

УДК 539.184

## СВЕРХТОНКАЯ СТРУКТУРА Р-УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ В ИОНАХ МЮОННОГО ЛИТИЯ, БЕРИЛЛИЯ И БОРА

© Сухорукова О.С.

e-mail: o.skhrkv@gmail.com

Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва, г. Самара, Российская Федерация

В предыдущих работах [1, 2] мы провели вычисления лэмбовского сдвига и сверхтонкого расщепления S-состояний для ионов мюонного лития, бериллия и бора. В рамках данной работы мы продолжаем исследование энергетических уровней этих ионов. Мы представляем расчет сверхтонкой структуры Р-уровней данных ионов с учетом различных поправок. Полученные величины могут быть использованы для сравнения с экспериментальными данными.

Наш подход к вычислению сверхтонкого расщепления основан на квазипотенциальном методе в квантовой электродинамике, где двухчастичное связанное состояние описывается уравнением Шредингера.

Основной вклад определяется сверхтонкой частью гамильтониана Брейта:

$$\Delta V_B^{hfs} = \frac{Z\alpha(1+\kappa_N)}{2m_1m_2r^3} \left[ 1 + \frac{m_1\kappa_d}{m_2(1+\kappa_d)} \right] (\mathbf{L}\mathbf{s}_2) - \frac{Z\alpha(1+\kappa_N)(1+a_\mu)}{2m_1m_2r^3} [(\mathbf{s}_1\mathbf{s}_2) - 3(\mathbf{s}_1\mathbf{n})(\mathbf{s}_2\mathbf{n})], \quad (1)$$

где  $m_1m_2$  – массы мюона и ядра,  $\kappa_N$  и  $a_\mu$  – магнитные моменты ядра и мюона,  $\mathbf{s}_1$  и  $\mathbf{s}_2$  – операторы спина мюона и ядра,  $\mathbf{n} = \mathbf{r}/r$ . Оператор (1) не коммутирует с полным угловым моментом мюона  $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{s}_1$ . В итоге возникает смешивание между энергетическими уровнями  $2P_{1/2}$  и  $2P_{3/2}$ .

Для получения надежных результатов, необходимо принять во внимание ряд поправок, обусловленных эффектами поляризации вакуума порядка  $\alpha^5$ . В первом порядке теории возмущений вклад однопетлевой поляризации вакуума в сверхтонкое расщепление Р-уровней энергии описывается амплитудой, полученной путем следующей замены в фотонном пропагаторе:

$$\frac{1}{k^2} \rightarrow \frac{\alpha}{3\pi} \int_1^\infty \frac{\rho(\xi)d\xi}{k^2 + 4m_e^2\xi^2}, \quad \rho(\xi) = \sqrt{\xi^2 - 1} \frac{2\xi^2 + 1}{\xi^4}.$$

Кроме того, мы проанализировали вклады эффектов поляризации вакуума порядка  $\alpha^5$  во втором порядке теории возмущений. Данные поправки определяются редуцированной кулоновской функцией Грина:

$$G_{2P}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -\frac{\mu^2(Z\alpha)}{36z^2z'^2} \left( \frac{3}{4\pi} \mathbf{nn}' \right) e^{-\frac{z+z'}{2}} g(z, z'), \quad (2)$$

$$g(z, z') = 24z_z^3 + 36z_z^3z_{>} + 36z_z^3z_{>}^2 + 24z_{>}^3 + 36z_{>}^3z_{<} + 36z_{>}^3z_{<}^2 + 49z_{<}^3z_{>}^3 - 3z_{<}^4z_{>}^3 - 12e^{z_{<}}(2 + z_{<} + z_{<}^2)z_{>}^3 - 3z_{<}^3z_{>}^4 + 12z_{<}^3z_{>}^3[-2C + Ei(z_{<}) - \ln z_{<} - \ln z_{>}],$$

где  $C = 0.5772 \dots$  – постоянная Эйлера,  $z = Wr$ ,  $z_{<} = \min(z, z')$ ,  $z_{>} = \max(z, z')$ .

Таким образом, мы получили величины сверхтонких структур Р-уровней энергии ионных мюонов лития, бериллия и бора. Был посчитан ряд поправок порядка  $\alpha^5$  и  $\alpha^6$ . Полученные результаты улучшают значения частот перехода между энергетическими уровнями 2P и 2S.

Благодарность

*Работа выполнена при поддержке РФФ (грант 18-12-00128).*

**Библиографический список**

1. Lamb shift in muonic ions of lithium, beryllium and boron [Текст]/ A.A. Krutov [et al.] // Phys. Rev. A – 2016. – Vol. 94(6). – P. 062505.
2. Hyperfine structure of S states in muonic ions of lithium, beryllium, and boron [Текст]/ A.E. Dorokhov [et al.] // Phys. Rev. A – 2018. – Vol. 98. – P. 042501.
3. Hyperfine structure of P-states in muonic deuterium [Текст]/ R.N. Faustov [et al.] // Phys. Rev. A – 2015. – Vol. 92(5). – P. 052512.