километров для нейтронных звезд и нескольких десятков тысяч километров для белых карликов. Среднее расстояние между одиночными звездами на периферии галактики составляет около нескольких парсек, а в балдже около нескольких тысячных парсека. Большая часть звезд являются двойными, которые делятся на широкие и тесные пары. В широкой паре расстояние между компонентами превышает миллиарды километров, а в тесной десятки миллионов километров. Часть звезд входит в состав скоплений, размер которых составляет десятки парсек. Среднее расстояние между звездами в шаровых скоплениях меньше одной десятой парсека, а в рассеянных скоплениях на порядок больше. Звезды входят в состав галактик. Диаметр галактики около нескольких десятков парсек. Расстояние между галактиками в группе не более 1 мегапарсека. Группы галактик входят в состав скоплений. Размеры скоплений галактик составляют несколько мегапарсек. Расстояние между скоплениями галактик десятки мегапарсек. Сверхскопления образуют ячеистую крупномасштабную структуру Вселенной с характерным масштабом ячейки порядка 100 мегапарсек. Структур большего масштаба в *наблюдаемой Вселенной, называемой Метагалактикой*, не существует. Это означает, что Метагалактика на таких масштабах однородна и изотропна.

Сводка основных результатов и понятий (§§ 7-12)

1. Астрофизика изучает физические свойства небесных тел.
2. Звезды представляют собой самосветящиеся плазменные (газовые) шары, в которых энергия гравитационного притяжения вещества уравнивается его тепловой энергией, выделяемой в термоядерных реакциях, происходящих в их недрах.
3. Светимостью звезды L называется энергия, излучаемая звездой в единицу времени.
4. Излучение звезд имеет непрерывный спектр, на который наложены линии поглощения или излучения.
5. В основу классификации звезд положена диаграмма Герцшпрунга-Рассела, дающая зависимость светимости звезд от их спектра или температуры.

6. Ядерные реакции синтеза водорода в гелий для звезд, находящихся на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга-Рассела, идут по двум циклам: водородному (p-p) для звезд с массами $M \leq 1,3M_{\odot}$ и углеродному (CNO) для звезд с массами $M > M_{\odot}$.
7. Звезды в основном образуются в облаках молекулярного водорода межзвездной среды.
8. После выгорания водорода оболочка расширяется, а ядро сжимается. Оболочка звезды сбрасывается либо медленно (за $10^6 - 10^9$ лет), превращаясь в красный гигант, либо быстро (за 10^2 суток), взрываясь как сверхновая. Ядро превращается в компактный астрофизический объект, т.е. белый карлик, нейтронную звезду или черную дыру.
9. Белые карлики и нейтронные звезды представляют собой компактные астрофизические объекты, в которых гидростатическое равновесие обеспечивается давлением вырожденного фермионного газа. В случае белых карликов это давление электронного газа, а для нейтронных звезд – нейтронного.
10. При массе ядра звезды превышающей $2,5M_{\odot}$ гидростатическое равновесие невозможно, и происходит гравитационный коллапс, т.е. образуются черные дыры - точечные сингулярные объекты с горизонтом событий, описываемые метрикой Шварцшильда.
11. Вращающиеся нейтронные звезды с магнитным полем наблюдаются в виде пульсаров, т.е. объектов, радиоизлучение которых испытывает пульсации с периодом от нескольких микросекунд до тысяч секунд.

12. В тесных двойных системах происходит образование вращающихся аккреционных дисков за счет перетекания вещества с нормальной звезды на компактный объект.
13. Горизонт черной дыры излучает как абсолютно черное тело с температурой Хокинга. Этот эффект называется эффектом Хокинга испарения черных дыр.
14. Звездная астрономия изучает свойства звездных систем: скоплений звезд, галактик и в том числе нашей Галактики, а также скоплений галактик.
15. Звездная система, в которой находится Солнце (включая Солнечную систему и Землю), называется Галактикой или галактикой Млечный Путь.
16. Ближайшая к Солнцу звезда «Проксима Центавра» находится от нас на расстоянии 1,3 пк.
17. Общее число звезд в Галактике составляет около 200

миллиардов.

18. Галактика состоит из плоской составляющей Галактики, т.е. диска, диаметром около 30 кпк и толщиной порядка 100 пк и сферической составляющей, т.е. гало, внешняя часть которого называется короной, диаметром до 50 кпк.
19. В Галактике имеется межзвездная среда, состоящая из газа и пыли, а также магнитные поля и удерживаемые ими космические лучи.
20. Звездные скопления делятся на два типа: рассеянные -- с числом звезд до 10^4 и шаровые -- с числом звезд более 10^5 .
21. Из межзвездной среды в результате джинсовской неустойчивости образуются звезды.
22. Межзвездная среда, составляющая несколько процентов видимого вещества Галактики, состоит из газа и пыли. Межзвездный водород может находиться в трех состояниях: атомарный водород H I, ионизованный водород H II и молекулярный водород H_2 .
23. Излучение с длиной волны 21 см обусловлено переходом между подуровнями сверхтонкой структуры атома водорода.
24. Величина магнитного поля Галактике в диске составляет около $10^{-6} - 10^{-5}$ э.
25. Космические лучи изотропны и состоят в основном из протонов с энергиями от 10^6 до 10^{20} эВ. Энергетический спектр космических лучей является степенным.
26. Электронная компонента космических лучей взаимодействует с электромагнитными полями различного происхождения, давая нетепловое излучение.
27. Движение звезд в Галактике происходит вокруг ее центра по незамкнутым траекториям типа розетки (поворачивающийся эллипс).
28. Зависимость линейной скорости вращения от расстояния до центра Галактики называется кривой вращения.
29. Солнце совершает полный оборот вокруг центра Галактики около 200 миллионов лет. Кроме того, Солнце движется со скоростью около 20 км/с относительно ближайших звезд.
30. Если считать, что закон всемирного тяготения справедлив в Галактике, то наличие скрытой массы (иначе называемой темной материей) в гало и короне Галактики неизбежно.
31. Спиральная структура Галактики связана с существованием волн плотности.
32. Раздел звездной астрономии, изучающий галактики, т.е. гигантские звездные системы, расположенные вне нашей

- Галактики, называется внегалактической астрономией.
33. Галактики образуют группы, состоящие из десятков объектов, и скопления, насчитывающие до нескольких тысяч галактик.
 34. Наша Галактика входит Местную группу галактик, в которой самыми яркими и массивными являются наша Галактика и галактика Андромеды.
 35. Согласно морфологической классификации, предложенной Хабблом, галактики делятся на эллиптические E, линзовидные S0, спиральные S и неправильные Ir.
 36. Галактики, имеющие неактивные ядра, называются нормальными.
 37. Галактики с активными ядрами делятся на сейфертовские галактики, радиогалактики и квазары.
 38. Природа активных ядер галактик связана с аккрецией вещества на сверхмассивную вращающуюся черную дыру.
 39. Скопления галактик образуют сверхскопления, которые в свою очередь образуют ячеистую крупномасштабную структуру Вселенной.
 40. На масштабах, превышающих 100 Мпк, Вселенная однородна и изотропна.

Контрольные вопросы и задачи к §§ 7-12

1. Что такое солнечная постоянная и чему она равна?
2. Чему равен эддингтоновский предел для светимости звезд?
3. Как связана светимость звезды с ее массой?
4. Какие продукты реакций образуются в результате углеродного и водородного циклов?
5. Как и из чего образуются звезды?
6. Что такое нестационарные звезды?
7. Как связаны плотности нейтронной звезды и белого карлика?
8. Что такое аккреция?
9. Какие квантовые эффекты связаны с компактными астрофизическими объектами?
10. Как вращается наша Галактика?
11. Что такое скрытая масса или темная материя?
12. Что такое звездные населения в Галактике?

13. С чем связана высокая светимость мазерных конденсаций в Галактике?
14. Каковы источники космических лучей в Галактике?
15. Что такое синхротронное излучение и обратный эффект Комптона и как они наблюдаются?
16. Что такое удельный момент вращения галактики и чему он равен у нашей Галактики?
17. Что такое квазары?
18. Какова иерархия масштабов мегамира?

Задача 1

Найти температуру фотосферы звезды с массой равной $100M_C$ и радиусом равным $100R_C$, если ее светимость равна эддингтоновскому пределу.

Решение

Из формулы (7.16) получаем

$$\frac{T}{T_C} = \left(\frac{LR_c^2}{L_C R^2} \right)^{1/4}. \quad (1)$$

Приравняв светимость L в (1) выражению для эддингтоновского предела (7.11)

$$L_{Edd} = 10^{31} \frac{M}{M_C} Bm, \quad (2)$$

получаем

$$\frac{T}{T_C} = \left(\frac{10^{31} M L_c^2}{M_C L_C R^2} \right)^{1/4}. \quad (3)$$

Подставляя в (3) выражения $\frac{M}{M_C} = \frac{R}{R_C} = 100$, $L_C = 3,84 \cdot 10^{26} Bm$, $T_C = 6000K$, находим $T = 24000K$.

Задача 2

Пусть в результате сжатия облака H_2 межзвездной среды с $n = 10^3 \text{ см}^{-3}$ и $T = 10K$ образуется шаровое скопление из 10^5 звезд. Найти плотность массы в центре одной из звезд скопления, если известна температура диссоциации молекулярного водорода $T = 51968K$ и масса атома водорода $m_H = 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ г}$.

Решение

При изотермическом сжатии облако происходит его фрагментация. Дальнейшее сжатие происходит по адиабатическому закону. Масса Джинса дается формулой (8.6)

$$M_J \sim \sqrt{\frac{T^3}{\rho}}, \quad (1)$$

где плотность массы

$$\rho = nm_H. \quad (2)$$

Фрагментация происходит при изотермическом сжатии до плотности числа частиц n_2 . Из формулы (1) при $T = 10K$ получаем

$$\frac{M_J^{(1)}}{M_J^2} = \sqrt{\frac{n_2}{n_1}}. \quad (3)$$

Отсюда получаем

$$n_2 = \left[\frac{M_J^{(1)}}{M_J^{(2)}} \right]^2 n_1. \quad (4)$$

Далее происходит адиабатическое сжатие молекулярного водорода до плотности числа частиц n'_2 и температуры диссоциации $T_2 = 51968K$ по закону

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{n_2}{n'_2} \right)^{\gamma_{12}-1}, \quad (5)$$

где показатель адиабаты для двухатомного газа $\gamma_{12} = \frac{7}{5}$. Из (5) имеем

$$n'_2 = n_2 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\gamma_{12}-1}}. \quad (6)$$

Атомарный водород III адиабатически сжимается до плотности числа частиц n_3 и температуры горения водорода $T_3 = 10^7 K$ в центре звезды по закону

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{n'_2}{n_3} \right)^{\gamma_{23}-1}, \quad (7)$$

где показатель адиабаты для одноатомного газа $\gamma_{23} = \frac{5}{3}$. Из (7) имеем

$$n_3 = n'_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{1}{\gamma_{23}-1}}. \quad (8)$$

Из формул (2), (4), (6) и (8) получаем формулу для искомой плотности массы

$$\rho_3 = m_H \left[\frac{M_J^{(1)}}{M_J^{(2)}} \right]^2 n_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\gamma_{12}-1}} \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{1}{\gamma_{23}-1}}. \quad (9)$$

Подставляя в эту формулу значения массы атома водорода, плотности числа частиц облака, температур облака, диссоциации молекулярного водорода, горения водорода в центре звезды и принимая число фрагментаций облака

равным отношению массы облака и массы протозвезды, окончательно получаем $\rho_3 = 86,8 \text{ гсм}^{-3}$.

Задача 3

Найти отношение плотностей нейтронной звезды и белого карлика.

Решение

Используем формулу (9.3) для плотности вырожденных фермионов

$$n = \frac{8\pi m^3 c^3}{3h^3}, \quad (1)$$

а с другой стороны (9.6)

$$n = \frac{\rho}{\mu m_H}. \quad (2)$$

Приравнивая (1) и (2), получаем

$$\frac{\rho}{\mu m_H} = \frac{8\pi m^3 c^3}{3h^3}. \quad (3)$$

Подставляя в (3) $\rho = \rho_{нз}$, $\mu = 1$ и $m = m_n$, получаем для нейтронной звезды

$$\frac{\rho_{нз}}{m_H} = \frac{8\pi m_n^3 c^3}{3h^3}. \quad (4)$$

Аналогично для белого карлика при $\mu = 2$ получаем

$$\frac{\rho_{бк}}{2m_H} = \frac{8\pi m_e^3 c^3}{3h^3}. \quad (5)$$

Деля (5) на (4) получаем искомую формулу (9.7)

$$\frac{\rho_{н.з.}}{\rho_{б.к.}} = \frac{1}{2} \left(\frac{m_n}{m_e} \right)^3, \quad (6)$$

где $m_n = 1839m_e$. Отсюда $\frac{\rho_{нз}}{\rho_{бк}} = 3,11 \cdot 10^9$.

Задача 4

Найти отношение радиусов белого карлика и нейтронной звезды.

Решение

Используем общую формулу для массы звезды, выраженную через ее радиус R и плотность ρ ,

$$M = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho \quad (1)$$

и формулу для вырожденной звезды (белого карлика или нейтронной звезды)

$$M = \frac{5,75M_C}{\mu^2}, \quad (2)$$

где $\mu = 1$ для нейтронной звезды и $\mu = 2$ для белого карлика. Приравнявая (1) и (2) и деля полученную формулу для белого карлика на формулу для нейтронной звезды, получаем

$$\frac{1}{4} = \frac{\rho_{\text{б.к.}} R_{\text{б.к.}}^3}{\rho_{\text{нз}} R_{\text{нз}}^3}. \quad (3)$$

Подставляя (9.7) в (3), получаем искомую формулу (9.8)

$$\frac{R_{\text{б.к.}}}{R_{\text{нз.}}} = \frac{m_n}{2m_e}, \quad (4)$$

где $m_n = 1839m_e$. Отсюда $\frac{R_{\text{б.к.}}}{R_{\text{нз.}}} = 919,5$.

Задача 5

Найти зависимость удельного момента твердотельного вращения галактики от ее массы.

Решение

Момент вращения галактики дается формулой (11.2)

$$J = MVR. \quad (1)$$

В случае твердотельного вращения

$$V = \omega R, \quad (2)$$

где угловая скорость $\omega = \text{const}$. Подставляя (2) в формулу (10.8)

$$V^2 = \frac{GM}{R} \quad (3)$$

получаем

$$R = \left(\frac{GM}{\omega^2} \right)^{1/3}. \quad (4)$$

Удельный момент вращения равен

$$j = \frac{J}{M}. \quad (5)$$

Из формул (1), (2) и (5) получаем

$$j = \omega R^2. \quad (6)$$

Подставляя (4) в (6), получаем

$$j = \frac{G^{2/3} M^{2/3}}{\omega^{1/3}}. \quad (7)$$

Задача 6

Найти гравитационные радиусы и средние плотности черных дыр с массами $M = 10M_c$ (звездная масса), $M = 10^6 M_c$ (ядро нормальной галактики) и $M = 10^9 M_c$ (активное ядро квазара).

Решение

Гравитационный радиус дается формулой (5.2)

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}. \quad (1)$$

Средняя плотность черной дыры

$$\rho = \frac{3M}{4\pi r_g^3}. \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), получаем

$$\rho = \frac{3c^6}{32\pi G^3 M^2}. \quad (3)$$

Для $M = 10M_c$ имеем $r_g = 29,7 \text{ км}$ и $\rho = 1,83 \cdot 10^{16} \text{ гсм}^{-3}$. Для $M = 10^6 M_c$ имеем $r_g = 2,97 \cdot 10^6 \text{ км}$ и $\rho = 1,83 \cdot 10^6 \text{ гсм}^{-3}$. Для $M = 10^9 M_c$ имеем $r_g = 2,97 \cdot 10^9 \text{ км}$ и $\rho = 1,83 \text{ гсм}^{-3}$.