

В работе [1] была поставлена и решена задача о поиске потенциала обменного волнового взаимодействия электронов в плазме с вырожденными электронами. В такой плазме это взаимодействие происходит через механизм обмена ионно-звуковой волной. В работе [2] решение было значительно уточнено. Основной же вывод работ [1] и [2] совпадал, и согласно нему отталкивание близкорасположенных в криогенной плазме электронов с ростом расстояния между ними рано или поздно должно перейти в эффективное притяжение.

Уточненный потенциал взаимодействия двух электронов массой  $m$  на расстоянии  $\rho = r/r_D$  определяется двумя слагаемыми:

$$U(\rho) = U_1(\rho) + U_2(\rho), \quad (1)$$

где  $r_D$  — дебаевский радиус,  $a^2 = \frac{m}{3M}$  — зависит от рода вещества,  $M$  — масса положительных ионов. Дебаевская экранировка учитывается первым слагаемым

$U_1(\rho) = \frac{e^2}{r_D} \frac{e^{-\rho}}{\rho}$ , а второе, получившее условное наименование «стационарного решения» [2]

$$U_2(\rho) = \frac{e^2}{r_D} \frac{a}{\pi} \int_0^\rho u^2 (u^2 + \rho^2)^{-\frac{3}{2}} J(u) du,$$

зависит от сложной функции, выразимой с помощью интегрального синуса и косинуса

$$J(u) = \cos ux_0 \{ \text{Ci}[(1-x_0)u] - \text{Ci}[(1+x_0)u] \} - \\ - \sin ux_0 \{ \text{Si}[(1-x_0)u] + \text{Si}[(1+x_0)u] \},$$

где, в свою очередь,  $x_0 = a\rho/\sqrt{u^2 + \rho^2}$ . В дальнейшем для универсальности все потенциалы будут указаны нами в единицах  $e^2/r_D$ . На рис. 1 изображен график потенциала (1) для водородной плазмы  $a = 1,347 \cdot 10^{-2}$ , по которому видно, что вблизи нуля преобладает отталкивание электронов, но уже при  $\rho_1 = 7,045$  отталкивание сменяется притяжением, так что глобальный минимум потенциала, равный  $-U_0 = -2,206 \cdot 10^{-3}$ , наблюдается вблизи значения  $\rho_m = 199,0$ . Затем энергия притяжения ослабевает, и около  $\rho_2 = 411,7$  притяжение сменяется отталкиванием. Далее знак потенциала продолжает чередоваться почти периодически примерно каждые  $a\pi 2\sqrt{2} \approx 660$  дебаевских радиусов. Численные расчеты показывают, что характерные точки образованной потенциальной ямы в диапазоне

$0,001 \leq a \leq 0,02$  хорошо (квадрат коэффициента корреляции равен 1 с точностью до 3 знака после запятой) накладываются на интерполяционные кривые:

$$\rho_1 = -1,617 \ln a + 0,0793, \quad \rho_2 = 5,5455 a^{-1}, \quad (2)$$

$$\rho_m = 2,6825 a^{-1}, \quad U_0 = 0,1637 a.$$

Потенциальную яму, опирающуюся на точки (2), можно аппроксимировать параболой. Квазиклассическое приближение [3] позволяет просто рассчитать число уровней в такой яме:

$$N = \frac{e\sqrt{m}}{\hbar} \left( \frac{\pi}{3^4 \cdot 2^9} \right)^{1/6} n_e^{-1/6} U_0 \rho_m^2,$$

$$N \approx 2,2977 \cdot 10^{26} \cdot a^{-1} \cdot e \cdot \sqrt{m} \cdot n_e^{-1/6},$$

что позволяет ожидать наличия 32 энергетических уровней при  $a = 1,347 \cdot 10^{-2}$ .

Применимость потенциала (1) определяется концентраций электронов  $n_e$ , из неравенства

$\varepsilon_F \gg T_i \geq e^2 n_e^{1/3}$ , которое в конечном итоге даёт  $n_e \gg 8,17 \cdot 10^{103} \cdot m^3$ , а для водорода

$n_e \gg 6,16 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$  (более 2300 атмосфер). Следовательно, эффективное притяжение между электронами в плазме возникает лишь при определенных экстремальных условиях.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках Проекта РНФ № 14-29-00295.

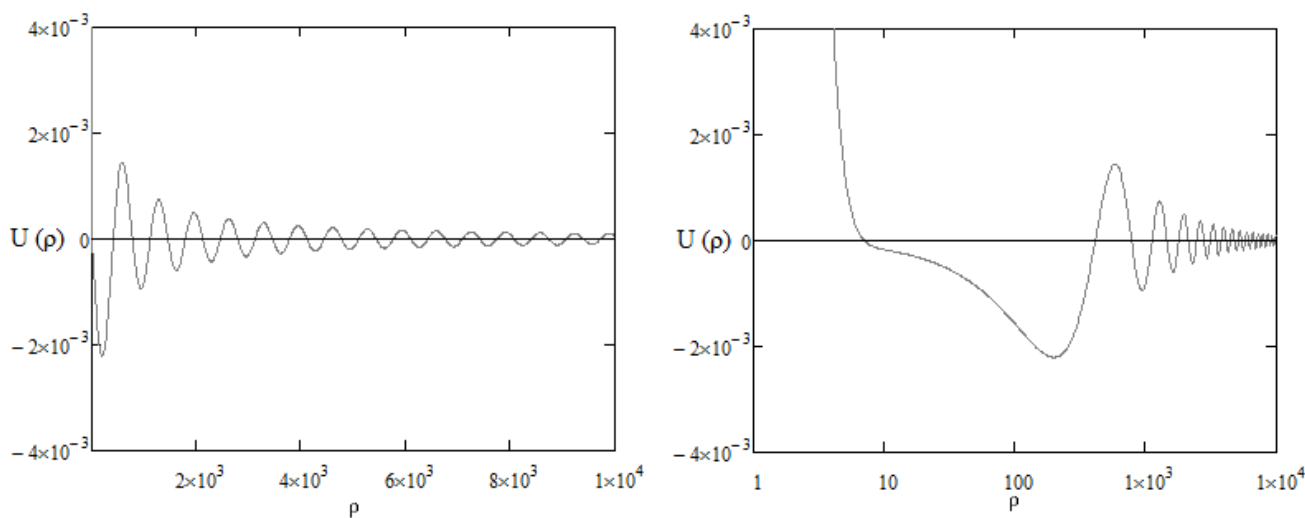


Рис.1. Слева — потенциал (1) для водородной плазмы  $a = 1,347 \cdot 10^{-2}$ . Справа — тот же график в логарифмическом масштабе по оси  $\rho$ .

#### Литература

1. Битюков В.К., Рухадзе А.А. Краткие сообщения по физике – 2015 – №3 – С. 3–8.
2. Габыев Д.Н., Рухадзе А.А. Краткие сообщения по физике – 2015 – №9 – С. 36–43.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика (нерелятивистская теория) – М.: Физматгиз – 1963 – С. 204.