

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

ЭЛЕКТРОНЫ В КВАРКОВОЙ ПЛАЗМЕ

Витен [1] рассмотрел барионную плазму при плотностях выше порога рождения кварков, когда все кварки ультрарелятивистские и можно пренебречь их массой. Было показано, что странная кварковая материя (SQM), состоящая из u , d , s кварков, энергетически более выгодно, чем нестранная кварковая материя (NQM), состоящая из u , d кварков. При этом не была учтена возможность наличия электронов в кварковой плазме. Ниже показано, что учет электронов не изменяет основной вывод [1]. Этот результат не очевиден, т.к. в вырожденной барионной плазме относительные концентрации частиц определяются из условий β равновесия и электронейтральности.

Для сравнения напомним вкратце ситуацию в случае нуклонной плазмы, из которой состоят нейтронные звезды, содержащие в основном вырожденные нейтроны и небольшую долю протонов и равное им количество электронов. Из условия химического равновесия при β процессах имеем

$$\mu_n = \mu_p + \mu_e, \quad (1)$$

где μ_n , μ_p и μ_e - химические потенциалы (энергии ферми) нейтрона, протона и электрона. Воспользуемся также условием электронейтральности

$$n_p = n_e, \quad (2)$$

где n_p и n_e - концентрации протонов и электронов. Концентрация нуклонов в атомных ядрах $n_0 = 0.17 f_m^{-3}$ и нуклоны нерелятивистские, для них $x_n = p_n/m_n c = 0.3$, где p_n - импульс Ферми нейтронов, m_n - их масса, c - скорость света. В этом случае из (1) и (2) для отношения концентраций протонов n_p и нейтронов n_n имеем

$$n_p/n_n = (1/8)x_n^3 \approx 3 \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

откуда следует, что вещество нейтронных звезд при ядерной плотности в основном состоит из вырожденных нейтронов. Ситуация изменяется при сверхядерных плотностях, когда не только электроны, но и нуклоны крайне релятивистские ($x_i \gg 1$, $i = e, p, n$). В этом случае, если не учесть возможность наличия гиперонов [2], хоть и нейтроны снова превалируют, относительное число электронов и протонов увеличивается

$$n_e/n_n = n_p/n_n = 1/8. \quad (4)$$

Таким образом, сверхплотное ядерное вещество в нейтронных звездах в основном состоит из нейтральной компоненты - нейтронов, откуда и их название [3]. Покажем, что в кварковом веществе, которое может образоваться как при катастрофических процессах типа взрыва сверхновых, так и иметь реликтовое происхождение, концентрация электронов также незначительна.

Рассмотрим сперва нестранное кварковое вещество NQM, состоящее из u , d кварков и электронов. Примем, что все частицы ультрарелятивистские. Для определения их концентраций n_u , n_d , n_e снова воспользуемся условием β равновесия, которое в этом случае запишется через химические потенциалы u , d кварков и электронов

$$\mu_d = \mu_u + \mu_e, \quad (5)$$

и условием электронейтральности

$$\frac{2}{3}n_u = \frac{1}{3}n_d + n_e. \quad (6)$$

Имея в виду связь импульсов Ферми u , d кварков и электронов с их концентрациями

$$p_d = an_d^{1/3}, \quad p_u = an_u^{1/3}, \quad p_e = 3^{1/3} an_e^{1/3}, \quad a = (\pi^2)^{1/3} \hbar \quad (7)$$

из (3) и (4) для отношения концентраций u , d кварков

$$t = (n_d/n_u)^{1/3}, \quad (8)$$

получим соотношение

$$2t^3 - 3t^2 + 3t - 3 = 0, \quad (9)$$

решение которого

$$t = 1.256. \quad (10)$$

С учетом (10) в NQM имеем

$$n_d = 1.984 n_u, \quad n_e = 5.3 \cdot 10^{-3} n_u. \quad (11)$$

Таким образом, в ude плазме концентрация электронов на три порядка меньше концентрации кварков. И это в то время, как в ультрарелятивистской нуклонной плазме, как следует из (4), концентрация электронов и протонов лишь в восемь раз меньше концентрации основной компоненты вещества - нейтронов. Это обусловлено двумя обстоятельствами. Во первых, в кварковой плазме в отличие от (4) все три компоненты (ude) заряжены и партнер d кварка по электрическому заряду - электрон, имеет в три раза больший электрический заряд, что уменьшает его концентрацию. В этом направлении также действует и тот факт, что как следует из (7), кварки занимают в три раза больший фазовый объем, чем электроны.

В отличие от NQM в ультрарелятивистской странной кварковой плазме SQM β переходы приводят к возможности наличия электронов только при учете массы странного кварка m_s . Действительно и в этом случае концентрации u , d , s кварков и электронов n_u , n_d , n_s , n_e , как и в случае NQM, определяются из условия электронейтральности

$$\frac{2}{3} n_u = \frac{1}{3} n_d + \frac{1}{3} n_s + n_e \quad (12)$$

и β равновесия

$$\mu_d = \mu_s = \mu_u + \mu_e, \quad (13)$$

где μ_i - химические потенциалы соответствующих частиц. В ультрарелятивистском случае, когда снова можно пренебречь массами u , d кварков и сохранить как малый член m_s^2 , соотношение (13) можно представить через концентрации частиц

$$n_d^{1/3} = n_u^{1/3} + 3^{1/3} n_e^{1/3}, \quad (14)$$

$$n_d^{1/3} = \left[n_s^{2/3} + m_s^2 c^2 / a^2 \right]^{1/2}. \quad (15)$$

Учитывая малость члена $m_s^2 c^2 / (a^2 n_s^{2/3})$, из (15) выразим n_s через n_d

$$n_s \approx n_d \left(1 - 3(m_s c)^2 / (2 a^2 n_d^{2/3}) \right). \quad (16)$$

Для n_e/n_u из (14) имеем

$$n_e/n_u = \frac{1}{3} (t-1)^3, \quad (17)$$

где t , как и в NQM (см. (8)), определяется как $t = (n_d/n_u)^{1/3}$.

Подставляя (16) и (17) в (12), для t получим

$$t^3 - t^2 + (1-\alpha)t - 1 = 0, \quad (18)$$

где α малый параметр, равный

$$\alpha = 1/(2 x_s^2), \quad x_s = p_s / (m_s c). \quad (19)$$

Если в SQM в ультрарелятивистском случае пренебречь массой s кварка ($m_s=0$), то, как следует из (19), $\alpha = 0$. В этом случае из (18) для t имеем $t=1$, откуда следует

$$n_u = n_d = n_s, \quad n_e = 0. \quad (20)$$

В табл.1 приведены решения (18) и соответствующие им значения относительной концентрации электронов n_e/n_u для трех значений параметра x_s .

Таблица 1

x_s	$t-1$	n_e/n_u
3	0.0277	$7.16 \cdot 10^{-6}$
5	0.01	$3.33 \cdot 10^{-7}$
7	0.0051	$4.42 \cdot 10^{-8}$

Из этих результатов видно, что учет массы s кварка приводит не только к возникновению электронов и в релятивистской SQM, но также увеличивает по сравнению с ультрарелятивистским случаем (20), где принято $m_s = 0$, концентрацию d кварка n_d (здесь $t > 1$). Это обусловлено тем обстоятельством, что в данном случае, как следует из (16), уменьшается концентрация странного кварка, который также имеет отрицательный заряд.

В заключение отметим, что небольшая доля электронов хоть и вносит свой вклад в общее давление кварковой плазмы, но изменяет количественную оценку отношения энергии на барион в SQM и NQM, полученную в [1] из условия $n_s = 0$, весьма незначительно.

Electrons in the quark plasma. The influence of β processes on presence of electrons in the quark plasma is investigated.

Key words: *plasma:electron:quark*

20 июня 2012

Ереванский государственный университет,
Армения, e-mail: yuvartanyan@ysu.am

Ю.Л.Вартанян
Yu.L.Vartanyan
Ш.Р.Меликян
Sh.R.Melikyan
А.А.Шагинян
H.A.Shahinyan

ЛИТЕРАТУРА

1. E.Witten, Phys. Rev., D30, 272, 1984.
2. В.А.Амбарцумян, Г.С.Саакян, Астрон. ж., 37, 193, 1960; 38, 785, 1961.
3. J.R.Oppenheimer, G.M.Volkoff, Phys. Rev., 55, 374, 1939.