

УДК 530.12:531.51

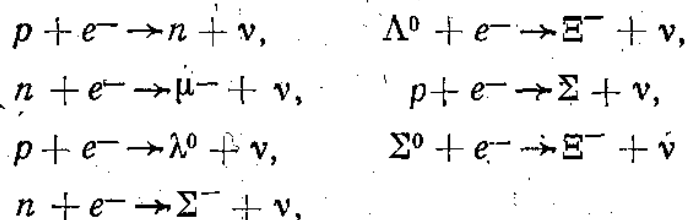
Д. Д. ИВАНЕНКО, Н. И. МАКСЮКОВ

## К ТЕОРИИ СВЕРХПЛОТНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ

Исследуются параметры гиперонных равновесных конфигураций с учетом большого числа барионов и их резонансов, неучитывавшихся ранее. Найдены массы и радиусы конфигураций в области центральных плоскостей, превышающих ядерную.

Одной из проблем релятивистской астрофизики является проблема конечной стадии в звездной эволюции. Две альтернативные концепции гравитационного коллапса и первичного сверхплотного состояния указывают на возможность существования во Вселенной сверхплотных звездных объектов. Подтверждением тому служит обнаружение белых карликов и нейтронных звезд — пульсаров, последние имеют центральные плотности от  $4,5 \cdot 10^{12}$  до  $10^{14}$  г/см<sup>3</sup>.

Для области плотностей  $\rho > 10^{14}$  г/см<sup>3</sup> одним из характерных эффектов является рождение новых частиц. Впервые в деталях этот эффект был рассмотрен в [1]. Было сделано предположение, что образование новых частиц возможно главным образом вследствие следующих реакций (а также обратных):



и ряда других.

По мере увеличения плотности в недрах холодных ( $T=0$ ) конфигураций будут рождаться все более тяжелые гипероны. Вследствие незнания ядерного взаимодействия при сверхвысоких плотностях нельзя исключать возможности, что при определенных надъядерных плотностях то или иное превращение элементарных частиц может значительно влиять на сжимаемость вещества и стабильность сверхплотных звезд. Вследствие этого, наряду с белыми карликами и нейтронными звездами, возможно стабильное состояние гиперонных звезд [1, 2, 3] и даже кварковых сердцевин [6]. Хейнтцман и Хиллебрандт [4, 5], обобщая внутреннее решение Шварцшильда и предполагая, что внутреннее давление изотропно и существует некоторое уравнение состояния,

а адиабатические изменения в радиальных пульсациях определяются уравнением состояния<sup>1</sup>, показали, что в области плотностей  $\rho \sim 10^{17}$  г/см<sup>3</sup> возможно стабильное состояние гиперонных звезд. Это состояние, во-первых, стабильно относительно радиальных пульсаций, во-вторых, является гравитационно связанным, т. е.

$$\Delta = \frac{M_0 - M}{M} > 0, \quad M_0 = M m_B N,$$

$$M = 4\pi \int \rho(r) r^2 dr,$$

и, в-третьих, содержит конечное число барионов.

Подобные равновесные конфигурации, которые могут существовать в области плотностей от  $10^{15}$  до  $10^{19}$  г/см<sup>3</sup>, должны содержать большое число различных частиц. При плотностях выше ядерной наличие вырожденного электронного газа, а также тот факт, что граничная энергия нуклонного газа превышает энергию покоя нестабильных гиперонов, обуславливает энергетически более выгодное гиперонное состояние материи. В табл. I приводятся основные характеристики и пороги рождения рассчитанных в данной работе частиц. Из условий электронейтральности, сохранения барионного заряда и минимума полной энергии системы следуют соотношения термодинамического равновесия [1, 6]:

$$E_k^{(++)} = E_n - 2E_e; \quad E_k^{(+)} = E_n - E_e;$$

$$E_k^{(0)} = E_n; \quad E_k^{(-)} = E_n + E_e;$$

$$E_{\mu^-} = E_e; \quad E_e = m_{\pi^-} c^2,$$

$E_k = c \sqrt{m_k^2 c^2 + P_k^2}$  — граничная энергия частицы  $k$ -того сорта,  $P_k = \left(\frac{6\pi^2}{a_k}\right)^{1/3} \hbar N_k^{1/3}$  — импульс Ферми,  $m_k$  — масса,  $\hbar$  — постоянная Планка,  $a_k = 2S_k + 1$ ,  $S_k$  — спиновое число.

Таблица I

Основные характеристики и пороги рождения частиц

| За-ряд  | Спин            | Частица             | $N_n$ (см <sup>-3</sup> ) | За-ряд        | Спин | Частица         | $N_n$ (см <sup>-3</sup> ) | За-ряд        | Спин | Частица         | $N_n$ (см <sup>-3</sup> ) |
|---------|-----------------|---------------------|---------------------------|---------------|------|-----------------|---------------------------|---------------|------|-----------------|---------------------------|
| Нулевой | 1/2             | $n$ (939)           | $1,5 \cdot 10^{35}$       | Отрицательный | 3/2  | $\Sigma$ (1660) | $9,6 \cdot 10^{39}$       | Положительный | 3/2  | $\Sigma$ (1385) | $6,08 \cdot 10^{39}$      |
|         | 1/2             | $\Lambda$ (1115,6)  | $9,6 \cdot 10^{39}$       |               | 1/2  | $\Sigma$ (1197) | $6,02 \cdot 10^{39}$      |               | 1/2  | $N'$ (1470)     | $7,66 \cdot 10^{39}$      |
|         | 1/2             | $\Sigma$ (1192)     | $1,8 \cdot 10^{39}$       |               | 3/2  | $\Delta$ (1236) | $1,38 \cdot 10^{39}$      |               | 3/2  | $N'$ (1525)     | $9,17 \cdot 10^{39}$      |
|         | 3/2             | $\Lambda$ (1236)    | $2,3 \cdot 10^{39}$       |               | 1/2  | $\Theta$ (1321) | $1,63 \cdot 10^{39}$      |               | 1/2  | $N$ (1550)      | $9,64 \cdot 10^{39}$      |
|         | 1/2             | $\Theta$ (1314,7)   | $3,5 \cdot 10^{39}$       |               | 3/2  | $\Sigma$ (1382) | $3,7 \cdot 10^{39}$       |               | 3/2  | $\Delta$ (1236) | $4,5 \cdot 10^{39}$       |
|         | 3/2             | $\Sigma$ (1382)     | $4,5 \cdot 10^{39}$       |               | 3/2  | $\Xi$ (1534)    | $6,5 \cdot 10^{39}$       |               |      |                 |                           |
|         | 1/2             | $\Lambda$ (1405)    | $5,03 \cdot 10^{39}$      |               | 1/2  | $\Delta$ (1640) | $9,13 \cdot 10^{39}$      |               |      |                 |                           |
|         | 1/2             | $N'$ (1470)         | $6,15 \cdot 10^{39}$      |               | 3/2  | $\Omega$ (1672) | $8,6 \cdot 10^{39}$       |               |      |                 |                           |
|         | 3/2             | $N$ (1518,8)        | $7,47 \cdot 10^{39}$      |               | 1/2  | $\rho$ (938)    | $3,6 \cdot 10^{37}$       |               |      |                 |                           |
|         | 3/2             | $\Lambda$ (1519)    | $7,47 \cdot 10^{39}$      |               | 1/2  | $\Sigma$ (1189) | $5,5 \cdot 10^{39}$       |               |      |                 |                           |
|         | 3/2             | $\Theta$ (1528,9)   | $7,9 \cdot 10^{39}$       |               | 3/2  | $\Delta$ (1236) | $3,4 \cdot 10^{39}$       |               |      |                 |                           |
|         | 1/2             | $N$ (1550)          | $8,3 \cdot 10^{39}$       |               |      |                 |                           |               |      |                 |                           |
| 1/2     | $\Delta$ (1640) | $1,1 \cdot 10^{40}$ |                           |               |      |                 |                           |               |      |                 |                           |

<sup>1</sup> Следствием последнего предположения является то, что адиабатический индекс  $\gamma = \frac{P + \rho}{P} \left(\frac{dP}{d\rho}\right)_{ad}$  не ограничен требованием быть меньше  $\frac{4}{3}$  или  $\frac{5}{3}$ .

Для нахождения основных параметров равновесных конфигураций необходимо решить систему уравнений гидростатического равновесия совместно с уравнением состояния:

$$\frac{du}{dr} = 4\pi r^2 \rho \frac{dP}{dr} = - \frac{(P + \rho)}{r(r - 2u)} (4\pi r^3 P + u). \quad (1)$$

Следуя [5], возьмем уравнение состояния в виде

$$\rho = \rho_0 + \rho_v; \quad P = P_0 + P_v, \quad (2)$$

$$\rho_0 = k_n \left[ \sum_k \frac{1}{2} a_k \left( \frac{m_k}{m_n} \right)^4 (\text{sh } t_k - t_k) \right],$$

$$P_0 = \frac{1}{3} k_n \sum_k \frac{1}{2} a_k \left( \frac{m_k}{m_n} \right)^4 \left[ \text{sh } t_k - 8 \text{sh } \frac{t_k}{2} + 3t_k \right], \quad (3)$$

$\rho_0$  и  $P_0$  — плотность энергии и давление идеального газа,  
 $t_k = 4\pi r \text{sh } \frac{P_k}{m_k c}$ .

Для части плотности  $\rho$  и давления  $P$ , обусловленных ядерным взаимодействием в области  $N > 10^{38} \text{ см}^{-3}$ , используются следующие выражения:

$$\rho_v = 2,05 \cdot 10^{-17} N^{4/3} - 8,99 \cdot 10^{-30} N^{5/3} + 8,03 \cdot 10^{-43} N^2,$$

$$P_v = 6,62 \cdot 10^{-18} N^{4/3} - 5,99 \cdot 10^{-30} N^{5/3} + 8,03 \cdot 10^{-43} N^2;$$

в области  $3 \cdot 10^{37} \text{ см}^{-3} \leq N < 1,5 \cdot 10^{38} \text{ см}^{-3}$ :

$$\rho_v = 1,02 \cdot 10^{-18} N^{4/3} - 8,75 \cdot 10^{-31} N^{5/3} - 3,91 \cdot 10^{-44} N^2$$

и

$$P_v = 3,4 \cdot 10^{-19} N^{4/3} - 5,83 \cdot 10^{-31} N^{5/3} - 3,91 \cdot 10^{-44} N^2. \quad (4)$$

Используется система единиц

$$G = c = 1, \quad k_n = \frac{m_n^4 c^5}{32\pi^2 \hbar^3} = \frac{1}{4\pi}.$$

При интегрировании системы уравнений (1) и (2) и (1) — (3) предполагалось, что в качестве стабильных компонентов материи могут быть частицы, указанные в табл. 1. Интегрирование произведено с помощью ЭВМ. Значения параметров приведены в табл. 2, где  $u$  и  $r$  — масса и радиус конфигураций для удаленного наблюдателя, а

$$M = 4\pi \int_0^R \sqrt{g_{rr}} \rho(r) r^2 dr \quad \text{и} \quad R = \int_0^R \sqrt{g_{rr}} dr$$

собственные значения массы и радиуса. Под радиусом гиперонного ядра подразумевается ( $r$ ) расстояние, отсчитываемое от центра звезды, при котором исчезает последний из гиперонов, а под массой гиперонного ядра — значение  $u(r)$ . Интегрирование системы уравнений (1) — (3) дает значения  $u = 0,2892 M_0$  и  $r = 7,65 \text{ км}$ , что уточняет значения в [1].

## Параметры конфигураций

| Параметры в центре звезды |                             |                            | Всей звезды   |          |               |          | Гиперонного ядра |          |               |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|----------|---------------|----------|------------------|----------|---------------|----------|
| $N$ (см <sup>-3</sup> )   | $\rho$ (г/см <sup>3</sup> ) | $P$ (эрг/см <sup>3</sup> ) | $u/M_{\odot}$ | $r$ (км) | $M/M_{\odot}$ | $R$ (км) | $u/M_{\odot}$    | $r$ (км) | $M/M_{\odot}$ | $R$ (км) |
| 2,07·10 <sup>38</sup>     | 3,47·10 <sup>14</sup>       | 4,9·10 <sup>33</sup>       | 0,145         | 11,19    | 0,148         | 11,39    |                  |          |               |          |
| 2,4·10 <sup>38</sup>      | 4,07·10 <sup>14</sup>       | 7,7·10 <sup>33</sup>       | 0,204         | 10,33    | 0,209         | 10,57    | 0,0357           | 3,576    | 0,036         | 3,59     |
| 3,22·10 <sup>38</sup>     | 5,55·10 <sup>14</sup>       | 1,77·10 <sup>34</sup>      | 0,364         | 9,88     | 0,38          | 10,25    | 0,191            | 5,96     | 0,197         | 6,07     |
| 4,8·10 <sup>38</sup>      | 8,61·10 <sup>14</sup>       | 5,24·10 <sup>34</sup>      | 0,676         | 9,93     | 0,734         | 10,57    | 0,537            | 7,75     | 0,576         | 8,12     |
| 6,16·10 <sup>38</sup>     | 1,13·10 <sup>15</sup>       | 9,82·10 <sup>34</sup>      | 0,893         | 9,9      | 0,997         | 10,77    | 0,78             | 8,3      | 0,86          | 8,88     |
| 7,75·10 <sup>38</sup>     | 1,47·10 <sup>15</sup>       | 1,74·10 <sup>35</sup>      | 1,08          | 9,71     | 1,25          | 10,8     | 0,997            | 8,54     | 1,14          | 9,35     |
| 9,6·10 <sup>38</sup>      | 1,89·10 <sup>15</sup>       | 2,91·10 <sup>35</sup>      | 1,24          | 9,45     | 1,47          | 10,78    | 1,172            | 8,54     | 1,38          | 9,6      |
| 1,17·10 <sup>39</sup>     | 2,4·10 <sup>15</sup>        | 4,7·10 <sup>35</sup>       | 1,35          | 9,13     | 1,65          | 10,67    | 1,3              | 8,4      | 1,58          | 9,68     |
| 2,36·10 <sup>39</sup>     | 6,1·10 <sup>15</sup>        | 2,34·10 <sup>36</sup>      | 1,44          | 7,65     | 1,934         | 9,77     | 1,42             | 7,27     | 1,9           | 9,2      |
| 2,75·10 <sup>39</sup>     | 7,63·10 <sup>15</sup>       | 3,31·10 <sup>36</sup>      | 1,41          | 7,33     | 1,93          | 9,53     | 1,39             | 6,97     | 1,9           | 8,99     |
| 4,72·10 <sup>39</sup>     | 1,18·10 <sup>16</sup>       | 1,08·10 <sup>37</sup>      | 1,408         | 6,54     | 2,05          | 8,95     | 1,4              | 6,3      | 2,03          | 8,54     |
| 6,73·10 <sup>39</sup>     | 2,52·10 <sup>16</sup>       | 2,34·10 <sup>37</sup>      | 1,33          | 6,27     | 1,96          | 8,81     | 1,32             | 6,03     | 1,945         | 8,41     |
| 1,04·10 <sup>40</sup>     | 7,34·10 <sup>16</sup>       | 5,88·10 <sup>37</sup>      | 1,25          | 6,19     | 1,845         | 8,86     | 1,24             | 5,93     | 1,83          | 8,44     |
| 1,23·10 <sup>40</sup>     | 1,01·10 <sup>17</sup>       | 8,39·10 <sup>37</sup>      | 1,22          | 6,19     | 1,79          | 8,92     | 1,21             | 5,91     | 1,78          | 8,47     |
| 1,44·10 <sup>40</sup>     | 1,38·10 <sup>17</sup>       | 1,18·10 <sup>38</sup>      | 1,19          | 6,21     | 1,76          | 8,98     | 1,18             | 5,91     | 1,74          | 8,51     |
| 1,68·10 <sup>40</sup>     | 1,87·10 <sup>17</sup>       | 1,64·10 <sup>38</sup>      | 1,18          | 6,23     | 1,73          | 9,04     | 1,167            | 5,92     | 1,71          | 8,57     |
| 2,15·10 <sup>40</sup>     | 3,04·10 <sup>17</sup>       | 2,74·10 <sup>38</sup>      | 1,17          | 6,28     | 1,72          | 9,12     | 1,16             | 5,96     | 1,7           | 8,63     |
| 3,67·10 <sup>40</sup>     | 8,99·10 <sup>17</sup>       | 8,4·10 <sup>38</sup>       | 1,18          | 6,4      | 1,74          | 9,33     | 1,17             | 6,06     | 1,72          | 8,82     |
| 4,33·10 <sup>40</sup>     | 1,26·10 <sup>18</sup>       | 1,18·10 <sup>39</sup>      | 1,19          | 6,42     | 1,75          | 9,36     | 1,18             | 6,08     | 1,73          | 8,86     |
| 6,65·10 <sup>40</sup>     | 3,02·10 <sup>18</sup>       | 2,87·10 <sup>39</sup>      | 1,2           | 6,43     | 1,77          | 9,4      | 1,19             | 6,1      | 1,75          | 8,9      |
| 1,5·10 <sup>41</sup>      | 1,6·10 <sup>19</sup>        | 1,53·10 <sup>40</sup>      | 1,216         | 6,4      | 1,795         | 9,4      | 1,2              | 6,08     | 1,78          | 8,91     |
| 4,2·10 <sup>41</sup>      | 1,33·10 <sup>20</sup>       | 1,25·10 <sup>41</sup>      | 1,21          | 6,385    | 1,79          | 9,39     | 1,2              | 6,07     | 1,77          | 8,9      |
| 9,97·10 <sup>41</sup>     | 7,76·10 <sup>20</sup>       | 7,25·10 <sup>41</sup>      | 1,21          | 6,39     | 1,786         | 9,4      | 1,2              | 6,07     | 1,77          | 8,91     |
| 2,76·10 <sup>42</sup>     | 6,16·10 <sup>21</sup>       | 5,7·10 <sup>42</sup>       | 1,21          | 6,39     | 1,79          | 9,4      | 1,2              | 6,07     | 1,77          | 8,92     |
| 6,76·10 <sup>42</sup>     | 3,76·10 <sup>22</sup>       | 3,46·10 <sup>43</sup>      | 1,21          | 6,39     | 1,79          | 9,4      | 1,2              | 6,07     | 1,77          | 8,92     |
| 1,55·10 <sup>43</sup>     | 2·10 <sup>23</sup>          | 1,84·10 <sup>44</sup>      | 1,21          | 6,39     | 1,79          | 9,4      | 1,2              | 6,07     | 1,77          | 8,92     |
| 3,45·10 <sup>43</sup>     | 1,1·10 <sup>24</sup>        | 9,15·10 <sup>44</sup>      | 1,21          | 6,39     | 1,79          | 9,4      | 1,2              | 6,07     | 1,77          | 8,92     |
| 1,62·10 <sup>44</sup>     | 2,22·10 <sup>25</sup>       | 2,03·10 <sup>46</sup>      | 1,21          | 6,39     | 1,79          | 9,4      | 1,2              | 6,07     | 1,77          | 8,92     |
| 3,46·10 <sup>44</sup>     | 1,03·10 <sup>26</sup>       | 9,3·10 <sup>46</sup>       | 1,21          | 6,39     | 1,79          | 9,4      | 1,2              | 6,07     | 1,77          | 8,92     |

Аналогичным путем можно рассчитать параметры кваркового звездного ядра, предложенного нами и рассмотренного затем рядом авторов [7].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Амбрацумян В. А., Саакян Г. С. «Астрономический журнал», 37, 193, 1960; 38, 785, 1961; 38, 1016, 1961.
2. Gerlach V. Phys. Rev., 172, 1325, 1968.
3. Heintzmann H., Hillebrandt W. Astron. Astrophys., 7, 443, 1970.
4. Heintzmann H. Astron. Astrophys., 3, 243, 1969.
5. Саакян Г. С., Варганян Ю. Л. Сообщения Бюраканской обсерватории, т. 33, 55, 1963.
6. Иваненко Д. Д., Курдгелайдзе Д. Ф. «Астрофизика», 1, 479, 1965.
7. Максюков Н. И. «Изв. вузов», физика, 3, 11, 1974.

Поступила в редакцию  
3.1 1973 г.

Кафедра  
теоретической физики