

УДК 539.184

**СВЕРХТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРА  
ИОНОВ МЮОННОГО ЛИТИЯ, БЕРИЛЛИЯ И БОРА**

Сухорукова О. С., Крутов А. А., Мартыненко А. П., Мартыненко Ф. А.

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

Прецизионное исследование сверхтонкой структуры (СТС) спектра энергии легких мюонных атомов является в настоящее время важной задачей. Она позволяет осуществить проверку стандартной модели и определить более точные значения фундаментальных физических констант. Актуальность этих исследований связана прежде всего с проведенными экспериментами коллаборацией CREMA [1] с мюонным водородом и дейтерием методами лазерной спектроскопии, в которых был измерен лэмбовский сдвиг уровней 2S и 2P, сверхтонкая структура спектра. Для расчета СТС мюонных ионов мы используем квазипотенциальный метод в квантовой электродинамике, в котором связанное состояние мюона и ядра описывается уравнением Шредингера, а сам потенциал строится с помощью амплитуды рассеяния вне массовой поверхности [2–4]. Основной вклад в оператор взаимодействия частиц дает гамильтониан Брейта:

$$H_B = H_0 + \Delta V_B^{fs} + \Delta V_B^{hfs}, \quad H_0 = \frac{p^2}{2\mu} - \frac{Z\alpha}{r}, \quad (1)$$

$$\Delta V_B^{fs} = -\frac{p^4}{8m_l^3} - \frac{p^4}{8m_p^3} + \frac{\pi Z\alpha}{2} \left( \frac{1}{m_l^2} + \frac{1}{m_p^2} \right) \delta(r) - \frac{Z\alpha}{2m_l m_p r} \left( p^2 + \frac{r(rp)p}{r^2} \right) + \frac{Z\alpha}{2m_l^2 r^3} \left[ 1 + \frac{2m_l}{m_p} + 2a_\mu \left( 1 + \frac{m_l}{m_p} \right) \right] (Ls_1), \quad (2)$$

$$\Delta V_B^{hfs} = \frac{8\pi\alpha\mu_p}{3m_l m_p} (s_1 s_2) \delta(r) + -\frac{\alpha\mu_p (1+a_\mu)}{m_l m_p r^3} [(s_1 s_2) - 3(s_1 n)(s_2 n)] + \frac{\alpha\mu_p}{m_l m_p r^3} \left[ 1 + \frac{m_l}{m_p} - \frac{m_l}{2m_p \mu_p} \right] (Ls_2). \quad (3)$$

Бесконечный ряд теории возмущений для оператора взаимодействия частиц содержит вклады разных взаимодействий, прежде всего электромагнитных. Релятивистские поправки 6 порядка по  $\alpha$ , а также вклад аномального магнитного момента мюона известны в аналитическом виде. Вклад однопетлевой поляризации вакуума в потенциал сверхтонкого взаимодействия определяется следующим выражением:

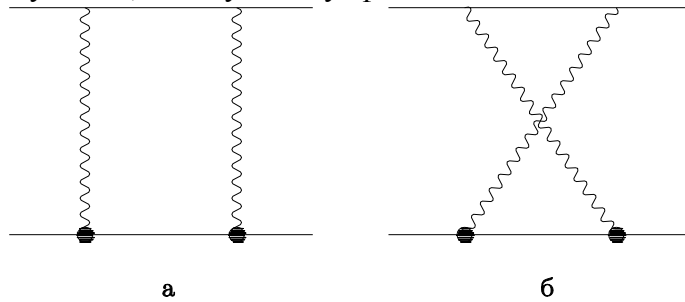
$$\propto \rho(s) ds \left( \pi \delta(r) - \frac{m_e^2 \xi^2}{r} \right) e^{-2m_e \xi r}, \quad (4)$$

где  $\rho(\xi) = \sqrt{\xi^2 - 1} (2\xi^2 + 1) / \xi^4$ . При вычислении средних значений (4) по волновым функциям связанных состояний интегрирование и по координатам частиц, и по спектральному параметру можно выполнить аналитически. В результате мы получаем следующие вклады порядка  $\alpha^5$  в СТС уровней ( $a_1 = m_e/W$ ):

$$\propto dx e^{-x \left( 1 + \frac{m_e \xi}{W} \right)} = \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 &= E_F(1S) \frac{\alpha(1+a_\mu)}{9\pi\sqrt{1-a_1^2}} \left[ \sqrt{1-a_1^2} (1+6a_1^2-3\pi a_1^3) + (6-3a_1^2+5a_1^4) \ln \frac{1+\sqrt{1-a_1^2}}{a_1} \right], \\
 &\qquad \qquad \qquad \propto x \left(1 - \frac{x}{2}\right)^2 dx e^{-x \left(1 + \frac{2m_e \xi}{W}\right)} = \qquad \qquad \qquad (6) \\
 &= E_F(2S) \frac{\alpha(1+a_\mu)}{18\pi(4a_1^2-1)^{5/2}} \left\{ \sqrt{4a_1^2-1} [11+2a_1^2(-29+8a_1(-22a_1+48a_1^3-3\pi(4a_1^2-1)^2))] \right. \\
 &\qquad \qquad \qquad \left. +12(1-10a_1^2+66a_1^4-160a_1^6+256a_1^8) \arctan \sqrt{4a_1^2-1} \right\}.
 \end{aligned}$$

Мы подробно представили результаты (5)-(6), чтобы продемонстрировать общую структуру полученных аналитических выражений. В данной работе выполнен также расчет двухпетлевых эффектов поляризации вакуума в первом и втором порядках теории возмущений. Важнейшую роль в СТС имеют эффекты структуры ядра, показанные на рисунках а, б в случае двухфотонных обменных амплитуд.



Для их расчета, а также расчета амплитуд более высокого порядка по  $\alpha$ , использовался метод проекционных операторов [2-4]. В данной работе были вычислены также более сложные поправки, которые определяются комбинированными эффектами поляризации вакуума, релятивизма и структуры ядра порядка  $\alpha^6$ . Исследована зависимость величины вкладов от заряда ядра  $Z$  и получены полные численные значения СТС.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-02-00554).

#### Библиографический список

1. Pohl, R. Laser spectroscopy of muonic deuterium [Текст] / R. Pohl, F. Nez, L.M.P. Fernandes [et al.] // Science .-2016.-V.353.-P.669.
2. Мартыненко, А. П. Поправки порядка  $(Z\alpha)^6 m_e^2/m_\mu$  к тонкой структуре мюония [Текст] / А. П. Мартыненко, Р. Н. Фаустов // ЖЭТФ.-1999.- Т.115.-С.1221.
3. Мартыненко, А. П. Сверхтонкая структура основного состояния мюонного водорода [Текст] / А. П. Мартыненко, Р. Н. Фаустов // ЖЭТФ.-2004.- Т.125.-С.48.
4. Мартыненко, А. П. Сверхтонкая структура S-уровней иона мюонного гелия [Текст] / А. П. Мартыненко // ЖЭТФ.-2008.- Т.133.-Вып.4.-С.794..