ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Ֆիզիկա-մաթեմատ. գիտություններ XIV, № 5, 1961 Физико-математические науки

АСТРОФИЗИКА

Г. С. Саакян и Д. М. Седракян

К теории гиперонных конфигураций звездных масс

В работе [1] было показано, что если в сверхплотных конфигурациях, ранее известных под названием нейтронных звезд [2, 3], плотность вещества более чем в три раза превышает плотность в атомных ядрах, то в их „химическом" составе происходят коренные изменения. А именно, в звезде появляются гипероны и μ^--мезоны. Эти конфигурации звездных масс названы гиперонными звездами. Далее, в работе [4] было произведено детальное исследование внутреннего строения гиперонных конфигураций. Было показано, что гиперонная звезда состоит из трех основных областей: „гиперонного ядра", „нейтронного слоя" и „наружной оболочки". Гиперонное ядро состоит из газа барионов, в котором численно преобладают гипероны (концентрации разного типа барионов — величины одинакового порядка), имеются также в сравнительно небольшом количестве электроны и μ^--мезоны. Нейтронный слой состоит преимущественно из нейтронов. Имеются также протоны и электроны, но концентрация их приблизительно на три порядка меньше концентраций нейтронов. В наружной оболочке вещество находится приблизительно в таком состоянии как в белых карликах, т. е. состоит из голых ядер и свободных электронов, а у самой поверхности из атомов. Масса звезды в основном образуется за счет гиперонного ядра и нейтронного слоя. Что касается наружной оболочки, то она фактически не дает никакого вклада в массу. Радиус гиперонного ядра больше толщины нейтронного слоя, а последняя больше толщины наружного слоя.

Вопросы о размерах и массе наружной оболочки гиперонных звезд не были исследованы в работах [1, 4]. В этой заметке мы займемся вычислением этих параметров звезды. Размеры и масса наружной области могут быть получены путем интегрирования следующих дифференциальных уравнений [3, 4]

$$\frac{du}{dr} = \frac{4\pi}{c^2} \cdot r^2 \cdot \rho(r),$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{(P+\rho)}{r\left(\frac{c^2}{k} r - 2u\right)} \left(u + \frac{4\pi}{c^2} P r^3\right). \tag{1}$$

где ρ — плотность материи, P — давление, $u(r)$ для рассматриваемой области с большой точностью является массой центральной сферы радиуса r, c — скорость света, а k — гравитационная константа. Эти уравнения, на протяжении внутренних областей, возможно интегрировать только численным способом. Однако, в случае наружной оболочки положение дел значительно лучше. Здесь уравнения допускают некоторые упрощения, после чего удается найти достаточно точные аналитические решения.

Для интегрирования системы уравнений (1), прежде всего необходимо иметь уравнение состояния вещества. В рассматриваемой области звезды мы имеем дело с газом, состоящим из голых ядер и свободных электронов. Очевидно, в таких физических условиях плотность энергии вещества определяется ядрами, а давление — электронами. Поэтому для плотности энергии имеем

$$\rho = mc^2 \frac{N_e}{Z}, \tag{2}$$

где m и Z — соответственно масса и заряд ядра, а N_e — плотность электронов. Следуя работе [4], мы предполагаем, что температура звезды равна нулю. Поэтому мы имеем дело с полностью вырожденным электронным газом (вообще говоря это предположение необязательно).

Пусть p-граничный импульс Ферми для электронов. Тогда, введя обозначение

$$\frac{p}{m_e c} = x,$$

уравнение состояния можно написать в следующем параметрическом виде

$$\rho = \frac{32}{3} \frac{m}{Z m_e} K_e x^3,$$

$$P = \frac{4}{3} K_e \left[x(2x^2-3)\sqrt{1+x^2} + 3\ln\left(x+\sqrt{1+x^2}\right)\right], \tag{3}$$

где

$$K_e = \frac{m_e^4 c^5}{32\pi^2 h^3}.$$

Очевидно, отношение m к Z должно быть порядка удвоенной массы нуклона. Ниже мы примем $\frac{m}{Z} = 2m_n$, где m_n-масса нейтрона.

Нам остается задать начальные условия. В качестве начальных условий следует принять

$$u(R) = M, \quad x(R) = x_0. \tag{4}$$

Здесь R и M-соответственно радиус и масса внутренней сферы, где материя состоит преимущественно из барионного газа (гиперонное ядро и нейтронный слой). С достаточным приближением [4] эти величины совпадают с радиусом и массой звезды, x_0 есть значение параметра $x = \frac{p}{m_e c}$ на наружной поверхности нейтронного слоя.

Конечно, резкой границы между наружным и нейтронным слоями не существует. На самом деле имеется некоторая промежуточная область, где порциальные давления электронного и нейтронного газов одинакового порядка величины. В этой промежуточной области концентрация нейтронов заметно превышает концентрацию электронов. Масса и размеры ее даже больше соответствующих величин для наружной области. Ниже, в качестве границы между нейтронным и наружным слоями мы будем подразумевать ту поверхность, на которой порциальные давления электронного и нейтронного газов равны

$$P_e = P_n. \tag{5}$$

Решив уравнение (5), получаем, что на границе раздела нейтронного и наружного слоев концентрация нейтронов $N_n \approx 5{,}3 \cdot 10^{32}\, см^{-3}$, а концентрация электронов $N_e \approx 10^{31}\, см^{-3}$. Этой концентрации электронов соответствует граничный импульс Ферми $cp \approx 1{,}3$ *мев*. Следовательно, $x_0 = 2{,}6$, давление $P_0 = 4{,}91 \cdot 10^{24}$ *эрг. см*$^{-3}$ и плотность энергии $\rho_0 = 3{,}13 \cdot 10^{27}$ *эрг. см*$^{-3}$. Исходя из начальных условий (4), мы должны уравнения (1) интегрировать до расстояния $r = R + l$, где давление обращается в нуль $P(R+l) = 0$. Тогда полученное значение l будет толщиною наружного слоя, $u\,(R+l)$ — массой всей звезды.

Уравнения (1) легко интегрируются, если учесть, что в рассматриваемой области звезды

$$P \ll \rho, \quad \frac{4\pi}{c^2} r^3 P \ll u.$$

Введя обозначение $u - M = v$ и отбрасывая малые члены, уравнение (1) мы можем представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dr} &= \frac{4\pi}{c^2} r^2 \rho(r), \\ \frac{dP}{dr} &= -\frac{r_0}{2} \frac{\rho(r)}{r(r - r_0)}, \end{aligned} \tag{6}$$

где $r_0 = \frac{2Mk}{c^2}$ — гравитационный радиус звезды. Укажем, что в левой части второго уравнения $u(r)$ заменено через массу звезды M, что является хорошим приближением.

Подставив выражения плотности энергии и давления из (3) в (6), получим

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dr} &= \frac{4\pi}{c^2} A r^2 x^3, \\ \frac{dx}{dr} &= -\frac{A r_0}{16B} \frac{(1 + x^2)^{1/2}}{x r (r - r_0)}. \end{aligned} \tag{7}$$

где

$$A=\frac{64}{3}\frac{m_n}{m_e}K_e=1{,}78\cdot 10^{26}\ \textit{эрг}\cdot\textit{см}^{-3};\qquad B=\frac{4}{3}K_e=6{,}04\cdot 10^{23}\ \textit{эрг}\cdot\textit{см}^{-3}.$$

Интегрирование второго уравнения дает

$$\sqrt{1+x^2}-\sqrt{1+x_0^2}=\frac{A}{16B}\left[\ln\left(1-\frac{r_0}{R}\right)-\ln\left(1-\frac{r}{R}\right)\right]\cdot \tag{8}$$

Таблица 1

Наиболее важные параметры гиперонных конфигураций звездных масс, состоящих из идеального газа элементарных частиц

$\varepsilon(0)$ *г/см*^{3}	$M/\odot$	ΔM *г*	R *км*	l *м*	$\varepsilon(0)$ *г/см*^{3}	$M/\odot$	ΔM *г*	R *км*	l *м*
$1.0\cdot 10^{14}$	0.306	$3.14\cdot 10^{25}$	21,1	492,7	$3.62\cdot 10^{16}$	0,450	$6.45\cdot 10^{23}$	9,18	54,5
$2.24\cdot 10^{14}$	0.411	$1,27\cdot 10^{25}$	18,4	264,6	$8,29\cdot 10^{16}$	0.329	$5.63\cdot 10^{23}$	8,14	60.8
$3,62\cdot 10^{14}$	0,460	$6,27\cdot 10^{24}$	16,0	174,3	$3,45\cdot 10^{17}$	0,228	$4.38\cdot 10^{24}$	6,93	65,2
$6.6\cdot 10^{14}$	0,557	$2.38\cdot 10^{24}$	14,6	116,8	$1.15\cdot 10^{18}$	0,177	$8,61\cdot 10^{23}$	7,63	104.5
$2,34\cdot 10^{15}$	0.634	$9.17\cdot 10^{23}$	11,0	54,0	$3.39\cdot 10^{18}$	0.220	$2.52\cdot 10^{24}$	10.5	161.5
$5,92\cdot 10^{15}$	0,578	$7,7\cdot 10^{23}$	10.3	52,1	∞	0.324	$2,08\cdot 10^{24}$	11,1	117.9
$1,09\cdot 10^{16}$	0.519	$6,66\cdot 10^{23}$	9,63	51.3					

Таблица 2

Наиболее важные параметры гиперонных конфигураций звездных масс, состоящих из реального газа элементарных частиц

$\varepsilon(0)$ *г/см*^{3}	$M/\odot$	ΔM *г*	R *км*	l *м*	$\varepsilon(0)$ *г/см*^{3}	$M/\odot$	ΔM *г*	R *км*	l *м*
$1,12\cdot 10^{15}$	0,715	$1.92\cdot 10^{24}$	12,2	58.3	$1.38\cdot 10^{17}$	0,673	$1.62\cdot 10^{22}$	4.5	5,74
$1.44\cdot 10^{15}$	0,760	$1,04\cdot 10^{24}$	11,7	49.8	$5.46\cdot 10^{17}$	0.666	$2.07\cdot 10^{22}$	4.79	6,92
$2.36\cdot 10^{15}$	0.860	$4.13\cdot 10^{23}$	10,0	29.5	$1.61\cdot 10^{18}$	0,670	$2,44\cdot 10^{22}$	4.9	7,25
$4.31\cdot 10^{15}$	1.007	$1.16\cdot 10^{23}$	8.3	14.5	$7,25\cdot 10^{18}$	0,686	$2.41\cdot 10^{22}$	4.93	7,11
$1.67\cdot 10^{16}$	1,028	$1.77\cdot 10^{22}$	5,4	4.2	$1,55\cdot 10^{21}$	0.686	$2.41\cdot 10^{22}$	4,93	7,11
$5.75\cdot 10^{16}$	0.847	$1.38\cdot 10^{22}$	4.77	4.35	$2,88\cdot 10^{22}$	0.686	$2.41\cdot 10^{22}$	4.93	7,11
$9,68\cdot 10^{16}$	0.777	$1.45\cdot 10^{22}$	4,67	4,86	∞	0,690	$2,43\cdot 10^{22}$	4,95	7.08

Формула (8) вместе с (3) определяет законы убывания плотности энергии и давления как функции расстояния r. Подставив в (8) $x=0$ и $r=R+l$, мы находим толщину наружного слоя

$$l=\frac{r_0}{1-\left(1-\frac{r_0}{R}\right)\exp\left[D\left(\sqrt{x_0^2+1}-1\right)\right]}-R, \tag{9}$$

где

$$D=\frac{16B}{A}=5.44\cdot 10^{-4}.$$

В частности, при $x_0=2{,}6$, имеем $D\left(\sqrt{x_0^2+1}-1\right)\approx 0{,}001$ и, следовательно,

$$l \approx \frac{0{,}001}{r_0/R - 0{,}001}(R - r_0).$$

Перейдем к вычислению массы наружного слоя. Из уравнений (7), исключив dr, находим

$$\frac{dv}{dx} = -\frac{64\pi B}{c^2 r_0} r^3 (r - r_0) \frac{x^4}{\sqrt{1 + x^2}}. \tag{10}$$

Здесь возможно дальнейшее упрощение. В области интегрирования $0 < x < x_0$, множитель $r^3(r - r_0)$ изменяется достаточно медленно, тогда как $\frac{x^4}{\sqrt{1+x^2}}$ испытывает большие изменения. Поэтому при оценке значения массы наружного слоя ΔM, мы можем медленно меняющуюся функцию $r^3(r - r_0)$ заменить ее средним значением и вынести из-под интеграла. Тогда, после интегрирования, получим

$$\Delta M = \frac{8\pi B}{c^2 r_0} r_1^3 (r_1 - r_0)\left\{x_0 (2x_0^2 - 3)\sqrt{x_0^2 + 1} + 3 \ln\left(x_0 + \sqrt{x_0^2 + 1}\right)\right\}, \tag{11}$$

где $r_1 = R + l/2$ — среднее значение r.

В таблицах I и 2 приведены наиболее важные параметры гиперонных конфигураций, состоящих из идеального и реального газов барионов. В них $\varepsilon(0) = \rho(0)/c^2$ есть плотность массы в центре звезды. Значения радиуса R и массы M барионного ядра (т. е. центральной сферы, охватывающей гиперонное ядро и нейтронный слой) взяты из работы [4]. Массы конфигураций даны в единицах массы Солнца, а массы наружных оболочек — в граммах.

Авторы признательны академику В. А. Амбарцумяну за ценные замечания.

Ереванский государственный
университет

Поступила 3 VII 1961

Գ. Ս. Սահակյան, Դ. Մ. Սեդրակյան

ԱՍՏՂԱՅԻՆ ԶԱՆԳՎԱԾՆԵՐԻ ՀԻՊԵՐՈՆԱՅԻՆ ԿՈՆՖԻԳՈՒՐԱՑԻԱՆԵՐԻ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՇՈՒՐՋԸ

ԱՄՓՈՓՈՒՄ

Աշխատության մեջ հետազոտված է աստղային զանգվածների հիպերոնային կոնֆիգուրացիաների արտաքին շերտը։ Ինտեգրված են հավասարակշռության հավասարումները արտաքին շերտի համար։ Ինտեգրման հետևանքով ստացվել են՝ ճնշման և էներգիայի խտության նվազման օրենքները, ինչպես նաև արտաքին շերտի հաստությունն ու զանգվածը։

Արտաքին շերտի հաստությունը իդեալական բարիոնային գազից բաղկացած կոնֆիգուրացիաների համար գտնվում է 50-ից մինչև 500 մ սահման-

ներում, իսկ ռեալ բարիոնային գազից բաղկացած կոնֆիգուրացիաների համար՝ 5-ից մինչև 60 կմ սահմաններում:

Աստղի այդ շերտի զանգվածը, համեմատած ամբողջ կոնֆիգուրացիայի զանգվածի հետ, չափազանց փոքր է՝ այն $10^{22}-10^{25}$ գ կարգի թիվ է:

ЛИТЕРАТУРА

1. *Амбарцумян В. А.* и *Саакян Г. С.* О вырожденном сверхплотном газе элементарных частиц. „Астрон. Ж." 37, 193, 1960.
2. *Ландау Л. Д.* Origin of steller energy. „Nature", 141, 333, 1938.
3. *Oppenheimer J. R.* and *Volkoff C. M.* On Massive Neutron Cores. „Phys. Rev." 55, 374, 1939.
4. *Амбарцумян В. А.* и *Саакян Г. С.* О равновесных конфигурациях сверхплотных вырожденных газовых масс. „Астрон. ж." в печати, 1961 г.