

УДК: 524.3-335.3

## О СТРУКТУРЕ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ САМОСВЯЗАННОЙ КВАРКОВОЙ МАТЕРИИ

Г.С.АДЖЯН

Поступила 26 января 2001

Принята к печати 15 мая 2001

В рамках модели мешка МИТ определены распределения электронов и электрического потенциала у свободной поверхности странной кварковой материи. Показано, что при учете  $\beta$ -распада околоповерхностных кварков из-за вылета электронов наружу плотность электрического заряда кварков на поверхности увеличивается в  $17 + 25$  раз, толщина переходного слоя уменьшается от значения  $230 \text{ Фм}$  до  $15 \text{ Фм}$ , а напряженность поля возрастает в  $1.7$  раза. Разница химпотенциалов электронов на поверхности и в глубоких слоях уменьшается от значения  $7 \text{ МэВ}$  до  $0.8 \text{ МэВ}$ , что увеличивает предельно допустимую плотность обычной материи над странной кварковой звездой.

1. *Введение.* Развитие теории ядерной материи привело к гипотезе о существовании пионного конденсата [1], а в дальнейшем - странной кварковой материи (далее СКМ) [2], которая состоит из почти равных количеств  $u$ ,  $d$ ,  $s$  кварков, электрический заряд которых нейтрализуется электронами или позитронами [3]. В зависимости от численных значений физических констант теории, которые в настоящее время определены довольно грубо, СКМ может быть более связанной, чем материя обычных атомных ядер.

У свободной поверхности такой материи плотность резко падает от сверхплотных значений до нуля, а из-за частичного вылета электронов (позитронов) наружу образуется тонкий заряженный слой, поле которого в случае электронной нейтрализации кваркового электрического заряда препятствует проникновению обычных атомных ядер в СКМ. Это делает возможным практически бесконечно долгое сосуществование обычного звездного вещества и СКМ в непосредственном соприкосновении [4].

Распределение электронов и структура электростатического поля у поверхности сверхплотной самоудерживающейся ядерной материи изучено в работах [5,6] для пионных ядер и в [4,7] для СКМ. В этих работах принято, что после частичного вылета околоповерхностных электронов наружу адронная составляющая не перестраивается, и методом Томаса-Ферми найдены распределение электронов и потенциал электростатического поля. При этом предположении толщины заряженного кваркового слоя и наружного электронного облака оказываются соответственно порядка  $300 \text{ Фм}$  и  $1000 \text{ Фм}$ .

Изучение свойств СКМ имеет важное значение для физики сверхплотных небесных тел. Именно в таких звездах может образоваться и проявить себя кварковая материя. В частности, возможно существование новой ветви сверхплотных объектов - странных звезд, принципиально отличных от обычных нейтронных звезд [4,8,9]. В [10] показано, что поверхность горячей голый странной звезды испускает электрон-позитронные пары.

В предлагаемой работе определяются распределение электронов и потенциал электрического поля у свободной поверхности самоудерживающейся странной кварковой материи с учетом ее перестройки из-за  $\beta$ -распада  $d$ ,  $s$  - кварков.

2. *Основные уравнения.* Как для кварковых странных ядер, тем более и для странной кварковой звезды, толщина заряженного поверхностного слоя  $l$  очень мала по отношению к кривизне поверхности. Поэтому рассмотрим одномерный случай. У обычных ядер плотность барионов по всему ядру почти постоянна и только в поверхностном слое толщиной  $\sim 2.5$  Фм непрерывно падает до нуля. Далее мы предполагаем, что аналогичная толщина для кваркового случая -  $l_q$  не больше этой величины. Если  $l \gg l_q$ , то изменение плотности кварков у поверхности в первом приближении можно считать скачкообразным. С другой стороны, рост давления и плотности в поверхностном слое толщиной несколько тысяч ферми из-за гравитационного притяжения настолько мал, что этим взаимодействием можно пренебречь и в этих "глубоких" слоях считать давление равным нулю.

Пусть в декартовой системе координат полупространство  $x \leq 0$  заполнено самоудерживающейся странной кварковой материей. В достаточно глубоких слоях ( $|x| \gg l$ ) вещество электронейтрально и имеет нулевое давление. Только у самой поверхности, в области  $x \leq l$  часть электронов вылетит в пространство  $x > 0$ , образуя электронное облако.

Введем следующие обозначения:  $e$  - абсолютное значение заряда электрона;  $n_i$ ,  $e \cdot q_i$ ,  $\mu_i$  - концентрация, электрический заряд и химический потенциал  $i$ -го типа частицы соответственно;  $V$  - электрический потенциал, умноженный на  $e$  (далее потенциал);  $V_{surf}$  - значение  $V$  на поверхности (в точке  $x = 0$ ).

Все параметры при нулевом давлении ( $x = -\infty$ ) обозначим дополнительным индексом нуль, а на поверхности ( $x = 0$ ) - индексом surf.

Потенциал  $V$  определяется уравнением Пуассона

$$\begin{aligned} V'' &= -4\pi e^2 (q_u n_u + q_d n_d + q_s n_s + q_e n_e), \\ q_e &= -1, \quad q_u = 2/3, \quad q_d = q_s = -1/3, \end{aligned} \quad (1)$$

с граничными условиями

$$V|_{x=-\infty} = V'|_{x=-\infty} = 0 \quad (2)$$

(поле в бесконечности отсутствует, т.к. система в целом электронейтральна).

Выберем также нулевое значение потенциала в бесконечности

$$V|_{x \rightarrow +\infty} = 0, \quad (3)$$

таким образом отождествляя  $V(x)$  с глубиной ямы электростатического поля для электронов в каждой точке  $x$ .

Условия по  $\beta$  - равновесию имеют вид

$$\mu_d = \mu_u + \mu_e, \quad (4)$$

$$\mu_d = \mu_s. \quad (5)$$

Добавляя к (4), (5) условия электронейтральности и нулевого давления, определяем  $n_{0i}$  и  $\mu_{0i}$ . По всей системе для каждой частицы остается постоянным электрохимический потенциал  $\mu_i + q_i V$ , что определяет химпотенциал частиц в любой точке через потенциал  $V(x)$ ,  $V_0$  и через уже известные  $\mu_{0i}$ . Таким образом имеем

$$\left. \begin{aligned} \mu_u(x) &= \mu_{u0} + \frac{2}{3}[V_0 - V(x)], \\ \mu_s(x) &\equiv \mu_d = \mu_{d0} - \frac{1}{3}[V_0 - V(x)], \\ \mu_e(x) &= \mu_{e0} - [V_0 - V(x)]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Следуя методу Томаса-Ферми, примем, что в каждой точке электронные уровни заполнены до значения  $V(x)$ . Тогда получим

$$\mu_e(x) = V(x) + 1, \quad (7)$$

т.е. в глубоких слоях, где  $\mu_e \gg 1$ , имеем  $V(x) = V_0 = \mu_{0e}$ .

Концентрации однозначно определяются через химпотенциалы

$$n_i = n_i(\mu_i). \quad (8)$$

В области  $x > 0$ , где имеются только электроны, уравнение (1) принимает простой вид [1]

$$V'' = \frac{4e^2}{3\pi} (V^2 + 2V)^{3/2}. \quad (9)$$

Здесь и в дальнейшем использована система единиц, где масса электрона  $m_e$ , скорость света  $c$  и постоянная Планка  $\hbar$  равны единице.

Таким образом, уравнения (1), (2), (3) и (6), (8) однозначно определяют функцию  $V(x)$ .

3. *Решение задачи* проведено в рамках модели мешка СКМ. Согласно которой, массы  $u$ ,  $d$  кварков пренебрегаются, кварк-глюонное взаимодействие учитывается в первом порядке по константе взаимодействия  $\alpha_c$ .

Согласно этой модели, термодинамические потенциалы  $\Omega_i$ , давление  $P$  и плотность энергии  $\varepsilon$  определяются по формулам [3]

$$n_i = -\frac{d\Omega_i}{d\mu_i} = -\mu_i^3 (1 - 2\alpha_c/\pi) / \pi^2, \quad i = u, d,$$

$$n_s = -\frac{d\Omega_s}{d\mu_s} = \frac{\mu_s^2 - m_s^2}{\pi^2} \times$$

$$\times \left( (\mu_s^2 - m_s^2)^{1/2} - \frac{2\alpha_c}{\pi} \left( \mu_s - \frac{3m_s^2}{(\mu_s^2 - m_s^2)^{1/2}} \ln \left( \frac{\mu_s + (\mu_s^2 - m_s^2)^{1/2}}{\rho} \right) \right) \right)$$

$$n_e = \mu_e^3/3\pi^2, \quad P = -\sum_i \Omega_i - B, \quad \varepsilon = \sum_i (\Omega_i + \mu_i n_i) + B,$$

где  $m_s$  - масса  $s$  - кварка,  $B$  - параметр мешка,  $\rho = 313$  МэВ - перенормировочный коэффициент для массы  $s$  - кварка. Именно с неопределенностью численных значений этих величин и связано обстоятельство, упомянутое во введении.

Для определенности рассмотрим те численные значения этих констант, для которых электронейтральность обеспечивается электронами. Т.к. они ультрарелятивистские ( $V \gg 1$ ), то решение (9) имеет простой вид:

$$V(x) = V_{surf} / (1 + \sqrt{2/3\pi} V_{surf} x). \quad (10)$$

Условия непрерывности потенциала и напряженности вместе с (10) связывают производную  $V'$  на поверхности с значением  $V_{surf}$ :

$$V'_{surf} = -\sqrt{2/3\pi} V_{surf}^2, \quad (11)$$

которая является граничным условием для (1) в точке  $x=0$ .

Уравнение (1) решается численно методом Рунге-Куты 8-го порядка. Интегрирование начинается с точки  $x=0$  с таким значением  $V_{surf}$ , для которого обеспечивается монотонное стремление  $V$  к  $V_0 = \mu_{e0}$  при достаточно больших  $x$  (тысячи ферми).

4. *Результаты расчетов* приведены в табл.1 и на рис.1 (вариант б). С целью сравнения приводятся также соответствующие численные значения

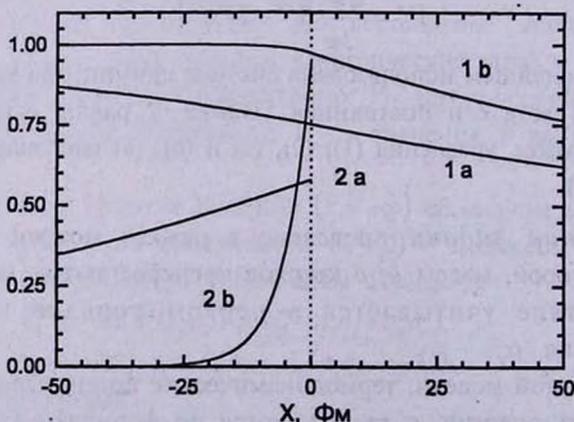


Рис.1. Координатные зависимости потенциала  $V/V_0$  (кривые 1a, 1b), и некомпенсированного электрического заряда  $(\rho^+ - \rho^-)/\rho^+_{surf}$  (кривые 2a, 2b). Варианты а и б - без учета и с учетом перестройки кварков при вылете электронов наружу, соответственно. Кварковая материя заполняет область  $x \leq 0$ .

и зависимости физических параметров для модели без учета перестройки кварков (вариант а).

На рис.1 для набора  $\alpha_c = 0.15$ ,  $m_s = 200$  МэВ,  $B = 60$  МэВ Фм<sup>-3</sup> приводятся координатные зависимости потенциала и плотности некомпенсированного положительного электрического заряда -  $(\rho^+ - \rho^-)/\rho_{surf}^+$  в области  $-50$  Фм  $\leq x \leq 50$  Фм ( $\rho^+$  и  $\rho^-$  - плотности положительных и отрицательных зарядов соответственно). Как видим,  $\beta$  - распад кварков, как и ожидалось, качественно не меняет картину, однако, есть существенные количественные различия: резко сужается толщина переходного кваркового слоя и сильно увеличивается плотность положительного заряда.

Таблица 1

ЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОКОЛОПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯЖЕННОГО СЛОЯ СТРАННОЙ КВАРКОВОЙ МАТЕРИИ\*

	$V_0$ МэВ	$V_0 - V_{surf}$ МэВ	$E_{surf}$ В/см	$\rho_{surf}^+ / \rho_0^+$	$\frac{\rho_{surf}^+ - \rho_{surf}^-}{\rho_{surf}^+}$	$\frac{n_0 - n_{surf}}{n_0}$	$l$ Фм	$L$ Фм
$\alpha_c = 0.15$ , $m_s = 200$ МэВ, $B = 60$ МэВ/Фм <sup>3</sup>								
а	28.09	7.02	$8.9 \cdot 10^{17}$	1	0.58	0	230	1100
б	28.09	0.76	$1.5 \cdot 10^{18}$	17	0.95	$1.8 \cdot 10^{-4}$	15	820
$\alpha_c = 0.05$ , $m_s = 150$ МэВ, $B = 50$ МэВ/Фм <sup>3</sup>								
а	18.87	4.72	$4.0 \cdot 10^{17}$	1	0.58	0	340	1600
б	18.87	0.37	$6.8 \cdot 10^{17}$	25	0.96	$6.1 \cdot 10^{-5}$	16	1200

\* Варианты а и б - результаты расчетов без учета и с учетом перестройки кварков при вылете электронов наружу соответственно,  $E$  напряженность электрического поля,  $\rho^+$ ,  $\rho^-$  - плотности положительных и отрицательных электрических зарядов,  $n = (n_s + n_d + n_l)/3$  - плотность барионного заряда.

Размеры областей, где сосредоточены 95% некомпенсированных положительных и отрицательных электрических зарядов, примем за численные значения толщин переходного кваркового слоя  $l$  и внешнего электронного облака  $L$ . Как видно из табл.1, толщина заряженного кваркового слоя  $l$  вследствие  $\beta$  - процессов уменьшается на порядок ( $\sim 15$  Фм). Однако условие  $l \gg l_q$ , тем не менее, выполняется, и учет тонкого переходного кваркового слоя у самой поверхности обоснован.

Если не учитывается перестройка кварков у поверхности, то  $V_{surf} = 3V_0/4$  [4]. Однако  $\beta$  - распад  $d$  и  $s$  кварков заполняет среду "новыми" электронами взамен вылетевших, тем самым препятствуя уменьшению химпотенциала электронов (см. рис.1, кривая 1б). Этот результат полностью соответствует принципу Ле Шателье-Брауна. Фактически, плотность электронов в СКМ почти не меняется. При этом плотность кваркового электрического заряда

на поверхности  $\rho_{surf}^+$  увеличивается соответственно в 17 и 25 раз для рассмотренных наборов значений  $\alpha_c, m_s, B$ .

В переходном слое кварков плотность СКМ становится меньше значения плотности в глубоких слоях на  $0.01 \div 0.02\%$ .

Легко увидеть, что полный заряд внешних электронов  $Q$  над единичной площадью равен  $-V_{surf}^2 / 2\pi\sqrt{6\pi}$ , а толщина облака  $L$  выражается через значение потенциала на поверхности СКМ:  $L = \sqrt{30\pi}/eV_{surf}$ . Несмотря на то, что при  $\beta$  - распаде кварков число вылетевших электронов увеличивается, из-за чего концентрация электронов везде возрастает, толщина этого условного слоя уменьшается. Этот странный, на первый взгляд, результат легко объясним. При  $\beta$  - распаде увеличивается абсолютный заряд с обеих сторон поверхности, тем самым увеличивая напряженность поля (см. табл.1), что делает систему относительно более компактной.

Наличие сильного электрического поля у поверхности странной звезды делает возможным существование двухслойных сверхплотных небесных тел [4] - странных звезд, окруженных обычной вырожденной электронно-ядерной плазмой. Максимальная плотность вещества внешней оболочки  $\rho_{cr}$  может достичь значения  $\rho_{drip} \approx 4 \cdot 10^{11}$  г/см<sup>3</sup> (плотность начала вылета нейтронов из атомных ядер). Свободный переход нейтронов в кварковую фазу делает невозможным сосуществование обычной вырожденной звездной материи большей плотности, чем  $\rho_{drip}$  с СКМ. Однако это предельное значение может быть еще ниже, если  $V_{surf} < \mu_e(\rho_{drip}) \approx 23$  МэВ - химпотенциал электронов в вырожденной электронно-ядерной плазме при плотности  $\rho_{drip}$ . Тогда  $\rho_{cr}$  определится из условия  $\mu_e(\rho_{cr}) = V_{surf}$  - когда разделяющий заряженный слой исчезает вовсе. Так как учет перестройки кварков увеличивает значение потенциала  $V_{surf}$  почти на 25%, то ясно, что увеличивается и максимальное значение плотности оболочки из обычной вырожденной материи. Наличие такой оболочки у странных звезд малой массы приводит к сильному увеличению радиуса звезды (несколько сот километров) [11], что облегчает их наблюдение как промежуточных объектов на диаграмме Герцшпрунга-Рессела между белыми карликами и нейтронными звездами.

Выражаю благодарность проф. Ю.Л.Вартаняну и участникам семинара кафедры теории волновых процессов за обсуждение результатов работы.

Данная работа проделана в рамках темы 2000-55, поддержанной Министерством высшего образования и науки Республики Армения.

Ереванский государственный университет,  
Армения

ON THE STRUCTURE OF THE FREE SURFACE OF  
SELF-BINDING QUARK MATTER

G.S.HAJYAN

Within the framework of MIT bag model the distributions of the electrons and electrical potential at the free surface of the strange quark matter have been determined. It has been shown that in consideration of the  $\beta$  - decay of near-surface quarks due to emission of electrons the density of electrical charge of quarks at the surface increases 17-25 times. The thickness of transitional layer decreases from 230 Fm to 15 Fm and the field increases 1.7 times. The difference between chemical potentials of electrons at the surface and in the deep layers decreases from 7 MeV to 0.8 MeV which increases the maximum possible density of ordinary matter over the strange quark star.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *А.В.Мигдал*, Фермионы и бозоны в сильных полях, Наука, М., 1978.
2. *E.Witten*, Phys. Rev., D.30, 272, 1984.
3. *E.Farhi, R.L.Jaffe*, Phys. Rev., D30, 2279, 1984.
4. *S.Alcock, E.Farhi, A.Olinto*, Astrophys. J., 310, 261, 1986.
5. *Д.Н.Воскресенский, Г.А.Сорокин, А.И.Черноуцан*, Письма в ЖЭТФ, 25, 495, 1977.
6. *Г.С.Аджян, Э.А.Айрян, А.С.Арутюнян, Ю.Л.Вартанян*, Препринт ЕФИ, 390 (48)-79, Изв. АН Арм. ССР, 15, 193, 1980.
7. *Ch.Kettner, F.Weber, M.K.Weigel*, Phys. Rev., D51, 1440, 1995.
8. *P.Haensel, J.Zdunik, R.Schaeffer*, Astron. Astrophys., 160, 121, 1986.
9. *Ю.Л.Вартанян, А.Р.Арутюнян, А.К.Григорян*, Астрофизика, 37, 499, 1994. Письма в Астрон. ж., 21, 136, 1995.
10. *V.V.Usov*, Phys. Rev. Lett., 80, 230, 1998.
11. *Ю.Л.Вартанян, А.К.Григорян*, Астрофизика, 44, вып. 3, 2001 (в печати).