МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ) ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 539.1.07

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ПОТЕНЦИАЛ В МОДЕЛИ "ТЯЖЕЛОГО"КВАРКОНИЯ

Студент ________ Е. А. Завидов

Научный руководитель
д.ф-м.н. ________ С. Р. Слабоспицкий

Москва 2024

Содержание

1 Введение

Кварконий - мезон, состоящий из кварка и антикварка одного "аромата". Наиболее известными примерами таких мезонов являются J/ψ и Υ мезоны, которые являются $1S$ состояниями чармония $c\bar{c}$ и боттомония $b\bar{b}$ соответственно.
Из-за того, что скорости c и b кварков в соответствующих мезонах приблизительно равны $0.3c$ и $0.1c$, расчет параметров чармония и боттомония допускает использование модели эффективного потенциала и потому сводится к решению стационарного уравнения Шредингера.

$$-\frac{1}{2\mu}\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}r^2}+\left(\frac{l(l+1)}{2\mu r^2}+V(r)\right)u(r)=Eu(r) \tag{1}$$

Здесь $\mu=\frac{m_c m_{\bar{c}}}{m_c+m_{\bar{c}}}$ приведенная масса пары кварк-антикварк, l относительный орбитальный момент.
В данной работе рассматриваются модели чармония с эффективными потенциалами вида:

$$V(r)=-\frac{a_1}{r} \tag{2}$$

$$V(r)=-\frac{a_2}{r}+b_2 r \tag{3}$$

Для каждого потенциала находятся значения параметров, при которых полученный спектр энергий связанных состояний лучше всего совпадает с экспериментальным.

2 Кулоновский потенциал

Самым простым потенциалом, учитывающим взаимодействие между кварками, является кулоновский потенциал вида (2). Уравнение (1) принимает вид

$$-\frac{1}{2\mu}\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}r^2}+\left(\frac{l(l+1)}{2\mu r^2}-\frac{a_1}{r}\right)u(r)=Eu(r) \tag{4}$$

Вводя безразмерный параметр длины $\rho = r\mu$, уравнение (4) переписывается в следующей форме

$$\begin{aligned} &\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}\rho^2}+\left(-\frac{l(l+1)}{\rho^2}+\frac{2a_1}{r}+\epsilon\right)u=0 \\ &\epsilon=\frac{2E}{\mu} \end{aligned} \tag{5}$$

Численное решение уравнения (5) для положительных энергий связи в области эффективного радиуса кваркониевого состояния дает значение параметра $a_1 = -11.605$ и $\chi^2 = 0.5667$.

Полученное значение параметра означает отталкивание кварков или, что то же самое, равенство зарядов c и $\bar{c}$ кварков, что является прямым противоречием экспериментальным данным. Поэтому кулоновский потенциал не может объяснить спектр масс состояний чармония.

3 Потенциал Корнелла

Самым большим недостатком потенциала вида (2) является пренебрежение сильным взаимодействием кварков. Для исправления этого недостатка вводится линейное по r слагаемое, которое отвечает за эффект конфайнмента кварков. Полученный потенциал (3) получил название потенциала Корнелла и его детальному изучению посвещены [1, 2, 3].

Используя данный потенциал, уравнение (1) принимает вид

$$-\frac{1}{2\mu}\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}r^2}+\left(\frac{l(l+1)}{2\mu r^2}-\frac{a_2}{r}+b_2r\right)u(r)=Eu(r) \tag{6}$$

Вводя безразмерные параметры

$$\rho=(b\mu)^{\frac{1}{3}}\,r$$
$$\lambda=\frac{a\mu^{\frac{2}{3}}}{b^{\frac{1}{3}}}$$
$$\epsilon=\frac{2E\mu^{\frac{1}{3}}}{b^{\frac{2}{3}}}$$

Уравнение (6) переписывается в форме

$$-\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}\rho^2}+\left(\frac{l(l+1)}{\rho^2}-\frac{2\lambda}{r}+2\rho\right)u=\epsilon u \tag{7}$$

Для численного решения уравнения используется метод Нумерова, подробности которого изложены в [4, 5]

Наилучшее соответствие достигается при $a=0.2$ $b=0.17$ GeV^2. При этом параметр хи-квадрат равен $\chi^2=0.1254$.

4 Заключение

В ходе данной работы рассматривались модели чармония с эффективными потенциалами вида (2) и (3). Для каждого из них были получены значения феноменологических параметров, определены энергии связанных состояний для потенциала Корнелла и построены радиальные распределения вероятности.

Таблица 1: **Значения масс состояний чармония**

	Ψ^{1S}	Ψ^{2S}	Ψ^{3S}	Ψ^{1P}	Ψ^{2P}	Ψ^{3P}
Exp	3097	3686	4040	3556	3927	4310
Corn	3097	3626	4046	3430	3874	4256

В данной работе не учитывались вклады от спин-спинового и спин-орбитального взаимодействий, поэтому дальше планируется скорректировать результаты с учетом вышеназванных поправочных членов.

Список литературы

[1] Geoffrey T. Bodwin, Daekyoung Kang, and Jungil Lee. Potential-model calculation of an order-v^2 nonrelativistic QCD matrix element. *Physical Review D*, 74, 2006.

[2] E. Eichten, K. Gottfried, T. Kinoshita, K. D. Lane, and T. M. Yan. Charmonium: The model. *Phys. Rev. D*, 17:3090–3117, 1978.

[3] Wei-Jun Deng, Hui Liu, Long-Cheng Gui, and Xian-Hui Zhong. Charmonium spectrum and electromagnetic transitions with higher multipole contributions. *Physical Review D*, 95(3), 2017.

[4] Wei-Jun Deng, Hui Liu, Long-Cheng Gui, and Xian-Hui Zhong. Spectrum and electromagnetic transitions of bottomonium. *Physical Review D*, 95(7), 2017.

[5] CAI Chong-Hai and LI Lei. Radial equation of bound state and binding energies of ξ^- hypernuclei. *Chinese Physics C*, 27(11):1005–1008, 2003.

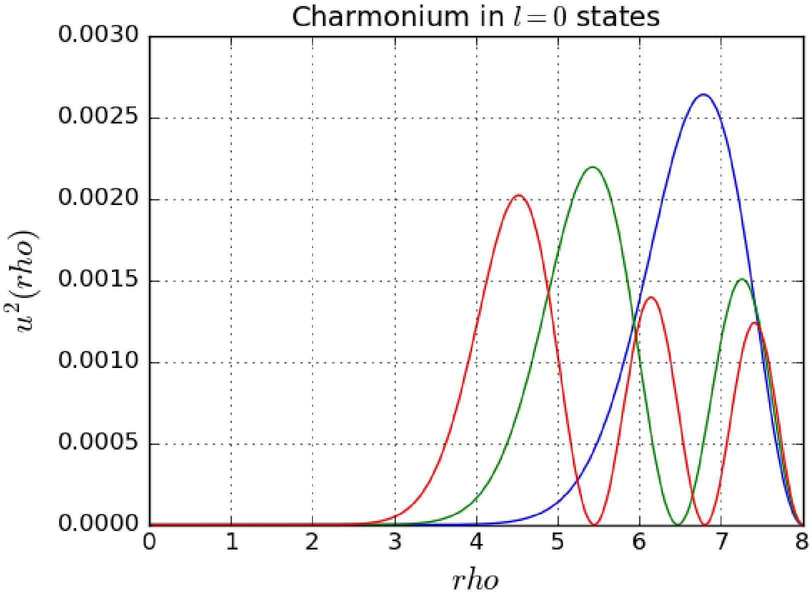

Рис. 1: $|u(\rho)|^2$ для $l = 0$ в кулоновском потенциале

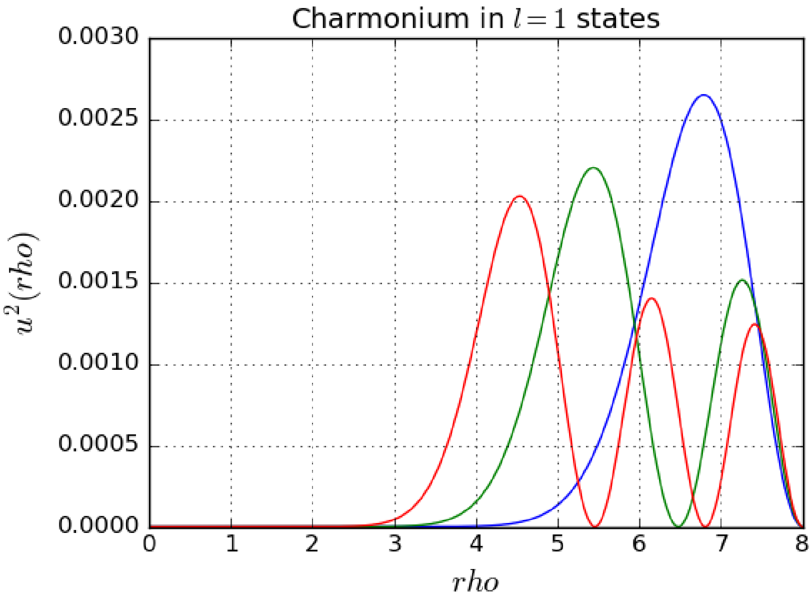

Рис. 2: $|u(\rho)|^2$ для $l = 1$ в кулоновском потенциале

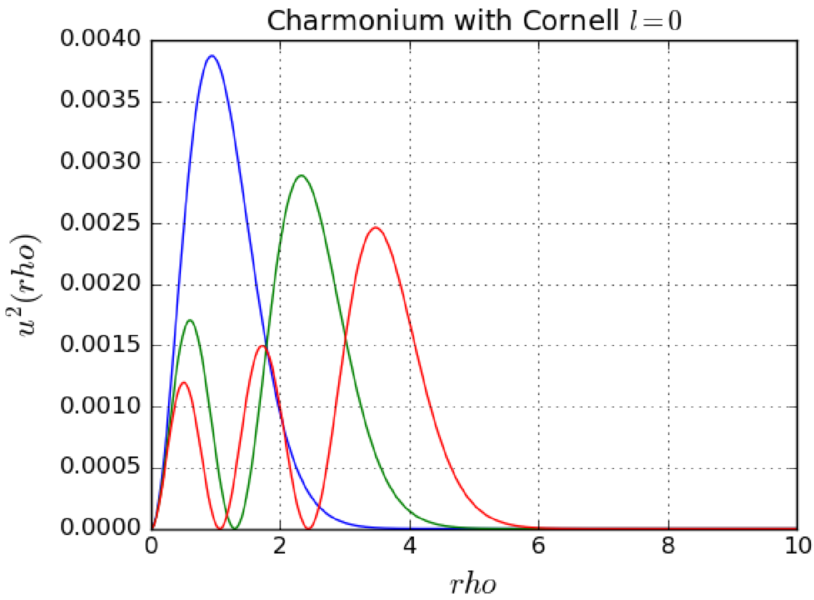

Рис. 3: $|u(\rho)|^2$ для $l = 0$ в потенциале Корнелла

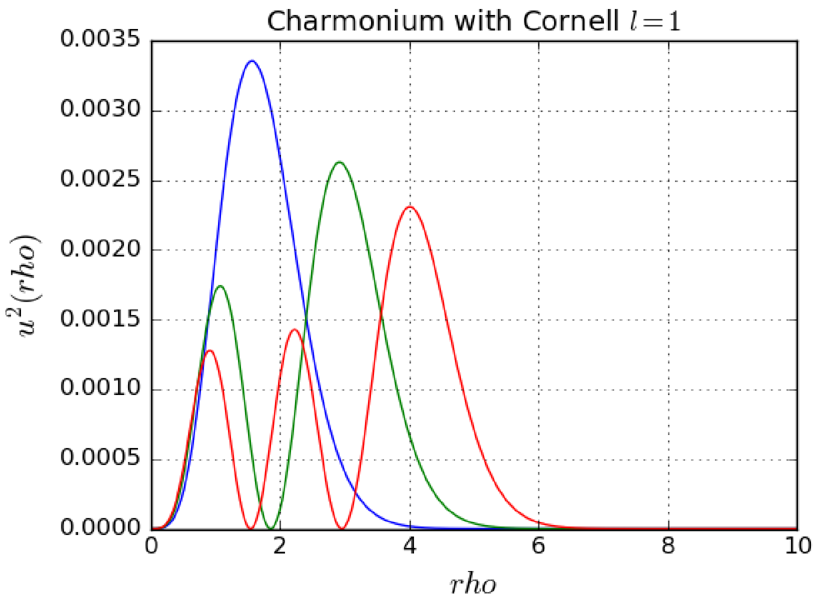

Рис. 4: $|u(\rho)|^2$ для $l = 1$ в потенциале Корнелла