

А.П. Сулим, магистрант, А.И. Серый, кандидат физико-математических наук  
 УО «Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина», г. Брест

## ПОРОГ НЕЙТРОНИЗАЦИИ ХОЛОДНОГО СВЕРХПЛОТНОГО ВОДОРОДА С УЧЕТОМ КОНТАКТНОГО ЯДЕРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПОТЕНЦИАЛА РИДА

Водород является основным «строительным материалом» в астрофизике, причем в таких объектах, как белые карлики и Сверхновые, он является, как правило, сверхплотным. При высоких плотностях его во многих случаях можно с хорошим приближением считать вырожденным, что существенно упрощает многие теоретические исследования. Одной из важных задач здесь является нахождение значения концентрации протонов  $n_p$  (и электронов  $n_e = n_p$  в силу электронейтральности), при котором начинается нейтронизация водорода. Это становится возможным, когда химический потенциал нейтронов равен сумме химических потенциалов протонов и нейтронов (нейтринным химическим потенциалом пренебрегаем). Уравнение бета-равновесия в общем случае имеет вид

$$E_{Fe} + E_{Fp} = E_{Fn}. \quad (1)$$

В рассматриваемой модели электронно-протонного вещества в приближении крайнего вырождения (это оправдано при высоких плотностях, когда энергия теплового движения  $kT$  мала по сравнению с энергией Ферми  $\varepsilon_F$ ) будем учитывать следующие виды энергий: а) энергию Ферми электронов и протонов; б) энергию покоя электронов, протонов и нейтронов; в) энергию взаимодействия между первым образующимся нейтроном и протонами в контактном приближении (которое допустимо вследствие малости радиуса действия ядерных сил; соответствующие константы определены в [1, с. 31]); г) энергию ядерного взаимодействия между протонами; д) обменную кулоновскую энергию для протонов.

Химические потенциалы электронов и первых образующихся нейтронов выражаются по формулам (с учетом  $n_e = n_p$ ) [2, с. 32, 33]

$$E_{Fe} = \left( m_e^2 c^4 + (3\pi^2 \hbar^3 n_p)^{2/3} c^2 \right)^{1/2}, \quad (2)$$

$$E_{Fn} = m_n c^2 + \left( \frac{g_{np}^{\uparrow\uparrow} + g_{np}^{\uparrow\downarrow}}{2} \right) n_p. \quad (3)$$

Что касается химического потенциала протонов, то в случае, если ядерное взаимодействие между ними считается контактным, химический потенциал протонов можно описать следующим выражением

$$E_{Fp} = \frac{(3\pi^2 n_p)^{2/3} \hbar^2}{2m_p} + m_p c^2 + \frac{g_{pp}}{2} n_p - \frac{e^2}{\pi} (3\pi^2 n_p)^{1/3}. \quad (4)$$

Можно убедиться, что система (1)–(4) имеет два решения –  $n_p = 7,41205 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-3}$  и  $n_p = 4,6284 \cdot 10^{38} \text{ см}^{-3}$ . Следует, однако, отметить, что модель контактного взаимодействия страдает тем недостатком, что в ней не учитывается отталкивание нуклонов на очень малых расстояниях.

Примером потенциала, который это учитывает и описывается непрерывной гладкой функцией, является потенциал Риды [3]

$$U(x) = U_0 \frac{e^{-x}}{x} + U_1 \frac{e^{-4x}}{x} + U_2 \frac{e^{-7x}}{x}, \quad x = \mu r, \quad (5)$$

где  $U_0 = -10,463$  МэВ,  $U_1 = -1650,6$  МэВ,  $U_2 = 6484,3$  МэВ и  $\mu = 0,7$  фм<sup>-1</sup>.

Если в качестве расстояния  $r$  в (5) принять среднее расстояние между протонами, которое равно  $\bar{r} = n_p^{-1/3}$ , то получим

$$U(n_p) = \frac{n_p^{1/3}}{\mu} \left( U_0 \exp(-\mu n_p^{-1/3}) + U_1 \exp(-4\mu n_p^{-1/3}) + U_2 \exp(-7\mu n_p^{-1/3}) \right). \quad (6)$$

Тогда можно переписать выражение для химического потенциала протонов с учетом (6). Заменяя в (4)  $\frac{g_{pp}}{2} n_p$  на (6), получим

$$E_{Fp} = \frac{(3\pi^2 n_p)^{2/3} \hbar^2}{2m_p} + m_p c^2 + U(n_p) - \frac{e^2}{\pi} (3\pi^2 n_p)^{1/3}. \quad (7)$$

Оказывается, что система (1)–(3), (7), в отличие от (1)–(4), имеет только одно решение  $n_p = 7,41171 \cdot 10^{30}$  см<sup>-3</sup>, которое незначительно отличается от первого решения системы (1)–(4). Отсутствие второго решения может быть объяснено тем, что энергия ядерного взаимодействия между протонами, описываемая слагаемым  $g_{pp} n_p / 2$ , всегда соответствует притяжению, что не согласуется с действительностью при малых расстояниях, соответствующих высоким концентрациям. При использовании же потенциала Риды описание взаимодействия между протонами при высоких концентрациях оказывается более корректным, поэтому второе решение не появляется.

### Список использованных источников

1. Серый, А.И. О ферромагнетизме вырожденной нейтронно-протонной системы / А.И. Серый // Веснік Брэсцкага універсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка». – 2012. – № 1. – С. 30–37.
2. Серый, А.И. О некоторых поляризационных эффектах в астрофизической плазме. / А.И. Серый // Веснік Брэсцкага універсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка». – 2014. – № 1. – С. 30 – 43.
3. Симонов, Ю. А. Ядерные силы. / Ю. А. Симонов // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.astronet.ru/db/msg/1189994> – Дата доступа: 07.05.2020.