

УДК: 524.387—423

ЮПИТЕРЫ ВОКРУГ МЕРТВЫХ ЗВЕЗД И ОБРАЗОВАНИЕ ОДИНОЧНЫХ ПОДКРУЧЕННЫХ РАДИОПУЛЬСАРОВ

Г. С. БИСНОВАТЫЙ-КОГАН

Поступила 6 апреля 1990

Рассчитана эволюция тесной двойной, состоящей из белого карлика, нейтронной звезды или черной дыры в паре с вырожденным карликом малой массы на стадии перетекания вещества вплоть до превращения карлика в гигантскую планету.

Рассмотрено «вынужденное испарение» карлика из двойной системы в шаровом скоплении, ведущее к образованию одиночных миллисекундных пульсаров.

1. *Введение.* Эволюционная судьба маломассивных тесных двойных привлекает внимание в связи с изучением катаклизмических переменных (КП) и рентгеновских барстеров (РБ). В обоих случаях наблюдается мертвая звезда: белый карлик (КП) или нейтронная звезда (РБ), в паре с маломассивным карликом. Свечение и нестационарные явления в этих объектах связаны с перетеканием вещества карлика на более массивную мертвую звезду. В работах [1, 2] отмечалось, что перетекание в РБ должно закончиться или резко ослабиться после того, как вещество карлика станет неидеальным и он превратится в гигантскую планету типа Юпитера. В [3] рассматривалась эволюция белого карлика в тесной паре с черной дырой при перетекании вещества на черную дыру в связи с моделью уникального гамма-источника Гелинга. Здесь также образование планеты типа Юпитера является естественным концом эволюции.

В настоящей работе рассчитаны последние стадии эволюции тесных маломассивных систем в результате излучения гравитационных волн и перетекания вещества. Используется уравнение состояния вещества карлика [4], дающее плавный переход от идеального газа к неидеальной жидкости. Пренебрегается влиянием температурных эффектов на строение карликовой звезды. Это приближение хорошо применимо для белых карликов вокруг нейтронных звезд или черных дыр с $\mu_e = \langle A/Z \rangle = 2$, прошедших ядерную эволюцию [3, 5, 6]. Для катаклизмических переменных с нор-

мальным химическим составом карликов данное приближение дает приемлемую точность только на поздних стадиях при $M_d \leq 0.025 M_\odot$. Согласно расчетам [7], для систем с полной массой $\geq 0.6 M_\odot$ масса карлика $M_d = 0.025 M_\odot$ достигается за время $\sim 9 \cdot 10^8$ лет. Для КП расчеты, аналогичные данным, проводились в работе [8].

В конце данной работы исследована судьба пары с планетой в шаровом скоплении. Показано, что в плотных ядрах шаровых скоплений возможно разрушение пары в результате «вынужденного испарения» карлика и образование одиночного миллисекундного пульсара.

2. *Эволюция.* Рассмотрим тесную двойную систему, в которой карлик заполняет свою полость Роша, так что его радиус R_d связан с расстоянием между центрами звезд R_{12} , соотношением [9]:

$$R_d = R_{12} \frac{2}{3^{1/3}} \left(\frac{M_d}{M} \right)^{1/3}, \quad M = M_d + M_1, \quad (1)$$

где M_1 — масса главного компаньона. Период обращения по закону Кеплера равен

$$P = \frac{2\pi R_{12}^{3/2}}{(GM)^{1/2}} = \frac{9\pi R_d^{3/2}}{\sqrt{2GM_d}}. \quad (2)$$

Модели холодных карликов произвольной массы, вплоть до планет-гигантов, состоящих из неидеального вещества, рассчитаны в [4]. В этих расчетах, использующих уравнение состояния [10], получены кривые $R_d(M_d)$ для различных составов, которые могут быть аппроксимированы следующими полиномиальными зависимостями:

$$R_{dH} = 2.0887 - 3.2586 x - 3.1690 x^2 - 2.7600 x^3 - \quad (3)$$

$$- 0.9272 x^4 - 0.09859 x^5, \quad \text{при } -4 \leq x \leq 0$$

$$R_{dHe} = 0.5964 - 1.0936 x + 0.6331 x^2 + 1.4622 x^3 + \quad (4)$$

$$+ 1.1117 x^4 + 0.3363 x^5 + 0.03446 x^6, \quad \text{при } -4 < x \leq -0.134$$

$$R_{dC} = 0.5428 - 1.5914 x - 1.4737 x^2 - 1.6406 x^3 - \quad (5)$$

$$- 0.8274 x^4 - 0.1810 x^5 - 0.01457 x^6, \quad \text{при } -4 \leq x \leq -0.1415$$

$$R_{dMg} = 0.5389 - 1.4231 x - 0.9579 x^2 - 0.8469 x^3 - \quad (6)$$

$$- 0.3950 x^4 - 0.08001 x^5 - 0.005909 x^6, \quad \text{при } -4 < x \leq -0.15$$

$$R_{dFe} = 0.4126 - 1.1810 x - 0.3378 x^2 + 0.2262 x^3 + \\ + 0.2756 x^4 + 0.09563 x^5 + 0.01057 x^6, \text{ при } -4 \leq x \leq -0.24. \quad (7)$$

Здесь радиус карлика R_d дан в 10^9 см, $x = \lg(M_d/M_\odot)$, индексы Fe, Mg, C, He, H относятся, соответственно, к железу ^{56}Fe , магнию ^{24}Mg , углероду ^{12}C , гелию ^4He и смеси 75% водорода H и 25% гелия ^4He , соответственно.

Если пренебречь собственным моментом вращения звезд, то для орбитального момента имеем:

$$I = M_d M_1 (GR_{12}/M)^{1/2}. \quad (8)$$

Скорость потери момента за счет гравитационного излучения есть [11]

$$\frac{|\dot{I}|}{I} = - \frac{32 G^3}{5 c^5 R_{12}^4} M M_d M_1. \quad (9)$$

Из (1), (8), (9) получаем уравнение для изменения M_d со временем:

$$\dot{m} = \frac{dm_d}{dt} = -D \frac{m^{2/3} m_d^{10/3} (1 - m_d/m)^2}{R_{d9}^4 \left[\frac{5}{6} + \frac{1}{2} M_d \frac{R_{d9}}{R_{d9}} - \left(\frac{11}{6} + \frac{1}{2} M_d \frac{R_{d9}}{R_{d9}} \right) \frac{m_d}{m} \right]}. \quad (10)$$

Здесь функция для $R_{d9}(M_d)$ задается в (3) – (7), ($R_{d9} = R_d/10^9$ см) \dot{m}/m означает дифференцирование по M_d ; $m_d = M_d/M_\odot$, $m = M/M_\odot$.

$$D = \frac{2^9 G^3 M_\odot^3}{5 \cdot 3^{16/3} c^5 10^{36}} = 2.815 \cdot 10^{-11} M_\odot/\text{с}.$$

Для белых карликов в интервале масс (0.2 + 0.7) M_\odot с

$$R_{d9} = 0.76 m_d^{-1/3} \left(\frac{2}{\mu_*} \right)^{5/3}, \quad M_d \frac{R_{d9}}{R_{d9}} = -1/3 \quad (11)$$

при $\mu_* = 2$ (10) переходит в уравнение, полученное в [3].

Уравнение (10) численно интегрировалось при начальных условиях

$$m_{d0} = 0.1 \text{ для } x_{\text{H}} = 0.75, x_{\text{He}} = 0.25; \\ m_{d0} = 0.3 \text{ для } ^4\text{He}, ^{12}\text{C}, ^{24}\text{Mg}, ^{56}\text{Fe} \quad (12)$$

при $t = 0$.

При интегрировании (10) использовалась формула Гаусса с 40 узлами [12].

3. *Результаты расчетов* представлены в таблицах 1—5. Как видно из (2), период двойной системы в условиях заполнения карликом своей полости Роша не зависит от массы компаньона. Начальные массы главных звезд принимались равными $M_{10} = 0.8 M_{\odot}$, $1.4 M_{\odot}$ и $5 M_{\odot}$ для карликов с $x_H = 0.75$ и $M_{10} = 1.4 M_{\odot}$ и $5 M_{\odot}$ для остальных составов. Данные значения M_{10} соответствуют белому карлику, нейтронной звезде и черной дыре, соответственно.

В первых трех столбцах таблиц приведены период двойной системы в секундах (PER), масса карлика в M_{\odot} (MASS) и его радиус в 10^9 см (RADIUS). В последующих столбцах для каждой массы главной звезды приведены значения скорости перетекания в $M_{\odot}/\text{год}$ (DMD Г), время эволюции в годах (TIME) и расстояние между центрами звезд в 10^9 см (R12).

Применяя полученные результаты для рентгеновского источника 4U 1820—30, имеющего период двойной системы $P = 685$ с, получаем значения масс вырожденных карликов

$m_d = 0.050; 0.049; 0.041; 0.026$ для ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{56}\text{Fe}$, соответственно.

Значения массы (13) для ${}^4\text{He}$ на $\sim 15\%$ ниже, чем в [6] для холодной звезды, где использовалась аппроксимация $R_d(M_d)$, отличающаяся от (4).

Как следует из табл. 1, за время порядка космологического $\tau_c = 2 \cdot 10^{10}$ лет, масса карлика с нормальным составом в маломассивной рентгеновской двойной (ММРД) достигнет $\sim 10^{-2} M_{\odot}$. В ММРД второго поколения [13] с проэволюционировавшим компаньоном — белым карликом, состоящим из более тяжелых элементов, массы карликов за время τ_c достигнут примерных значений $0.003 M_{\odot}$; $0.0025 M_{\odot}$; $0.002 M_{\odot}$; $0.0012 M_{\odot}$ для ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{24}\text{Mg}$ и ${}^{56}\text{Fe}$, соответственно.

Периоды двойных систем при этом составляют ~ 2.5 часа для нормального состава и $1.7 \div 1.2$ часа для звезд остальных химических составов.

4. *Вынужденное испарение.* Механизм образования одиночных миллисекундных пульсаров до сих пор не до конца ясен. Часть их образуется за счет испарения компаньона пульсарным излучением [14], (процесс, наблюдаемый в затменных радиопульсарах [15]). Однако, факт вхождения почти всех миллисекундных (подкрученных) радиопульсаров в шаровые скопления указывают на то, что основным механизмом их образования является, видимо, разрыв пары при столкновениях со звездами поля [13].

При попытках количественного объяснения разрыва пары за счет сближений со звездами поля в шаровых скоплениях возникают существен-

ные трудности. На основе численных расчетов в [16] получено, что одиночные нейтронные звезды могли образоваться за счет звездных сближений только из пар с орбитальными периодами не менее 10—100 дней. В то же время наблюдения и теоретические оценки [13, 16] указывают на то, что подкрученные радиопульсары образовались из гораздо более тесных пар. Выход из положения может дать механизм вынужденного испарения, рассмотренный ниже.

Как следует из теории [17, 18] и численных экспериментов [19], столкновения звезд с достаточно тесными парами в среднем ведут к отбору энергии у пар и к нагреву звезд поля. Этот результат легко интерпретировать, если принять, что процесс столкновения звезд определяется только их скоростями и не зависит от вхождения одной из звезд в пару. Процессы релаксации ведут к выравниванию кинетической энергии звезд, то есть, звезда с большей кинетической энергией в среднем теряет ее. Для одиночных звезд это вело бы к выравниванию кинетических энергий, но для звезд в тесных парах результат получается противоположный. Звезда быстро вращается по орбите в тесной паре, передает свою кинетическую энергию более медленной звезде поля при столкновении, но сама при этом ускоряется на орбите еще больше в силу справедливости теоремы вирнала в применении к двойной системе. Звездная пара в равновесии (как и звездная система в целом) обладает отрицательной теплоемкостью, так что потеря энергии парой приводит к увеличению скоростей входящих в нее звезд.

Из сказанного выше очевидно, что если скорость звезды пары меньше, чем средняя скорость звезд поля, то звезда в паре в среднем приобретает энергию. Это ведет к разрушению пары за время, порядка времени релаксации шарового скопления, которое во многих случаях меньше космологического.

Пусть карлик в паре с нейтронной звездой заполняет свою полость Роша. Тогда орбитальная скорость карлика с учетом (1), (2) равна

$$v_d = \frac{2\pi R_{12}}{P} \frac{M_d}{M} \approx \frac{\sqrt{2}}{3^{2/3}} \left(\frac{GM^{2/3} M_d^{1/3}}{R_d} \right)^{1/2} \text{ при } M_d \ll M. \quad (14)$$

В скоплении со средней скоростью звезд $\langle v_{cl}^2 \rangle^{1/2}$ и средней массой $\langle M_{cl} \rangle$ разрушение пары произойдет быстро, за время порядка времени релаксации, если $\langle M_{cl} \rangle \langle v_{cl}^2 \rangle > M_d v_d^2$, то есть

$$\frac{M_d^{4/3}}{R_d} < \frac{3^{4/3}}{2} \frac{\langle v_{cl}^2 \rangle \langle M_{cl} \rangle}{GM^{2/3}}. \quad (15)$$

Для скоплений 47 Tuc и ω Cen с $\langle v_{cl}^2 \rangle^{1/2} = 10.3$ км/с и 16.8 км/с; $\langle M_{cl} \rangle = 0.67 M_\odot$ и $0.51 M_\odot$, соответственно.

Из (15) получаем

$$\frac{m_d^{4/3}}{R_{d9}} < 1.62 \cdot 10^{-5} \frac{m_{cl} v_{c6}^2}{m^{2/3}}, \quad (16)$$

где

$$m_{cl} = \frac{\langle M_{cl} \rangle}{M_{\odot}}, \quad v_{c6} = \frac{\langle v_{cl}^2 \rangle^{1/2}}{10^6 \text{ см/с}}. \quad (17)$$

Используя приблизительную связь (11), получаем условие быстрого разрушения пары в виде

$$m_d < 1.13 \cdot 10^{-3} \frac{m_{cl}^{0.6} v_{c6}^{1.2}}{m^{0.4}} \left(\frac{2}{\mu_*} \right). \quad (18)$$

Для скоплений 47 Tuc и ω Cen получаем $m_d < 6.3 \cdot 10^{-4} \left(\frac{2}{\mu_*} \right)$ и $m_d < 9.3 \cdot 10^{-4} \left(\frac{2}{\mu_*} \right)$, соответственно. Эти значения масс примерно в 3 раза меньше масс карликов, достигаемых в парах при перетекании, вызванном гравитационным излучением для $\mu_* = 2$ (табл. 2—5) и в ~ 6 раз меньше для карликов нормального состава (табл. 1).

Если в двойной системе карлик, заполняющий свою полость Роша сталкивается с медленными звездами поля, то такие столкновения приводят не к сближению звезд в паре, а к усилению перетекания вещества, и в итоге к увеличению R_{12} . Действие столкновений здесь аналогично действию гравитационного излучения, но может приводить к более быстрой эволюции и в итоге — к более быстрому разрыву пары в достаточно плотном скоплении. Процесс разрыва пары, происходящей в результате процессов, сопровождающих взаимодействие пары со звездами скопления, назовем «вынужденным испарением» карлика из звездной пары.

Для количественных оценок используем время релаксации импульса τ_s звезды (карлика) в скоплении [20, 21]:

$$\begin{aligned} \tau_s &\approx \frac{\sqrt{M_d}}{\pi \sqrt{2} G^2 M_d^2 \langle M_{cl} \rangle^2} \left(\frac{M_d v_d^2}{2} \right)^{3/2} \frac{1}{\lambda n_{cl}} = \\ &= \frac{v_d^3}{4\pi G^2 \langle M_{cl} \rangle^2 \lambda n_{cl}}, \end{aligned} \quad (19)$$

n_{cl} — плотность числа звезд в скоплении.

Для карлика в двойной системе, используя (14), (11), получаем

$$\begin{aligned} \tau_s &= \frac{1}{9\pi\sqrt{2}} \frac{M M_d^{1/2} (\mu_e/2)^{5/2}}{G^{1/2} R_d^{3/2} \langle M_{cl} \rangle^2 \lambda n_{cl}} = \\ &= \frac{M M_d (\mu_e/2)^{5/2}}{9\pi\sqrt{2} \cdot (7.6 \cdot 10^8)^{3/2} \sqrt{G} M_\odot \langle M_{cl} \rangle^2 \lambda n_{cl}} = \\ &= 1.03 \cdot 10^{22} \frac{m m_d}{m_{cl}^2 n_{s1}} \left(\frac{\mu_e}{2} \right)^{5/2} \text{ с.} \end{aligned} \quad (20)$$

Здесь принято $\lambda = 10$, $n_{s1} = n_{cl} / 10^{-51} \text{ см}^{-3}$. Использование минимального из времен релаксации связано с тем, что карлик «сильно» связан с компаньоном и избыток импульса может переходить в движение центра масс пары. Характерное время потери углового момента за счет гравитационного излучения определяется из (9), (1), (11)

$$\begin{aligned} \tau_{gr} &\approx \frac{5c^5 R_{12}^4}{32 G^3 M^2 M_d} = \frac{5 \cdot 3^{16/3} c^5}{2^9 G^3} \frac{R_d^4}{M^{2/3} M_d^{7/3}} = \\ &= \frac{5 \cdot 3^{16/3} c^5 (7.6 \cdot 10^8)^4 M_\odot^{4/3} (2/\mu_e)^{20/3}}{2^9 G^3 M^{2/3} M_d^{11/3}} = \\ &= \frac{1.16 \cdot 10^{10}}{m^{2/3} m_d^{11/3}} \left(\frac{2}{\mu_e} \right)^{20/3} \text{ с.} \end{aligned} \quad (21)$$

Отношение двух времен

$$\begin{aligned} \tau_{gr}/\tau_s &= \frac{5 \cdot 3^{16/3}}{2^9} 9\pi\sqrt{2} \frac{c^5 R_d^{11/2} \langle M_{cl} \rangle^2 \lambda n_{cl}}{G^{5/2} M^{5/3} M_d^{17/6}} \left(\frac{2}{\mu_e} \right)^{55/6} = \\ &= 1 \cdot 1 \cdot 10^{-12} \frac{m_{cl}^2 n_{s1}}{m^{5/3} m_d^{14/3}} \left(\frac{2}{\mu_e} \right)^{55/6} \end{aligned} \quad (22)$$

равно единице при

$$m_{d1} = 2.7 \cdot 10^{-3} \frac{m_{cl}^{3/7} n_{s1}^{3/14}}{m^{5/4}} \left(\frac{2}{\mu_e} \right)^{55/28} \quad (23)$$

В тех же предположениях за космологическое время под действием одного только гравитационного излучения масса карлика достигнет величины [13]:

$$m_{dc} = 4.5 \cdot 10^{-3} m^{-2/11} (2/\mu_e)^{20/11} \quad (24)$$

Если $m_{d1} > m_{dc}$, то столкновения важнее гравитационного излучения и ведут к разрушению системы за счет «вынужденного испарения». Отметим, что согласно (20) эволюция пары при этом идет в ускоряющемся темпе ($\tau_e \sim m_d$). Если $m_{d1} < m_{dc}$, то столкновения не успевают сыграть какую-то роль за космологическое время и испарение не происходит. Очевидно, что для плотных скоплений условие (23) достигается раньше, чем (18), и вынужденное испарение предшествует возможному прямому разрушению пары.

Для того, чтобы выполнялось неравенство $m_{d1} > m_{dc}$ требуется выполнение условия

$$\frac{m_{cl}^{3/7} n_{51}^{3/14}}{m^{27/154}} \left(\frac{2}{\mu_e} \right)^{45.308} > 1.7 \quad (25)$$

или

$$n_{51} > 11 \left(\frac{\mu_e}{2} \right)^{15/22} \frac{m^{9/11}}{m_{cl}^2}, \quad (26)$$

$$n > 3 \cdot 10^5 \left(\frac{\mu_e}{2} \right)^{15/22} \frac{m^{9/11}}{m_{cl}^2} \text{ пк}^{-3}.$$

Из (26) следует, что для карликов нормального состава $\mu_e = 1.14$ условия вынужденного испарения менее жесткие, чем при $\mu_e = 2$, поэтому образование миллисекундных пульсаров более вероятно из ММРД первого поколения, чем второго [13]. Плотность звезд в шаровом скоплении, требуемая для разрыва пары (26) соответствует центральной плотности в наиболее плотных шаровых скоплениях. Характерным является скопление М 15 с плотностью звезд $1.8 \cdot 10^5 \text{ пк}^{-3}$, в котором наблюдаются два подкрученных пульсара. В то же время скопление М 28 выглядит недостаточно плотным. Данные по шаровым скоплениям могут еще уточняться, возможно также влияние скрытой массы.

5. Заключение. Рассмотренный в работе процесс вынужденного испарения совместно с гравитационным излучением может быть причиной отрыва карлика от нейтронной звезды и образования одиночного подкрученного радиопульсара в плотных ядрах шаровых скоплений. В менее плотных скоплениях двойственность сохраняется и результатом эволюции ММРД является система с гигантской планетой вокруг нейтронной звезды с периодом обращения 1.5—2.5 часа.

JUPITERS AROUND DEAD STARS AND FORMATION OF
SINGLE RECYCLED RADIO PULSARS

G. S. BISNOVATYI-KOGAN

The evolution of close binary is calculated which consists of a white dwarf, neutron star or a black hole together with a low mass degenerate dwarf on the stage of mass transfer up to transformation of the dwarf into a giant planet. The „enhanced evaporation“ of the dwarf from the binary is considered for globular clusters leading to formation of a single millisecond pulsar.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Бисноватый-Коган, М. М. Романова, *Астрон. ж.*, 60, 900, 1983.
2. M. Ruderman, J. Shaham, *Nature*, 304, 425, 1983.
3. Г. С. Бисноватый-Коган, *Астрофизика*, 22, 369, 1985.
4. H. Zepolsky, E. E. Salpeter, *Astrophys. J.*, 158, 809, 1969.
5. L. Stella, W. C. Priedhorsky, N. E. White, *Astrophys. J. Lett.*, 312, L17, 1987.
6. S. Rappaport, L.A. Nelson, C. P. Ma, P. C. Joss, *Astrophys. J.*, 322, 842, 1987.
7. B. Paczynski, R. Stenkiewicz, *Astrophys. J. Lett.*, 248, L27, 1981.
8. S. C. Vila, *Astrophys. J.*, 163, 217, 1971.
9. B. Paczynski, *Acta Astronomica*, 31, 1, 1981.
10. E. E. Salpeter, H. Zepolsky, *Phys. Rev.*, 158, 476, 1967.
11. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теория поля*, Наука, М., 1967.
12. М. Абрамович, И. Стиган, *Справочник по специальным функциям*, М., Наука, ФМ, 1979.
13. Г. С. Бисноватый-Коган, *Астрофизика*, 31, 567, 1989; 32, № 1, 1990.
14. W. Kluzniak, M. Ruderman, J. Shaham, M. Taviani, *Nature*, 334, 225, 1983.
15. A. Fruchter, D. Stinebring, J. H. Taylor, *Nature*, 333, 237, 1988.
16. S. Rappaport, A. Patney, F. Verbunt, *Astrophys. J.*, 345, 210, 1989.
17. Л. Э. Гуревич, Б. Ю. Левин, *Астрон. ж.*, 27, 273, 1950.
18. Л. Э. Гуревич, А. Д. Чернин, *Введение в космологию*, Наука, М., 1978.
19. S. Aarseth, M. Lecar, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 13, 1, 1975.
20. Б. А. Трубников, В сб. «Вопросы теории плазмы», вып. 1, с. 98, 1963.
21. Л. Спиггер, МЛ, *Динамическая эволюция шаровых скоплений*, Мир, М., 1990.

Таблица 1

$X_{\text{H}} = 0.75,$		$X_{\text{He}} = 0.25$		$M = 0.9 M_{\odot}$		
PERH	MASS	RADIUS	DMDT	TIME	R12	
.145E+04	.100E+00	.411E+01	.199E-08	.000E+01	.185E+02	
.193E+04	.700E-01	.443E+01	.436E-09	.340E+08	.225E+02	
.259E+04	.490E-01	.477E+01	.968E-10	.142E+09	.272E+02	
.345E+04	.343E-01	.513E+01	.217E-10	.479E+09	.330E+02	
.457E+04	.240E-01	.550E+01	.495E-11	.152E+10	.398E+02	
.600E+04	.168E-01	.586E+01	.115E-11	.469E+10	.477E+02	
.779E+04	.118E-01	.619E+01	.276E-12	.140E+11	.568E+02	
.999E+04	.824E-02	.648E+01	.685E-13	.409E+11	.671E+02	
.126E+05	.576E-02	.672E+01	.177E-13	.115E+12	.783E+02	
.156E+05	.404E-02	.689E+01	.477E-14	.310E+12	.904E+02	

$M = 1.5 M_{\odot}$			$M = 5.1 M_{\odot}$		
DMDT	TIME	R12	DMDT	TIME	R12
.269E-08	.000E+01	.219E+02	.593E-08	.000E+01	.330E+02
.601E-09	.248E+08	.266E+02	.134E-08	.112E+08	.400E+02
.134E-09	.102E+09	.323E+02	.301E-09	.460E+08	.486E+02
.303E-10	.345E+09	.391E+02	.681E-10	.154E+09	.588E+02
.692E-11	.109E+10	.472E+02	.156E-10	.486E+09	.710E+02
.162E-11	.335E+10	.566E+02	.364E-11	.149E+10	.851E+02
.388E-12	.100E+11	.674E+02	.875E-12	.445E+10	.101E+03
.962E-13	.291E+11	.795E+02	.217E-12	.129E+11	.120E+03
.248E-13	.818E+11	.929E+02	.561E-13	.362E+11	.140E+03
.670E-14	.221E+12	.107E+03	.151E-13	.978E+11	.161E+03

ГЕЛИЙ ^4He			$M =$
PERHEL	MASS	RADIUS	DMDT
.132E+03	.300E+00	.120E+01	.395E-04
.190E+03	.210E+00	.136E+01	.440E-05
.266E+03	.147E+00	.151E+01	.720E-06
.365E+03	.103E+00	.166E+01	.137E-06
.497E+03	.720E-01	.181E+01	.281E-07
.673E+03	.504E-01	.197E+01	.594E-08
.913E+03	.353E-01	.214E+01	.127E-08
.124E+04	.247E-01	.232E+01	.274E-09
.168E+04	.173E-01	.253E+01	.591E-10
.226E+04	.121E-01	.274E+01	.129E-10
.302E+04	.847E-02	.295E+01	.286E-11
.398E+04	.593E-02	.315E+01	.655E-12
.517E+04	.415E-02	.333E+01	.156E-12
.658E+04	.291E-02	.347E+01	.392E-13
.817E+04	.203E-02	.356E+01	.104E-13
.989E+04	.142E-02	.359E+01	.298E-14

Таблица 2

1.7 M_{\odot}		$M = 5.3 M_{\odot}$		
TIME	R12	DMDT	TIME	R12
.000E+01	.464E+01	.421E-04	.000E+01	.677E+01
.820E+04	.592E+01	.698E-05	.576E+04	.864E+01
.473E+05	.740E+01	.131E-05	.282E+05	.108E+02
.198E+06	.914E+01	.267E-06	.108E+06	.133E+02
.727E+06	.112E+02	.565E-07	.374E+06	.164E+02
.250E+07	.137E+02	.122E-07	.124E+07	.201E+02
.830E+07	.168E+02	.265E-08	.405E+07	.246E+02
.272E+08	.206E+02	.574E-09	.131E+08	.301E+02
.887E+08	.252E+02	.125E-09	.423E+08	.368E+02
.287E+09	.308E+02	.273E-10	.135E+09	.449E+02
.917E+09	.373E+02	.608E-11	.433E+09	.545E+02
.287E+10	.449E+02	.139E-11	.135E+10	.656E+02
.871E+10	.535E+02	.332E-12	.410E+10	.781E+02
.254E+11	.628E+02	.834E-13	.119E+11	.917E+02
.703E+11	.725E+02	.222E-13	.330E+11	.106E+03
.184E+12	.824E+02	.635E-14	.826E+11	.120E+03

ЮПИТЕРЫ ВОКРУГ МЕРТВЫХ ЗВЕЗД

УГЛЕРОД ¹²C

M

PERCRB	MASS	RADIUS	DMDT
.124E+03	.300E+00	.115E+01	.454E-04
.179E+03	.210E+00	.130E+01	.535E-05
.259E+03	.147E+00	.146E+01	.852E-06
.355E+03	.103E+00	.163E+01	.153E-06
.491E+03	.720E-01	.179E+01	.295E-07
.671E+03	.504E-01	.196E+01	.600E-08
.904E+03	.353E-01	.212E+01	.128E-08
.120E+04	.247E-01	.227E+01	.287E-09
.156E+04	.173E-01	.241E+01	.674E-10
.200E+04	.121E-01	.252E+01	.166E-10
.252E+04	.847E-02	.261E+01	.429E-11
.313E+04	.593E-02	.268E+01	.116E-11
.383E+04	.415E-02	.272E+01	.326E-12
.462E+04	.291E-02	.274E+01	.951E-13
.551E+04	.203E-02	.274E+01	.287E-13
.651E+04	.142E-02	.272E+01	.894E-14
.763E+04	.997E-03	.268E+01	.285E-14

Таблица 3

$M = 1.7 M_{\odot}$		$M = 5.3 M_{\odot}$		
TIME	R12	DNCT	TIME	R12
.000E+01	.444E+01	.493E-04	.000E+01	.649E+01
.684E+04	.567E+01	.840E-05	.482E+04	.828E+01
.35E+05	.716E+01	.154E-05	.237E+05	.105E+02
.172E+06	.896E+01	.297E-06	.935E+05	.131E+02
.663E+06	.111E+02	.593E-07	.342E+06	.163E+02
.239E+07	.137E+02	.123E-07	.119E+07	.200E+02
.818E+07	.167E+02	.267E-08	.358E+07	.244E+02
.256E+08	.202E+02	.602E-09	.118E+08	.294E+02
.826E+08	.240E+02	.142E-09	.354E+08	.351E+02
.245E+09	.284E+02	.352E-10	.116E+09	.414E+02
.693E+09	.331E+02	.911E-11	.327E+09	.484E+02
.188E+10	.392E+02	.246E-11	.884E+09	.559E+02
.488E+10	.437E+02	.693E-12	.229E+10	.639E+02
.122E+11	.496E+02	.203E-12	.572E+10	.724E+02
.293E+11	.558E+02	.613E-13	.138E+11	.815E+02
.684E+11	.623E+02	.191E-13	.321E+11	.910E+02
.155E+12	.693E+02	.608E-14	.727E+11	.101E+03

МАГНИЙ ^{24}Mg			$M = 1.7 M_{\odot}$	
PERMGN	MASS	RADIUS	DMDT	TIME
.118E+03	.300E+00	.112E+01	.499E-04	.000E+01
.168E+03	.210E+00	.125E+01	.601E-05	.613E+04
.234E+03	.147E+00	.139E+01	.101E-05	.343E+05
.321E+03	.103E+00	.152E+01	.193E-06	.142E+06
.432E+03	.720E-01	.165E+01	.400E-07	.516E+06
.575E+03	.504E-01	.177E+01	.875E-08	.174E+07
.755E+03	.353E-01	.188E+01	.200E-08	.554E+07
.979E+03	.247E-01	.199E+01	.478E-09	.169E+08
.125E+04	.173E-01	.208E+01	.119E-09	.494E+08
.158E+04	.121E-01	.216E+01	.306E-10	.139E+09
.197E+04	.847E-02	.222E+01	.821E-11	.377E+09
.242E+04	.593E-02	.226E+01	.228E-11	.985E+09
.293E+04	.415E-02	.228E+01	.658E-12	.248E+10
.351E+04	.291E-02	.228E+01	.197E-12	.605E+10
.415E+04	.203E-02	.227E+01	.606E-13	.143E+11
.486E+04	.142E-02	.223E+01	.193E-13	.325E+11
.563E+04	.997E-03	.219E+01	.631E-14	.722E+11
.647E+04	.698E-03	.213E+01	.212E-14	.156E+12

$M 5.3 M_{\odot}$

R12	DMDT	TIME	R12
.430E+01	.551E-04	.000E+01	.629E+01
.545E+01	.959E-05	.425E+04	.796E+01
.679E+01	.184E-05	.204E+05	.993E+01
.837E+01	.376E-06	.769E+05	.122E+02
.102E+02	.806E-07	.265E+06	.149E+02
.124E+02	.180E-07	.863E+06	.181E+02
.148E+02	.417E-08	.270E+07	.217E+02
.176E+02	.100E-08	.812E+07	.257E+02
.208E+02	.251E-09	.235E+08	.303E+02
.242E+02	.649E-10	.659E+08	.354E+02
.281E+02	.174E-10	.178E+09	.410E+02
.322E+02	.486E-11	.464E+09	.470E+02
.366E+02	.140E-11	.117E+10	.535E+02
.413E+02	.419E-12	.284E+10	.603E+02
.462E+02	.129E-12	.669E+10	.675E+02
.513E+02	.411E-13	.153E+11	.749E+02
.566E+02	.135E-13	.338E+11	.827E+02
.621E+02	.451E-14	.730E+11	.907E+02

КОПИТЕРЫ БОКРУТ МЕРТВЫХ ЗВЕЗД

Таблица 5

ЖЕЛЕЗО ^{56}Fe			$M = 1.7 M_{\odot}$			$M = 5.3 M_{\odot}$		
PERIRN	MASS	RADIUS	DMDT	TIME	R12	DMDT	TIME	R12
.888E+02	.300E+00	.922E+00	.108E-03	.000E+01	.356E+01	.118E-03	.000E+01	.520E+01
.126E+03	.210E+00	.103E+01	.127E-04	.290E+04	.449E+01	.205E-04	.200E+04	.655E+01
.172E+03	.147E+00	.113E+01	.222E-05	.15E+05	.552E+01	.408E-05	.940E+04	.807E+01
.229E+03	.103E+00	.121E+01	.455E-06	.630E+05	.669E+01	.889E-06	.340E+05	.977E+01
.300E+03	.720E-01	.129E+01	.102E-06	.215E+06	.801E+01	.206E-06	.110E+06	.117E+02
.389E+03	.504E-01	.136E+01	.241E-07	.672E+06	.952E+01	.496E-07	.334E+06	.139E+02
.500E+03	.353E-01	.143E+01	.589E-08	.200E+07	.113E+02	.123E-07	.973E+06	.164E+02
.638E+03	.247E-01	.149E+01	.147E-08	.574E+07	.133E+02	.310E-08	.276E+07	.194E+02
.810E+03	.173E-01	.159E+01	.377E-09	.161E+08	.155E+02	.795E-09	.767E+07	.227E+02
.102E+04	.121E-01	.161E+01	.981E-10	.441E+08	.181E+02	.208E-09	.209E+08	.265E+02
.128E+04	.847E-02	.166E+01	.261E-10	.110E+09	.210E+02	.555E-10	.560E+08	.307E+02
.158E+04	.593E-02	.170E+01	.715E-11	.311E+09	.242E+02	.152E-10	.147E+09	.354E+02
.193E+04	.415E-02	.172E+01	.202E-11	.795E+09	.277E+02	.431E-11	.374E+09	.404E+02
.231E+04	.291E-02	.173E+01	.598E-12	.196E+10	.312E+02	.127E-11	.922E+09	.456E+02
.272E+04	.203E-02	.171E+01	.185E-12	.466E+10	.348E+02	.395E-12	.219E+10	.509E+02
.313E+04	.142E-02	.167E+01	.60E-13	.105E+11	.332E+02	.130E-12	.495E+10	.559E+02
.352E+04	.997E-03	.160E+01	.213E-13	.227E+11	.413E+02	.454E-13	.106E+11	.604E+02
.386E+04	.698E-03	.151E+01	.795E-14	.451E+11	.440E+02	.170E-13	.216E+11	.642E+02
.414E+04	.489E-03	.141E+01	.317E-14	.884E+11	.461E+02	.676E-14	.414E+11	.673E+02
.438E+04	.342E-03	.130E+01	.133E-14	.161E+12	.478E+02	.283E-14	.753E+11	.699E+02