

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТЕНЦИАЛА КВАРК-АНТИКВАРКОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ КВАРКОНИЕВ

В.П. Ефросинин, Д.А. Заикин, И.В. Шугин

Для построения эффективных потенциалов кварк-антикваркового взаимодействия для чармония и боттомония использовано приближение Паде. Получено хорошее описание экспериментальных данных по уровням и лептонным ширинам обоих семейств кваркониюв. Полученные в данном подходе потенциалы для чармония и боттомония оказываются очень близкими на расстояниях 0,1—1,0 Фм.

В работах /1, 2/ для описания массовых спектров и лептонных ширин чармония и боттомония использовалась нерелятивистская потенциальная модель с непрерывным составным потенциалом степенного типа. В таком подходе было достигнуто удовлетворительное описание экспериментальных данных. Однако поведение использованного в /1, 2/ потенциала при $\gamma \rightarrow 0$ и $\gamma \rightarrow \infty$ не соответствует предсказаниям КХД, согласно которым он должен убывать как $-\gamma^{-1}$ при $\gamma \rightarrow 0$ и линейно возрастать при $\gamma \rightarrow \infty$. В то же время, КХД не дает каких-либо указаний на характер поведения кварк-антикваркового потенциала на расстояниях $\sim 0,1-1,0$ Фм, которые играют основную роль при вычислении массовых спектров. Поэтому в настоящей работе предпринята попытка построения эффективных потенциалов $c\bar{c}$ - и $b\bar{b}$ -взаимодействий с "правильным" поведением на малых и больших расстояниях исходя из известных масс и лептонных ширин чармония и боттомония. Форма этих потенциалов выбрана в виде (приближение Паде)

$$V(\gamma) = A\gamma^{-1}(\gamma + a_1)(\gamma^2 + a_2\gamma + a_3)(\gamma^2 + a_4\gamma + a_5) \times \\ \times (\gamma^2 + a_6\gamma + a_7)(\gamma + a_8)^{-1} + B, \quad (1)$$

где A , B и a_i — некоторые константы. Исходя из условия монотонного потенциала, на (1) было наложено ограничение, согласно которому $a_1 < 0$, $a_8 > 0$, а корни полиномов второй степени, входящих в (1), комплексны. Значения параметров потенциала (1) определялись для случаев чармония и боттомония из условия минимума величины

$$\chi^2 = \sum_i [(M_i^t - M_i^{ex})^2 / \sigma_M^i + (\Gamma_i^t - \Gamma_i^{ex})^2 / \sigma_\Gamma^i], \quad (2)$$

где $M_i^{t,ex}$ — теоретические и экспериментальные значения масс состояний кваркония со спином $S = 1$; $\Gamma_i^{t,ex}$ — значения лептонных ширин S -состояний; σ_M^i и σ_Γ^i — экспериментальные ошибки этих величин; суммирование проводилось по идентифицированным состояниям (см. ниже).

Теоретические значения масс M_1^+ , соответствующие потенциалу (1), находились численным решением уравнения Шредингера для $q\bar{q}$ -системы, а лептонные ширины рассчитывались по формуле /3, 4/ с учетом поправки КХД /5/:

$$\Gamma(nS \rightarrow e^+e^-) = [16\pi e_q^2/M_{nS}^2(q\bar{q})] |\psi_{nS}(0)|^2 (1 - 16\alpha_s/3\pi),$$

где e_q — заряд кварка; α_s — константа сильного взаимодействия, для которой принимались значения $\alpha_s(m_c) = 0,19$, $\alpha_s(m_b) = 0,16$, а массы кварков полагались равными $m_c = 1,4$ ГэВ, $m_b = 4,8$ ГэВ /6/. Результаты описанной оптимизации потенциала (1) приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Оптимальные значения параметров потенциала (1)

	$a_1, \Phi\text{м}$	$a_2, \Phi\text{м}$	$a_3, \Phi\text{м}$	$a_4, \Phi\text{м}$	$a_5, \Phi\text{м}$	$a_6, \Phi\text{м}$	$a_7, \Phi\text{м}$	$a_8, \Phi\text{м}$	$A, \text{ГэВ}/\Phi\text{м}$	$B, \text{ГэВ}$
Чармоний	-2,241	-3,223	4,308	19,489	0,6999	-1,595	12,060	17,691	1,992	1,245
Боттомоний	-3,843	-0,7202	7,446	13,248	0,4409	1,8196	4,025	47,63	1,122	1,827

Т а б л и ц а 2

Спектр масс чармония и боттомония

Чармоний			Боттомоний		
состояние	масса, МэВ		состояние	масса, МэВ	
	теория	эксперимент		теория	эксперимент
1^3S_1	3096,9*	3096,93±0,09	1^3S_1	9460,3*	9460,32±0,22
2^3S_1	3686,0*	3686,00±0,10	2^3S_1	10023,6*	10023,30±0,31
3^3S_1	3982,2	—	3^3S_1	10354,5*	10355,3±0,5
4^3S_1	4159,3	4159±20	4^3S_1	10590,0	10580,0±3,5
5^3S_1	4411*	4415±6	5^3S_1	10770	—
1^3P	3525,0*	3525,0±0,5	6^3S_1	10915	10865±8
2^3P	3895	—	7^3S_1	11036	11019±8
3^3P	4116	—	1^3P	9898,9*	9900,0±0,7
4^3P	4324	—	2^3P	10261,8*	10261,0±0,6
1^3D	3801	3770,0±2,5	1^3D	10155	—
2^3D	4048	4040±10	2^3D	10436	—
3^3D	4246	—	3^3D	10647	—
4^3D	4454	—	4^3D	10813	—

Лептонные ширины 3S_1 -состояний чармония
и боттомония

Чармоний			Боттомоний		
состояние	$\Gamma(nS \rightarrow e^+e^-)$, кэВ		состояние	$\Gamma(nS \rightarrow e^+e^-)$, кэВ	
	теория	эксперимент		теория	эксперимент
1S	4,96*	4,72±0,35	1S	1,44*	1,34±0,04
2S	1,88*	2,14±0,21	2S	0,64*	0,59±0,03
3S	0,96	—	3S	0,42*	0,44±0,03
4S	0,83	0,77±0,23	4S	0,30	0,24±0,05
5S	0,81*	0,47±0,10	5S	0,23	—
			6S	0,19	0,31±0,07
			7S	0,16	0,13±0,07

Окончательные результаты для спектров чармония и боттомония и лептонных ширин S-состояний приведены в табл. 2 и 3. Звездочкой отмечены массы и ширины, использованные при минимизации суммы (2). Экспериментальные данные брались из таблиц /7/. Для P- и D-состояний использовались данные, усредненные по спин-орбитальному взаимодействию (поскольку последнее в данном подходе не рассматривалось).

Квантовые числа состояния чармония с массой 4415 МэВ неизвестны. Однако в процессе минимизации суммы (2) наилучший результат получался в предположении, что это состояние есть 5^3S_1 . Расчет спектров чармония и боттомония с параметрами потенциала (1), приведенными в табл. 1, позволяет предположить отождествление наблюдаемых уровней чармония 4159, 3770, и 4040 МэВ с 4^3S_1 - 1^3D - и 2^3D -состояниями соответственно, а уровней боттомония 10865 и 11019 МэВ — с 6^3S_1 - и 7^3S_1 -состояниями (табл. 2).

Потенциалы чармония и боттомония $V(r)$

r, Фм	0,01	0,05	0,10	0,20	0,30	0,50	0,70	0,80	1,00
V_{ch} , ГэВ	-6,931	-1,813	-1,094	-0,613	-0,354	0,000	0,257	0,362	0,534
V_b , ГэВ	-7,915	-1,941	-1,123	-0,605	0,343	0,000	0,248	0,351	0,526

Таким образом, использование потенциала $q\bar{q}$ -взаимодействия, оптимизированного с помощью приближения Паде, позволяет удовлетворительно описать наблюдаемые спектры чармония и боттомония и лептонные ширины их S-состояний. Полученные в этом приближении потенциалы чармония и боттомония практически совпадают с точностью до аддитивной постоянной. В табл. 4 приведены значения этих потенциалов, за нулевые значения которых приняты значения при $r = 0,5$ Фм.

Т а б л и ц а 5

Показатель степени потенциала $U = U_0 + ar^\nu$
в различных интервалах

Интервал r , Фм	Чармоний	Боттомоний
0,026 — 0,100	—0,831	—0,868
0,051 — 0,200	—0,518	—0,602
0,200 — 1,000	+0,152	+0,167

Для сравнения потенциала (1) с составным потенциалом степенного типа, использованным в /1, 2/, потенциал, полученный в настоящей работе, был аппроксимирован в разных интервалах функцией $U(r) = U_0 + ar^\nu$ методом наименьших квадратов. Полученные значения показателя ν для разных интервалов r приведены в табл. 5. Это сравнение показывает, что на основе существующих экспериментальных данных нельзя сделать однозначного заключения о поведении $q\bar{q}$ -потенциалов чармония и боттомония при $r \rightarrow 0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефросинин В.П., Заикин Д.А. Краткие сообщения по физике ФИАН №2, 21 (1987).
2. Ефросинин В.П., Жижимонтов В.В., Заикин Д.А. Краткие сообщения по физике ФИАН, №1, 15 (1990).
3. Матвеев В.А., Струминский Б.В., Тавхелидзе А.Н. Препринт ОИЯИ, Р-2524, Дубна, 1965.
4. Van Royen R., Weisskopf V.F. Nuovo Cimento, **50A**, 617 (1967).
5. Roggio E.C., Schnitzer H.J. Phys. Rev., **D20**, 1179 (1979).
6. Быков А.А., Дремин И.М., Леонидов А.В. УФН, **143**, 3 (1984).
7. Particle Data Group, Review of Particle properties. Phys. Lett., **239B**, 1 (1990).

Институт ядерных исследований АН СССР

Поступила в редакцию 25 апреля 1991 г.