

ЭФФЕКТЫ СТРУКТУРЫ ЯДРА В СВЕРХТОНКОЙ СТРУКТУРЕ МЮОННОГО ЛИТИЯ, БЕРИЛЛИЯ И БОРА

А. Е. Дорохов^{1,2,*}, *А. П. Мартыненко*^{1,**},
Ф. А. Мартыненко^{1,***}, *О. С. Сухорукова*^{1,****}

¹ Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С. П. Королева, Самара, Россия

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Вычислены поправки на структуру ядра в сверхтонком расщеплении уровней энергии в мюонных ионах лития, бериллия и бора. Учтены вклады двухфотонных обменных амплитуд, включая эффект поляризации вакуума, и однофотонной амплитуды, которые дают поправки на структуру ядра и отдачу порядка α^5 и α^6 . Проведено сравнение численных результатов для различных параметризаций электромагнитных формфакторов.

Nuclear structure corrections to the hyperfine splitting (HFS) of energy levels in muonic ions Li, Be, B are calculated. The contributions of two photon exchange amplitudes including vacuum polarization effect and one photon interaction amplitude which give nuclear structure and recoil corrections of order α^5 and α^6 are calculated. A comparison of numerical results for different parametrizations of electromagnetic form factors is presented.

PACS: 32.10.Fn; 31.30.Gs; 31.30.J-

ВВЕДЕНИЕ

Коллаборация CREMA (Charge Radius Experiments with Muonic Atoms) получила в последние годы новые экспериментальные результаты, которые позволили по-новому взглянуть на вычисление уровней энергии мюонных

*E-mail: dorokhov@theor.jinr.ru

**E-mail: a.p.martynenko@samsu.ru

***E-mail: f.a.martynenko@gmail.com

****E-mail: o.skhrkv@gmail.com

атомов, поставили новые теоретические вопросы, требующие дополнительного изучения [1]. Одна из задач будущих экспериментов CREMA связана с мюонными ионами, содержащими легкие ядра лития, бериллия и бора. Для таких мюонных ионов описание электромагнитного взаимодействия многонуклонной системы имеет важное значение, и, следовательно, роль эффектов ядерной физики может быть изучена более точно. Можно надеяться, что огромный интерес, который экспериментальные результаты CREMA вызвали за последние годы, может в конечном итоге привести к значительному улучшению теории расчета энергетических уровней мюонных атомов.

ПОПРАВКИ НА СТРУКТУРУ И ОТДАЧУ ЯДРА

Поправки на структуру ядра имеют важное значение для прецизионного изучения сверхтонкой структуры (СТС) мюонного Li, Be и В. Основной вклад порядка α^5 в СТС дают двухфотонные обменные амплитуды. Он выражается через электрический $G_E(k^2)$ и магнитный $G_M(k^2)$ формфакторы:

$$\Delta E_{\text{str}}^{hfs} = E_F \frac{2\mu Z\alpha}{\pi} \int \frac{d\mathbf{k}}{k^4} \left[\frac{G_E(k^2)G_M(k^2)}{G_M(0)} - 1 \right]. \quad (1)$$

Для расчета поправки Земаха (1) использовались различные параметризации формфакторов (гауссова $G_E^G(k^2)$, дипольная $G_E^D(k^2)$ и однородно заряженный шар $G_E^U(k^2)$):

$$G_E^G(k^2) = \exp\left(-\frac{1}{6}r_N^2 k^2\right), \quad G_E^D(k^2) = \frac{1}{(1+k^2/\Lambda^2)^2}, \quad (2)$$

$$G_E^U(k^2) = \frac{3}{(kR)^3} [\sin kR - kR \cos kR],$$

$R = \sqrt{5}r_N/\sqrt{3}$ — заряд ядра, $\Lambda^2 = 12/r_N^2$. Аналитическое интегрирование в (1) дает

$$\Delta E_{\text{str},G}^{hfs} = -E_F \frac{72}{\sqrt{3}\pi} \mu Z\alpha r_N, \quad \Delta E_{\text{str},U}^{hfs} = -E_F \frac{72\sqrt{5}}{35\sqrt{3}} \mu Z\alpha r_N. \quad (3)$$

В случае ядер спина 3/2 двухфотонные обменные амплитуды имеют вид [2,3]

$$i\mathcal{M}_{2\gamma} = \frac{(Z\alpha)^2}{\pi^2} \int \frac{idk}{k^4} \frac{D^{\lambda\mu}(k)D^{\rho\nu}(k)}{(p_2+k)^2 - m_2^2} \bar{u}(q_1) \times$$

$$\times \left[\gamma_\mu \frac{\hat{p}_1 - \hat{k} + m_1}{(p_1-k)^2 - m_1^2} \gamma_\nu + \gamma_\nu \frac{\hat{p}_1 + \hat{k} + m_1}{(p_1+k)^2 - m_1^2} \gamma_\mu \right], \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \bar{v}_\alpha(p_2)\mathcal{O}_{\alpha\sigma\rho}(p_2, p_2+k)(-\hat{p}_2 - \hat{k} + m_2) \times \\ & \times \left[g_{\sigma\tau} - \frac{1}{3}\gamma_\sigma\gamma_\tau - \frac{2}{3m_2^2}(p_2+k)_\sigma(p_2+k)_\tau + \right. \\ & \left. + \frac{1}{3m_2}(\gamma_\sigma(p_2+k)_\tau - \gamma_\tau(p_2+k)_\sigma) \right] \mathcal{O}_{\tau\beta\lambda}(p_2, p_2+k)v_\beta(q_2), \end{aligned}$$

где $\mathcal{O}_{\alpha\beta}^\mu$ — вершинный оператор ядра спина 3/2:

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{\alpha\beta}^\mu = & g_{\alpha\beta} \frac{(p_2+q_2)_\mu}{2m_2} F_1(k^2) - g_{\alpha\beta} \frac{\sigma_{\mu\nu}k^\nu}{2m_2} F_2(k^2) + \\ & + \frac{k_\alpha k_\beta}{4m_2^2} \left[\frac{(p_2+q_2)_\mu}{2m_2} F_3(k^2) - \frac{\sigma_{\mu\nu}k^\nu}{2m_2} F_4(k^2) \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

В результате величина СТС определяется следующей формулой:

$$\begin{aligned} \Delta E_{nS}^{hfs} = & |\psi_{nS}(0)|^2 \int d^4k V_{2\gamma}(k) = \\ = & \frac{64}{9} \frac{(Z\alpha)^2}{\pi^2} |\psi_{nS}(0)|^2 \int \frac{d^4k}{k^4(k^4+4m_1^2k_0^2)(k^4+4m_2^2k_0^2)} \times \\ \times & \left[F_1F_2 \left(k^6 - k^4k_0^2 + \frac{4}{15} \frac{k^4k_0^4}{m_2^2} - \frac{7}{10} \frac{k^6k_0^2}{m_2^2} + \frac{13}{30} \frac{k^8}{m_2^2} \right) + \right. \\ & + F_2F_4 \left(-\frac{1}{30} \frac{k^2k_0^6}{m_2^2} + \frac{1}{15} \frac{k^4k_0^4}{m_2^2} - \frac{1}{30} \frac{k^6k_0^2}{m_2^2} \right) + \\ & + F_2F_3 \left(-\frac{1}{15} \frac{k^2k_0^6}{m_2^2} + \frac{11}{60} \frac{k^4k_0^4}{m_2^2} - \frac{7}{60} \frac{k^8}{m_2^2} \right) + \\ & + F_1F_4 \left(-\frac{1}{5} \frac{k^2k_0^6}{m_2^2} + \frac{3}{10} \frac{k^4k_0^4}{m_2^2} - \frac{1}{10} \frac{k^8}{m_2^2} \right) + \\ & \left. + F_2^2 \left(\frac{1}{15} \frac{k^2k_0^6}{m_2^2} - \frac{1}{6} k^2k_0^4 - \frac{2}{15} \frac{k^4k_0^4}{m_2^2} + \frac{1}{6} k^4k_0^2 + \frac{23}{120} \frac{k^6k_0^2}{m_2^2} - \frac{1}{4} \frac{k^8}{m_2^2} \right) \right]. \quad (6) \end{aligned}$$

Мы имеем в (6) поправку Земаха и поправку на отдачу. Формфакторы $F_i(k^2)$ выражены через зарядовый G_{E0} , электрический квадрупольный G_{E2} , магнитный дипольный G_{M1} и магнитный октупольный G_{M3} формфакторы, для которых далее используется гауссова параметризация. Значения формфакторов

в нуле равны

$$\begin{aligned}
 G_{E0}(0) &= 1, & G_{M1}(0) &= \frac{m_2 \mu_N}{m_p Z}, \\
 G_{E2}(0) &= m_2^2 Q, & G_{M3}(0) &= \frac{m_2}{m_p Z} m_2^2 \Omega.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Параметры ядер (7) исследовались в экспериментах по рассеянию электронов [4]. Еще одна поправка получена при разложении магнитного формфактора в первом порядке ТВ и электрического формфактора во втором порядке ТВ [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы вычисляем поправки на структуру ядра в СТС спектра мюонных ионов Li, Be и B. Получены следующие полные значения поправок: $-111,43$ мэВ ($1S$) (${}^6_3\text{Li}$); $-14,59$ мэВ ($2S$) (${}^6_3\text{Li}$); $-405,04$ мэВ ($1S$) (${}^7_3\text{Li}$); $-52,75$ мэВ ($2S$) (${}^7_3\text{Li}$); $345,75$ мэВ ($1S$) (${}^9_4\text{Be}$); $46,42$ мэВ ($2S$) (${}^9_4\text{Be}$); $-1402,52$ мэВ ($1S$) (${}^{10}_5\text{B}$); $-186,77$ мэВ ($2S$) (${}^{10}_5\text{B}$); $-2345,05$ мэВ ($1S$) (${}^{11}_5\text{B}$); $-312,46$ мэВ ($2S$) (${}^{11}_5\text{B}$). Эти результаты включают поправки на структуру ядра с эффектами ПВ и радиационными эффектами [5].

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 18-12-00128).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Antognini A. et al.* Proton Structure from the Measurement of $2S-2P$ Transition Frequencies of Muonic Hydrogen // *Science*. 2013. V. 339, No. 6. P. 417–420.
2. *Krutov A. A. et al.* Lamb Shift in Muonic Ions of Lithium, Beryllium and Boron // *Phys. Rev. A*. 2016. V. 94, No. 6. P. 062505.
3. *Faustov R. N., Martynenko A. P., Martynenko G. A., Sorokin V. V.* Hyperfine Structure of P -States in Muonic Deuterium // *Phys. Rev. A*. 2015. V. 92, No. 5. P. 052512.
4. *Uberall H.* Electron Scattering from Complex Nuclei. New York; London: Acad. Press, 1971.
5. *Faustov R. N., Martynenko A. P., Martynenko G. A., Sorokin V. V.* Hyperfine Structure of S -States in Muonic Deuterium // *Phys. Rev. A*. 2014. V. 90, No. 1. P. 012520.