

Э. В. Чубарян

## К теории оболочек барионных звезд

Теория барионных звезд (так мы называем совершенно холодные сверхплотные гипотетические небесные тела, состоящие из элементарных частиц) была разработана в работах [1—4]. Основной результат этих работ сводится к тому, что такие тела обладают массами порядка массы Солнца и размерами порядка 10 км. В упомянутых работах в основном исследовались параметры ядер этих звезд, где вещество состоит из газа элементарных частиц. Вопросы, касающиеся оболочек этих звезд, рассматривались в работе [5]. В [5] параметры оболочек вычислялись в предположении, что вещество состоит из вырожденного газа протонов и электронов ( $T=0$ ). При этом толщина оболочек оказалась порядка сотен метров, а масса намного порядков меньше по сравнению с массой барионного ядра.

Ниже исследуются параметры оболочек барионных звезд в предположении, что вещество в них состоит из ядер гелия и вырожденного электронного газа.

### § 1. Химический состав оболочек

Очевидно, при температуре  $T=0$  веществу в оболочке энергетически выгодно находиться не в состоянии водорода, а в состоянии сложных ядер. Для примера рассмотрим случай, когда оболочка имеет однородный химический состав и в наружных его слоях состоит из ядер He. Из условия электрической нейтральности следует, что

$$N_e = 2N_{\text{He}}, \quad (1.1)$$

где  $N_e$  и  $N_{\text{He}}$  — плотности электронов и ядер гелия соответственно. Толщина слоя, где вещество находится в виде нейтрального атома при  $T=0$ , будет бесконечно тонкой, поскольку в этом случае градиент давления равняется нулю. Отсюда следует, что при  $T=0$  даже у самой поверхности звезды атомы должны находиться в ионизированном состоянии.

Теперь посмотрим какие изменения испытывает химический состав вещества, когда мы от поверхности мысленно продвигаемся вглубь звезды по направлению радиуса. При этом мы замечаем непрерывный рост плотности массы, концентрации электронов и, следовательно,

граничной энергии  $E_c$  вырожденного электронного газа. При некотором пороговом значении плотности массы  $\rho_2$  становится возможной реакция



где  $e$ ,  $n$  и  $\nu$  — соответственно означают электрон, нейтрон и нейтрино. В соответствии с (1.2) мы имеем

$$m_{\text{He}} c^2 + 2E_e = 4m_n c^2. \quad (1.3)$$

Отсюда получаем пороговое значение граничной энергии и плотности электронов

$$E_e^{(2)} = 2B, \quad N_e^{(2)} = \frac{1}{3\pi} \left( \frac{2B}{\hbar c} \right)^3, \quad (1.4)$$

где  $B = (4m_n - m_{\text{He}}) c^2 / A$  приблизительно представляет энергию связи нуклона в ядре,  $B = 7,72 \text{ Мев}$ . В соответствии с этим для пороговых значений плотностей получаем

$$\begin{aligned} N_e^{(2)} &= 1.611 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-3}, \\ N_{\text{He}}^{(2)} &= 8.055 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-3}, \\ \rho_2 &= 5.337 \cdot 10^{10} \text{ г см}^{-3}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Продолжая продвигаться вглубь звезды мы замечаем, что в некоторой области плотностей

$$\rho_2 \leq \rho \leq \rho_1 \quad (1.6)$$

в соответствующем слое звезды вещество состоит из ядер, нейтронов и электронов. Здесь протонов нет, а устойчивость нейтронов обеспечена наличием полностью вырожденного электронного газа, граничная энергия которого согласно (1.4) равна  $2B = 15.44 \text{ Мев}$ . Замечательно то, что в этой области концентрации ядер и электронов являются постоянными, в то время как с ростом плотности массы плотность нейтронов непрерывно растет. Причиной такой „странной“ картины является то, что, начиная с  $\rho = \rho_2$ , при росте общего числа барионов предпочтительным является вместо появления нового ядра и  $Z$  электронов появление  $A$  нейтронов, так как в этом случае энергия системы оказывается меньшей. Эта картина продолжает сохраняться до такой плотности  $\rho_1$ , при которой граничная энергия вырожденного газа нейтронов  $E_n$  начинает превышать сумму энергии покоя протонов и граничной энергии  $E_e^{(2)}$

$$E_n \geq m_p c^2 + E_e^{(2)}.$$

Как только  $E_n$  приравнивается сумме  $m_p c^2 + E_e^{(2)}$ , в среде начинают появляться протоны. Порог образования протонов определяется соотношениями

$$N_n^{(1)} = \frac{1}{3\pi^2 \hbar^3} [2m_n (2B + m_n c^2 - m_n c^2)]^{3/2} = 1.905 \cdot 10^{37} \text{ см}^{-3},$$

$$N = 4N_{\text{He}}^{(2)} + N_n^{(1)} = 1.908 \cdot 10^{37} \text{ см}^{-3},$$

$$N_e^{(1)} = N_e^{(2)} = 2N_{\text{He}}^{(2)} = 1.611 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-3},$$

$$\rho_1 = m_n N = 3.18 \cdot 10^{13} \text{ г см}^{-3}, \quad (1.7)$$

где  $N$  — общая концентрация барионов.

При плотностях несколько выше порога появления протонов в среде все ядра распадаются. Таким образом, при плотностях  $\rho > \rho_1$  вещество состоит из газа элементарных частиц, в котором число лептонов значительно меньше числа барионов. Эту часть звезды принято называть барионной сферой [4]. Во внешних частях барионной сферы, где

$$t_n(r) = 4 \operatorname{arsh} [(3\pi^2)^{1/3} \hbar N_n^{1/3} / m_n c] \leq 2.1, \quad (1.8)$$

вещество состоит из нейтронов и сравнительно небольшого числа электронов и протонов. Здесь концентрация частиц определяется соотношениями

$$E_p + E_e = E_n, \quad N_p = N_e. \quad (1.9)$$

А в центральной части звезды, где  $t_n(r) > 2.1$ , помимо нуклонов имеются также в сравнительно большом количестве гипероны (гиперонное ядро).

## § 2. Уравнения состояния

Посмотрим каково будет уравнение состояния вещества в оболочке барионной звезды. Условимся оболочкой считать область звезды, где  $\rho < \rho_1$ . Эта та область, где имеются атомные ядра.

Мы видели, что оболочка состоит из двух подобластей: наружной, где вещество состоит из ядер и электронов, и внутренней, где оно состоит из ядер электронов и нейтронов. В первой области плотность энергии с большой точностью определяется ядрами, а давление — электронами. Следовательно, для уравнения состояния имеем

$$\rho = \frac{1}{2} N_e m_{\text{He}} c^2 = \frac{m_{\text{He}} c^2}{6\pi^2} \left( \frac{m_e c}{\hbar} \right)^3 \operatorname{sh} \frac{t_e}{4} = 1.735 \cdot 10^{37} \operatorname{sh} \frac{t_e}{4}, \quad (2.1)$$

$$P = \frac{1}{3} K_e (\operatorname{sh} t_e - 8 \operatorname{sh} \frac{t_e}{2} + 3 t_e),$$

где

$$t_e = 4 \operatorname{arsh} [(3\pi^2)^{1/3} \hbar N_e^{1/3} / m_e c]; \quad K_e = \frac{m_e^4 c^3}{32\pi^2 \hbar^3} = 4.475 \cdot 10^{22}.$$

В той части звезды, где электронный газ является нерелятивистским,  $t_e \ll 1$ . В этом случае целесообразно (2.1) заменить следующим уравнением состояния

$$p = AP_e^{2/3}, \quad (2.2)$$

где

$$A = 15^{3/2} \frac{2m_{\text{He}}}{3m_e} K_e^{2/3} = 2.836 \cdot 10^{13}.$$

Во второй области оболочки плотность энергии в основном определяется ядрами и нейтронами, а давление — нейтронами и электронами. В соответствии с этим имеем

$$p = \frac{1}{2} m_{\text{He}} c^2 N_e^{(2)} + K_n (\text{sh } t_n - t_n),$$

$$P = \frac{1}{3} K_e \left( \text{sh } t_e^{(2)} - 8 \text{sh } \frac{t_e^{(2)}}{2} + 3 t_e^{(2)} \right) + \frac{1}{3} K_n \left( \text{sh } t_n - 8 \text{sh } \frac{t_n}{2} + 3 t_n \right). \quad (2.3)$$

где  $t_e^{(2)}$  — значение параметра  $t_e$ , соответствующее концентрации электронов  $N_e^{(2)}$ , которая в этой подобласти является постоянным числом, далее

$$t_n = 4 \text{arsh} [(3\pi^2)^{1/3} \hbar N_n^{1/3} / m_n c]; \quad K_n = \frac{m_n^4 c^5}{32\pi^2 \hbar^3} = 5.114 \cdot 10^{35}.$$

Уравнения (2.3) справедливы для идеального газа. Учет взаимодействия нейтронов не существенно сказывается на основных характеристиках конфигураций.

Здесь для отношения плотностей энергии гелия и электронов имеем  $\rho_{\text{He}}^{(2)} / \rho_e^{(2)} \approx 161$ . В начале этой подобласти, где плотность барионов  $N = 3.222 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-3}$ ,  $P_n = p_n = 0$ . Далее, при продвижении вглубь звезды плотность энергии и давление нейтронного газа быстро растут,  $p$  приравнивается плотности энергии гелия  $\rho_{\text{He}}^{(2)}$  при  $N = 6.4 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-3}$ , а парциальное давление  $P_n$  приравнивается парциальному давлению электронного газа при  $N = 2.55 \cdot 10^{35} \text{ см}^{-3}$ ; на внутренней поверхности оболочки, где  $N = 1.91 \cdot 10^{37} \text{ см}^{-3}$ , парциальная плотность энергии ядер и парциальное давление электронов соответственно составляют  $1.64 \cdot 10^{-3} \rho_n$  и  $5.74 \cdot 10^{-4} P_n$ .

### § 3. Параметры оболочек

Для определения толщины оболочки и массы, заключенной в ней, мы должны проинтегрировать следующую систему дифференциальных уравнений

$$\frac{du}{dr} = r^2 \rho_k(r),$$

$$\frac{dP_k}{dr} = - \frac{P_k + \rho_k}{r(r-2u)} (r^2 P_k + u),$$
(3.1)

где  $u(r)$  — «масса», заключенная в сфере радиуса  $r$ ,

$$\rho_k(r) = \rho(r)/K_n, \quad P_k(r) = P(r)/K_n$$

и в качестве системы единиц принято  $c = k = 1$ ,  $K_n = \frac{1}{4\pi}$  ( $c$  — скорость света,  $k$  — гравитационная постоянная). Уравнения (3.1) для барийного ядра ( $\rho > \rho_1 = 3.2 \cdot 10^{12}$  гсм<sup>-3</sup>) для различных значений центральной плотности были проинтегрированы в работе [4]. Результаты приведены во второй и третьей колонках табл. 1 и 2. Эти данные

Таблица 1

Наиболее важные параметры барийных звезд, состоящих из идеального газа

| Плотность<br>в центре<br>$\text{гсм}^{-3}$ | Бариевое<br>ядро                 |                | О б о л о ч к а                  |                 |                                  |                 | З в е з д а                      |                | Параметры водо-<br>родной оболочки |                     |
|--------------------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|----------------|------------------------------------|---------------------|
|                                            |                                  |                | He + e + n                       |                 | He + e                           |                 |                                  |                |                                    |                     |
|                                            | масса в<br>единицах<br>$M_\odot$ | радиус<br>в км | масса в<br>единицах<br>$M_\odot$ | толщина<br>в км | масса в<br>единицах<br>$M_\odot$ | толщина<br>в км | масса в<br>единицах<br>$M_\odot$ | радиус<br>в км | масса в<br>единицах<br>$M_\odot$   | толщина<br>в метрах |
| $1.00 \cdot 10^{14}$                       | 0.1812                           | 11.755         | 0.1285                           | 8.631           | $1.16 \cdot 10^{-3}$             | 10.415          | 0.3109                           | 30.801         | $1.58 \cdot 10^{-8}$               | 493                 |
| $2.24 \cdot 10^{14}$                       | 0.3428                           | 12.522         | 0.0743                           | 5.069           | $1.24 \cdot 10^{-4}$             | 4.690           | 0.4172                           | 22.281         | $6.38 \cdot 10^{-9}$               | 265                 |
| $3.62 \cdot 10^{14}$                       | 0.4162                           | 11.467         | 0.0456                           | 4.288           | $8.27 \cdot 10^{-5}$             | 3.164           | 0.4619                           | 18.919         | $3.15 \cdot 10^{-9}$               | 174                 |
| $2.34 \cdot 10^{15}$                       | 0.6299                           | 9.974          | 0.0122                           | 1.486           | $1.17 \cdot 10^{-5}$             | 0.990           | 0.6421                           | 12.450         | $4.61 \cdot 10^{-9}$               | 54                  |
| $1.09 \cdot 10^{16}$                       | 0.5110                           | 8.343          | 0.0074                           | 1.265           | $8.36 \cdot 10^{-6}$             | 0.876           | 0.5184                           | 10.434         | $3.35 \cdot 10^{-10}$              | 51                  |
| $8.29 \cdot 10^{16}$                       | 0.3220                           | 6.672          | 0.0053                           | 1.846           | $6.50 \cdot 10^{-6}$             | 1.208           | 0.3273                           | 9.726          | $2.83 \cdot 10^{-10}$              | 61                  |
| $1.15 \cdot 10^{18}$                       | 0.1721                           | 5.425          | 0.0054                           | 2.103           | $5.80 \cdot 10^{-6}$             | 2.024           | 0.1776                           | 9.552          | $4.33 \cdot 10^{-10}$              | 105                 |
| $\infty$                                   | 0.3066                           | 8.439          | 0.0162                           | 2.603           | $6.50 \cdot 10^{-6}$             | 2.225           | 0.3228                           | 13.267         | $1.05 \cdot 10^{-9}$               | 118                 |

принимались в качестве начальных условий. В случае идеального газа из [4] имеем

$$r = r_b, \quad \rho(r_b) = 3.22 \cdot 10^{12} \text{ гсм}^{-3}, \quad u = u(r_b). \quad (3.2)$$

А в случае реального газа с уравнением состояния Камерона [6] имеем

$$r = r_b, \quad \rho(r_b) = 3.20 \cdot 10^{12} \text{ гсм}^{-3}, \quad u = u(r_b). \quad (3.3)$$

Уравнения (3.1) интегрировались до поверхности звезды, т. е. до расстояния  $r = R$ ,  $\rho(R) = 0$ . Эти уравнения для оболочки допускают некоторое упрощение. На поверхности барийной сферы  $r^2 P_k / u \lesssim 0.02$  и  $P_k / \rho \lesssim 0.01$ ; с возрастанием расстояния  $r$  эти отношения быстро уменьшаются. Воспользуясь этим, мы можем уравнения (3.1) переписать в следующем виде:

Таблица 2

Наиболее важные параметры барионных звезд, состоящих из реального газа

| Плотность<br>в центре<br>$\rho_{\text{см}}^{-3}$ | Барионное<br>ядро                  |                | О б л о ч к а                      |                 |                                    |                 | З в е з д а                        |                |
|--------------------------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|------------------------------------|----------------|
|                                                  |                                    |                | He + e + n                         |                 | He + e                             |                 |                                    |                |
|                                                  | масса в<br>единицах<br>$M_{\odot}$ | радиус<br>в км | масса в<br>единицах<br>$M_{\odot}$ | толщина<br>в км | масса в<br>единицах<br>$M_{\odot}$ | толщина<br>в км | масса в<br>единицах<br>$M_{\odot}$ | радиус<br>в км |
| $1.38 \cdot 10^{15}$                             | 0.9388                             | 8.399          | $2.60 \cdot 10^{-3}$               | 0.207           | $4.30 \cdot 10^{-6}$               | 0.296           | 0.9414                             | 8.902          |
| $1.78 \cdot 10^{15}$                             | 1.2328                             | 8.579          | $5.00 \cdot 10^{-4}$               | 0.134           | $5.57 \cdot 10^{-7}$               | 0.195           | 1.2333                             | 8.908          |
| $2.30 \cdot 10^{15}$                             | 1.5702                             | 8.550          | $3.14 \cdot 10^{-4}$               | 0.082           | $5.57 \cdot 10^{-7}$               | 0.118           | 1.5705                             | 8.750          |
| $3.22 \cdot 10^{15}$                             | 1.7304                             | 8.266          | $2.06 \cdot 10^{-4}$               | 0.059           | $5.07 \cdot 10^{-7}$               | 0.083           | 1.7306                             | 8.408          |
| $5.14 \cdot 10^{15}$                             | 1.7367                             | 7.697          | $1.35 \cdot 10^{-4}$               | 0.044           | $4.83 \cdot 10^{-7}$               | 0.063           | 1.7369                             | 7.804          |
| $8.28 \cdot 10^{15}$                             | 1.6953                             | 7.284          | $1.02 \cdot 10^{-4}$               | 0.038           | $1.86 \cdot 10^{-7}$               | 0.053           | 1.6954                             | 7.375          |
| $1.37 \cdot 10^{16}$                             | 1.5567                             | 6.727          | $8.20 \cdot 10^{-5}$               | 0.035           | $1.08 \cdot 10^{-7}$               | 0.050           | 1.5568                             | 6.812          |
| $7.42 \cdot 10^{16}$                             | 1.3124                             | 6.088          | $7.44 \cdot 10^{-5}$               | 0.038           | $5.54 \cdot 10^{-8}$               | 0.056           | 1.3125                             | 6.182          |
| $1.08 \cdot 10^{17}$                             | 1.2911                             | 6.076          | $7.82 \cdot 10^{-5}$               | 0.041           | $2.61 \cdot 10^{-7}$               | 0.059           | 1.2912                             | 6.176          |
| $\infty$                                         | 1.3147                             | 6.277          | $8.90 \cdot 10^{-5}$               | 0.044           | $2.82 \cdot 10^{-7}$               | 0.063           | 1.3148                             | 6.384          |

$$\frac{dc}{dr} = r^2 c_k,$$

$$\frac{dP_k}{dr} = - \frac{\rho_k u}{r(r-2u)} \quad (3.1')$$

Эти уравнения совпадут с соответствующими уравнениями, получаемыми из теории тяготения Ньютона, если мы в знаменателе левой стороны второго уравнения отбросим член  $2u$ . Но для рассматриваемых нами конфигураций этого сделать нельзя ( $2u/r_1 \approx 0.1$ ), так как радиус барионной сферы порядка их гравитационного радиуса.

Результаты интегрирований приведены в табл. 1 и 2.

В заключение выражаю благодарность Г. С. Саакяну за руководство работой.

Физико-техническая лаборатория  
АН Армянской ССР

Поступила 30 I 1963

## Է. Վ. Չուբարյան

### ԲԱՐԻՈՆԱՅԻՆ ԱՍՏՂԵՐԻ ԹԱՂԱՆՅՆԵՐԻ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

#### Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Աշխատության մեջ հետազոտվում է բարիոնային աստղերի թաղանթը, արևինքն արև տիրույթը, որտեղ  $\rho < \rho_1 = 3.18 \cdot 10^{13} \text{ գ/սմ}^3$ : Ենթադրվում է, որ թաղանթը իր արտաքին շերտերում բաղկացած է հեղուկի միջուկներից և ալիստերված էլեկտրոնային դազից:

Հաշվված են իդեալական և սեալ գազերից բաղկացած կոնֆիգուրացիաների թաղանթների հաստութունը և զանգվածը: Իդեալական գազի դեպքում թաղանթի հաստութունը գտնվում է 2.14-ից մինչև 19 կմ սահմաններում, իսկ սեալ գազի դեպքում՝ 6.1-ից մինչև 8.7 կմ սահմաններում:

Աստղի ալդ շերտի զանգվածը ամբողջ կոնֆիգուրացիայի զանգվածի համեմատությամբ փոքր է:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Oppenheimer J. R. and Volkoff G. M. On Massive Neutron Cores. Phys. Rev., **55**, 374, 1939.
2. Амбарцумян В. А. и Саакян Г. С. О вырожденном сверхплотном газе элементарных частиц. Астроном. ж., **37**, 193, 1960.
3. Амбарцумян В. А. и Саакян Г. С. О равновесных конфигурациях сверхплотных вырожденных газовых масс. Астроном. ж., **38**, 785, 1961.
4. Амбарцумян В. А. и Саакян Г. С. Внутреннее строение гиперонных звездных масс. Астроном. ж., **38**, 1016, 1961.
5. Саакян Г. С. и Себракян Д. М. К теории гиперонных конфигураций звездных масс. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, **14**, № 5, 109, 1961.
6. Cameron A. G. W. Neutron Star Models. Astrophys. J., **130**, 884, 1959.