УДК 539.171

А. И. СЕРЫЙ, А. П. СУЛИМ
Брест, БрГУ имени А. С. Пушкина

РАСЧЕТ ПОРОГА НЕЙТРОНИЗАЦИИ ХОЛОДНОГО СВЕРХПЛОТНОГО ВОДОРОДА С ПОТЕНЦИАЛОМ РИДА

Вопрос о пороге нейтронизации электронно-протонного вещества имеет значение для астрофизики. При его исследовании в рамках модели Ферми-газов учитываются, например, следующие составляющие энергии взаимодействия: 1) ядерная энергия межнуклонного взаимодействия; 2) обменная поправка к энергии кулоновского взаимодействия электронов и протонов. В публикациях [1, с. 30–43; 2, с. 30–37; 3, с. 130–132] межнуклонное взаимодействие учитывалось в приближении длины рассеяния (псевдопотенциал Ферми). Обзор основных результатов, полученных в [1, с. 30–43; 2, с. 30–37], был выполнен в [3, с. 130–132], где были также представлены новые результаты для плотностей порядка ядерного насыщения. В [4, с. 21–22] было показано, что результаты, аналогичные полученным в [3, с. 130–132] для плотностей порядка ядерного насыщения, не появляются при использовании потенциала Рида [5, с. 229–230]. При этом процедура использования потенциала Рида в [4, с. 21–22] заключалась в замене расстояния между нуклонами на их среднее расстояние, которое принималось равным $n_p^{-1/3}$ (n_p – концентрация протонов).

В данной работе будет выполнен расчет порога нейтронизации вырожденного неполяризованного электронно-протонного вещества, в котором потенциал Рида будет учтен более корректно. Выражение для потенциала Рида в синглетном состоянии имеет вид [5, с. 229]

$$U_S(x) = U_0 \frac{e^{-x}}{x} + U_1 \frac{e^{-4x}}{x} + U_2 \frac{e^{-7x}}{x}, \; x = \mu r. \tag{1}$$

При этом r – расстояние между нуклонами, $U_0 = -10{,}463$ МэВ, $U_1 = -1650{,}6$ МэВ, $U_2 = 6484{,}3$ МэВ и $\mu = 0{,}7$ фм$^{-1}$. В триплетном состоянии выражение для потенциала Рида имеет вид (без тензорной и спин-орбитальной частей, которые при пространственном усреднении равны нулю) [5, с. 230]

$$U_T(x) = \tilde{U}_0 \frac{e^{-x}}{x} + \tilde{U}_1 \frac{e^{-2x}}{x} + \tilde{U}_2 \frac{e^{-4x}}{x} + \tilde{U}_3 \frac{e^{-6x}}{x}. \tag{2}$$

При этом $\tilde{U}_0 = U_0$, $\tilde{U}_1 = 105{,}468$ МэВ, $\tilde{U}_2 = -3187{,}8$ МэВ, $\tilde{U}_3 = 9924{,}3$ МэВ. Для описания взаимодействия произвольного протона или появляющегося нейтрона с окружающими протонами пространственное усреднение потенциалов (1) и (2) можно (в силу наличия сферической симметрии) выполнить следующим образом:

$$\overline{U}_S(n_p) = 4\pi n_p \int_0^{+\infty} U_S(x) r^2 dr, \tag{3}$$

$$\overline{U}_T(n_p) = 4\pi n_p \int_0^{+\infty} U_T(x) r^2 dr. \tag{4}$$

Подставляя (1) в (3) и (2) в (4), получаем:

$$\overline{U}_S\left(n_p\right)=\frac{4\pi n_p}{\mu^3}\left(U_0+\frac{U_1}{16}+\frac{U_2}{49}\right), \tag{5}$$

$$\overline{U}_T\left(n_p\right)=\frac{4\pi n_p}{\mu^3}\left(\widetilde{U}_0+\frac{\widetilde{U}_1}{4}+\frac{\widetilde{U}_2}{16}+\frac{\widetilde{U}_3}{36}\right). \tag{6}$$

Уравнение порога нейтронизации имеет вид (E_{Fi} $\left(i=e,p,n\right)$ – химические потенциалы) [1, с. 33]:

$$E_{Fe}+E_{Fp}=E_{Fn}\,. \tag{7}$$

При этом E_{Fi} с учетом обменной электронно-протонной кулоновской энергии и потенциала Рида выражаются по формулам (с учетом $n_p=n_e$)

$$E_{Fe}=\left(m_e^2c^4+\left(3\pi^2\hbar^3n_p\right)^{2/3}c^2\right)^{1/2}-\frac{e^2}{\pi}\left(3\pi^2n_p\right)^{1/3}, \tag{8}$$

$$E_{Fp}=\frac{\left(3\pi^2n_p\right)^{2/3}\hbar^2}{2m_p}+m_pc^2+\frac{1}{4}\overline{U}_S\left(n_p\right)-\frac{e^2}{\pi}\left(3\pi^2n_p\right)^{1/3}, \tag{9}$$

$$E_{Fn}=m_nc^2+\frac{3}{4}\overline{U}_T\left(n_p\right)+\frac{1}{4}\overline{U}_S\left(n_p\right). \tag{10}$$

При этом m_i $\left(i=e,p,n\right)$ – соответствующие массы. Кроме того, учтены статистические веса триплетного и синглетного состояний (триплетное s-состояние для двух протонов запрещено принципом Паули). При подстановке (8)–(10) в (7) энергия ядерного взаимодействия, относящаяся к синглетному состоянию, сокращается, в результате чего получаем:

$$\left(m_e^2c^4+\left(3\pi^2\hbar^3n_p\right)^{2/3}c^2\right)^{1/2}-\frac{2e^2}{\pi}\left(3\pi^2n_p\right)^{1/3}+\frac{\left(3\pi^2n_p\right)^{2/3}\hbar^2}{2m_p}+m_pc^2=$$

$$=m_nc^2+\frac{3\pi n_p}{\mu^3}\left(\widetilde{U}_0+\frac{\widetilde{U}_1}{4}+\frac{\widetilde{U}_2}{16}+\frac{\widetilde{U}_3}{36}\right). \tag{11}$$

Решая численно (11) относительно n_p, для пороговой концентрации протонов (и электронов) получаем два значения: $n_p^{(1)}$ ≈ 7,469·10^{30} см$^{-3}$ и $n_p^{(2)}$ ≈ 1,481·10^{38} см$^{-3}$. Для псевдопотенциала Ферми, который, как и (5), (6), пропорционален n_p, в [3, с. 130–132] было также получено два решения, но значение $n_p^{(2)}$ было несколько выше.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серый, А.И. О некоторых поляризационных эффектах в астрофизической плазме. / А.И. Серый // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 4, Фізіка. Матэматыка. – 2014. – № 1. – С. 30–43.

2. Серый, А.И. О ферромагнетизме вырожденной нейтронно-протонной системы. / А.И. Серый // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 4, Фізіка. Матэматыка. – 2012. – № 1. – С. 30–37.

3. Серый, А.И. Об уравнении бета-равновесия электронно-нуклонной системы при высоких плотностях / А. И. Серый, А. П. Сулим // Математическое моделирование и новые образовательные технологии в математике : сб. материалов. Респ. науч.-практ. конф., Брест, 23–24 апр. 2020 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. А. И. Басика. – Брест : БрГУ, 2020. – 140 с. – С. 130–132.

4. Сулим, А.П. Порог нейтронизации холодного сверхплотного водорода с учетом контактного ядерного взаимодействия и потенциала Рида / А. П. Сулим, А. И. Серый // Научные исследования – определяющий фактор специалиста будущего : материалы науч.-практ. конф. учреждений высш. и сред. спец. образования, Барановичи, 5 июня 2020 г., г. / Концерн «Беллегпром» учреждение образования «Барановичи. госу. колледж лег. пром-сти им. В.Е. Чернышева»; редкол.: А. А. Лис, С. Э. Лемец – Барановичи, 2020 – С. 21–22.

5. Браун, Дж. Е. Нуклон-нуклонные взаимодействия : пер. с англ. / Дж. Е. Браун, А. Д. Джексон. – М. : Атомиздат, 1979. – 248 с.