

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Савченко

Кафедра Квантовой Теории и Физики Высоких Энергий,
Московского Государственного Университета
имени М.В.Ломоносова;
Федеральный Исследовательский Центр
“Информатика и Управление”,
Российской Академии Наук

совместно с В. О. Галкиным

Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН,
1–5 апреля 2024, Дубна



Введение

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Савченко

Введение

Описание модели

Релятивистская Кварковая Модель

Результаты

Анализ

Эксперимент

Выводы

Публикации

◇ “Обычные” адроны:

- барионы qqq ,
- мезоны $q\bar{q}$.

◇ Экзотические адроны:

- тетракварки $qq\bar{q}\bar{q}$,
- пентакварки $qqqq\bar{q}$, и др.

◇ Активные поиски ведутся в том числе на Большом Адронном Коллайдере Коллаборациями LHCb, ATLAS и CMS.



Описание модели I

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Сааченко

Введение

Описание модели

Релятивистская Кварковая Модель

Результаты

Анализ

Эксперимент

Выводы

Публикации

- ◇ Все параметры модели (включая конstituентные массы кварков) были фиксированы из ранее проведённых исследований свойств мезонов и барионов.
- ◇ Рассматриваемые кварки:
 - $m_u = m_d = 0.33 \text{ ГэВ}$,
 - $m_s = 0.50 \text{ ГэВ}$,
 - $m_c = 1.55 \text{ ГэВ}$,
 - $m_b = 4.88 \text{ ГэВ}$.



Описание модели II

◇ Кварковый состав:

- $Q, Q' = c, b, Q \neq Q'$.
- $q = u, d, s$.
- с одним открытым тяжёлым ароматом (без и со странностью):
 - $QQ\bar{Q}\bar{q}$ (+ с.с.).
- с одним открытым и другим скрытым тяжёлыми ароматами (без и со странностью):
 - $QQ'\bar{Q}\bar{q}$ (+ с.с.).
- с двумя открытыми тяжёлыми ароматами (без и со странностью):
 - $QQ\bar{Q}'\bar{q}$ (+ с.с.).



Описание модели III

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Савченко

Введение

Описание модели

Релятивистская Кварковая Модель

Результаты

Анализ

Эксперимент

Выводы

Публикации

◇ Связанное состояние дикварк–антидикварк:

- $\{(Q_1 Q_2) - (\bar{Q}_3 \bar{Q}_4)\} (+ \text{с.с.})$.

◇ Рассматриваемые дикварки:

- неточечные (учитывается внутренняя структура),
- основное состояние ($1S$),
- цветовой антитриплет ($\bar{3}_c$),
- все массы и формфакторы дикварков были вычислены нами ранее при анализе свойств барионов.



Описание модели IV

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Савченко

Введение

Описание модели

Релятивистская Кварковая Модель

Результаты

Анализ

Эксперимент

Выводы

Публикации

◇ Спин дикварка в основном состоянии:

- $J = 0$ — скалярный (S),
- $J = 1$ — аксиально-векторный (A).

◇ Возможные состояния дикварков:

- только аксиально-векторный (A):
 - QQ .
- аксиально-векторный или скалярный (A, S):
 - QQ' ,
 - Qq .



Описание модели V

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Савченко

Введение

Описание модели

Релятивистская Кварковая Модель

Результаты

Анализ

Эксперимент

Выводы

Публикации

◇ Возможные конфигурации тетракварка:

- $A\bar{A}$ — любой состав,
- $A\bar{S}$ — любой состав,
- $S\bar{A}$ — $QQ'\bar{Q}\bar{q}$ (+ c.c.),
- $S\bar{S}$ — $QQ'\bar{Q}\bar{q}$ (+ c.c.).



- ◇ Релятивистское квазипотенциальное уравнение типа Шрёдингера:

$$\left(\frac{b^2(M)}{2\mu_R(M)} - \frac{\mathbf{p}^2}{2\mu_R(M)} \right) \Psi_{d,T}(\mathbf{p}) = \int \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} V(\mathbf{p}, \mathbf{q}; M) \Psi_{d,T}(\mathbf{q})$$

$$\mu_R = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} = \frac{M^4 - (m_1^2 - m_2^2)^2}{4M^3}$$

$$b^2(M) = \frac{[M^2 - (m_1 + m_2)^2][M^2 - (m_1 - m_2)^2]}{4M^2}$$



◇ Квазипотенциал дикварк–антидикваркового взаимодействия:

$$V(\mathbf{p}, \mathbf{q}; M) = \frac{\langle d(\mathcal{P}) | J_\mu | d(\mathcal{Q}) \rangle}{2\sqrt{E_d} \sqrt{E_d}} \frac{4}{3} \alpha_s D^{\mu\nu}(\mathbf{k}) \frac{\langle d'(\mathcal{P}') | J_\nu | d'(\mathcal{Q}') \rangle}{2\sqrt{E_{d'}} \sqrt{E_{d'}}} \\ + \Psi_d^*(\mathcal{P}) \Psi_{d'}^*(\mathcal{P}') [J_{d;\mu} J_{d'}^\mu V_{\text{conf.}}^V(\mathbf{k}) + V_{\text{conf.}}^S(\mathbf{k})] \Psi_d(\mathcal{Q}) \Psi_{d'}(\mathcal{Q}')$$



Релятивистская Кварковая Модель III

- ◇ Квазипотенциал дикварк–антидикваркового взаимодействия в конфигурационном пространстве:

$$\begin{aligned}
 V(r) = & \left[V_{\text{Кул.}}(r) + V_{\text{конф.}}(r) + \frac{1}{E_1 E_2} \left\{ \mathbf{P} \left[V_{\text{Кул.}}(r) + V_{\text{конф.}}^V(r) \right] \mathbf{P} - \frac{1}{4} \Delta V_{\text{конф.}}^V(r) + V'_{\text{Кул.}}(r) \frac{\mathbf{L}^2}{2r} \right\} \right] a \\
 & + \left[\left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{1}{E_1(E_1 + M_1)} + \frac{1}{E_2(E_2 + M_2)} \right] \frac{V'_{\text{Кул.}}(r)}{r} - \frac{1}{2} \left[\frac{1}{M_1(E_1 + M_1)} + \frac{1}{M_2(E_2 + M_2)} \right] \frac{V'_{\text{конф.}}(r)}{r} \right. \right. \\
 & + \frac{\mu_d}{4} \left[\frac{1}{M_1^2} + \frac{1}{M_2^2} \right] \frac{V'^V_{\text{конф.}}(r)}{r} + \frac{1}{E_1 E_2} \left[V'_{\text{Кул.}}(r) + \frac{\mu_d}{4} \left(\frac{E_1}{M_1} + \frac{E_2}{M_2} \right) V'^V_{\text{конф.}}(r) \right] \frac{1}{r} \left. \right\} \mathbf{L}(\mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2) \\
 & + \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{1}{E_1(E_1 + M_1)} - \frac{1}{E_2(E_2 + M_2)} \right] \frac{V'_{\text{Кул.}}(r)}{r} - \frac{1}{2} \left[\frac{1}{M_1(E_1 + M_1)} - \frac{1}{M_2(E_2 + M_2)} \right] \frac{V'_{\text{конф.}}(r)}{r} \right. \\
 & + \left. \left. \frac{\mu_d}{4} \left[\frac{1}{M_1^2} - \frac{1}{M_2^2} \right] \frac{V'^V_{\text{конф.}}(r)}{r} + \frac{1}{E_1 E_2} \frac{\mu_d}{4} \left(\frac{E_1}{M_1} - \frac{E_2}{M_2} \right) \frac{V'^V_{\text{конф.}}(r)}{r} \right\} \mathbf{L}(\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2) \right] b \\
 & + \left[\frac{1}{3E_1 E_2} \left\{ \frac{1}{r} V'_{\text{Кул.}}(r) - V''_{\text{Кул.}}(r) + \frac{\mu_d^2}{4} \frac{E_1 E_2}{M_1 M_2} \left(\frac{1}{r} V'^V_{\text{конф.}}(r) - V''_{\text{конф.}}(r) \right) \right\} \times \left[\frac{3}{r^2} (\mathbf{S}_1 \mathbf{r})(\mathbf{S}_2 \mathbf{r}) - \mathbf{S}_1 \mathbf{S}_2 \right] \right] c \\
 & + \left[\frac{2}{3E_1 E_2} \left\{ \Delta V_{\text{Кул.}}(r) + \frac{\mu_d^2}{4} \frac{E_1 E_2}{M_1 M_2} \Delta V_{\text{конф.}}^V(r) \right\} \mathbf{S}_1 \mathbf{S}_2 \right] d
 \end{aligned}$$



Результаты I

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Савченко

Введение

Описание модели

Релятивистская Кварковая Модель

Результаты

Анализ

Эксперимент

Выводы

Публикации

- ◇ с одним открытым тяжёлым ароматом (без и со странностью):

Таблица 1: Массы (МэВ) основных состояний трижды тяжёлых тетракварков с одним открытым тяжёлым ароматом и без и со странностью ($ccc\bar{u}$, $ccc\bar{s}$, $bbb\bar{u}$, $bbb\bar{s}$ + с.с.).

$d\bar{d}'$	n_L	n_r	L	S	J	J^P	$M_{ccc\bar{u}}$	$M_{ccc\bar{s}}$	$M_{bbb\bar{u}}$	$M_{bbb\bar{s}}$
$A\bar{A}$	1S	0	0	0	0	0^+	5080	5205	14895	14998
				1	1	1^+	5104	5227	14901	15003
				2	2	2^+	5147	5267	14913	15014
$A\bar{S}$				1	1	1^+	5060	5180	14885	14989



Результаты II

- ◇ с одним открытым и другим скрытым тяжёлыми ароматами (без и со странностью):

Таблица 2: Массы (МэВ) основных состояний трижды тяжёлых тетракварков с парой открытого и скрытого тяжёлых ароматов и без и со странностью ($cb\bar{c}\bar{u}$, $cb\bar{c}\bar{s}$, $bc\bar{b}\bar{u}$, $bc\bar{b}\bar{s}$ + с.с.).

$d\bar{d}'$	n_L	n_r	L	S	J	J^P	$M_{cb\bar{c}\bar{u}}$	$M_{cb\bar{c}\bar{s}}$	$M_{bc\bar{b}\bar{u}}$	$M_{bc\bar{b}\bar{s}}$
$A\bar{A}$	1S	0	0	0	0	0^+	8383	8503	11668	11770
				1	1	1^+	8396	8515	11675	11777
				2	2	2^+	8420	8538	11689	11791
$A\bar{S}$	1S	0	0	1	1	1^+	8344	8460	11660	11764
$S\bar{A}$							8401	8520	11675	11777
$S\bar{S}$				0	0	0^+	8337	8453	11653	11757



Результаты III

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Савченко

Введение

Описание модели

Релятивистская Кварковая Модель

Результаты

Анализ

Эксперимент

Выводы

Публикации

- ◇ с двумя открытыми тяжёлыми ароматами (без и со странностью):

Таблица 3: Массы (МэВ) основных состояний трижды тяжёлых тетракварков с двумя открытыми тяжёлыми ароматами и без и со странностью ($cc\bar{b}\bar{u}$, $cc\bar{b}\bar{s}$, $bb\bar{c}\bar{u}$, $bb\bar{c}\bar{s}$ + с.с.).

$d\bar{d}'$	n_L	n_r	L	S	J	J^P	$M_{cc\bar{b}\bar{u}}$	$M_{cc\bar{b}\bar{s}}$	$M_{bb\bar{c}\bar{u}}$	$M_{bb\bar{c}\bar{s}}$
$A\bar{A}$	1S	0	0	0	0	0^+	8398	8501	11636	11755
				1	1	1^+	8410	8513	11646	11764
				2	2	2^+	8433	8535	11664	11781
$A\bar{S}$				1	1	1^+	8399	8504	11591	11707



Анализ I

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков
Елена Савченко

Введение

Описание модели

Релятивистская Кварковая Модель

Результаты

Анализ

Эксперимент

Выводы

Публикации

- ◇ Если энергетически разрешено, тетракварк разваливается на пару мезонов, состоящих из исходных кварков.

$$\Delta = M_{QQ'\overline{QQ}'} - M_{\text{порог низший}}$$

- ◇ Если $\Delta < 0$, состояние устойчиво к сильным распадам путём “развала”.
- ◇ Чем меньше $\Delta > 0$, тем уже состояние.



Анализ II

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Савченко

Введение

Описание модели

Релятивистская Кварковая Модель

Результаты

Анализ

Эксперимент

Выводы

Публикации

- ◇ Большая часть состояний лежит сильно выше порогов с величиной $\Delta > 100$ МэВ.
 - ◇ Несколько состояний лежат прямо над или немного под порогами с величиной $[-10 < \Delta < 100]$ МэВ:
 - Для всех составов вида:
 - $Q = c, Q' = b$
 - $QQ\bar{Q}\bar{q}$ (+ с.с.),
 - $QQ'\bar{Q}\bar{q}$ (+ с.с.),
 - $QQ\bar{Q}'\bar{q}$ (+ с.с.)
- состояния со спин-чётностью $J^P = 2^+$ лежат вблизи порогов.



Анализ III

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Сааченко

Введение

Описание модели

Релятивистская Кварковая Модель

Результаты

Анализ

Эксперимент

Выводы

Публикации

- Для всех составов вида:

- $Q = b, Q' = c$

- $QQ\bar{Q}\bar{q} (+ \text{с.с.}),$

- $QQ'\bar{Q}\bar{q} (+ \text{с.с.})$

все состояния лежат сильно выше порогов.

- Для всех составов вида:

- $Q = b, Q' = c$

- $QQ\bar{Q}'\bar{q} (+ \text{с.с.})$

все состояния лежат вблизи порогов.

- Для $b\bar{b}\bar{c}\bar{u} (+ \text{с.с.})$ состояние $A\bar{S}$ -конфигурации лежит немного под порогом.



Анализ IV

◇ Наиболее вероятные кандидаты для экспериментального наблюдения:

Таблица 4: Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков без и со странностью ($cc\bar{c}\bar{u}$, $cc\bar{c}\bar{s}$; $cb\bar{c}\bar{u}$, $cb\bar{c}\bar{s}$; $ccb\bar{u}$, $ccb\bar{s}$, $bb\bar{c}\bar{u}$, $bb\bar{c}\bar{s}$), лежащие прямо над или под порогами распадов на пары мезонов.

$QQ'\bar{Q}'\bar{q}$	$d\bar{d}'$	nL	S	J^P	M	M_{thr}	Δ	пара мезонов
$cc\bar{c}\bar{u}$	$A\bar{A}$	1S	2	2^+	5147	5104	43	$D^*(2007)^0 J/\psi(1S)$
$cc\bar{c}\bar{s}$	$A\bar{A}$		2	2^+	5267	5209	58	$D_s^{*,+} J/\psi(1S)$
$cb\bar{c}\bar{u}$	$A\bar{A}$		2	2^+	8420	8340	80	$D^*(2007)^0 B_c^-(1^3S_1)$
$cb\bar{c}\bar{s}$	$A\bar{A}$		2	2^+	8538	8445	93	$D_s^{*,+} B_c^-(1^3S_1)$
$ccb\bar{u}$	$A\bar{A}$		2	2^+	8433	8340	93	$D^*(2007)^0 B_c^+(1^3S_1)$
$ccb\bar{s}$	$A\bar{A}$		2	2^+	8535	8445	90	$D_s^{*,+} B_c^+(1^3S_1)$
$bb\bar{c}\bar{u}$	$A\bar{A}$		0	0^+	11636	11554	82	$B^- B_c^-(1^1S_0)$
			1	1^+	11646	11599	47	$B^{*,-} B_c^-(1^1S_0)$
			2	2^+	11664	11658	6	$B^{*,-} B_c^-(1^3S_1)$
$bb\bar{c}\bar{s}$	$A\bar{S}$		1	1^+	11591	11599	-8	$B^{*,-} B_c^-(1^1S_0)$
			1	1^+	11764	11690	74	$\bar{B}_s^{*,0} B_c^-(1^1S_0)$
$bb\bar{c}\bar{s}$	$A\bar{A}$		2	2^+	11781	11748	33	$\bar{B}_s^{*,0} B_c^-(1^3S_1)$
			1	1^+	11707	11690	17	$\bar{B}_s^{*,0} B_c^-(1^1S_0)$



- ◇ В секторе четырежды тяжёлых тетракварков уже имеются экспериментальные успехи:
 - Исследуя парное рождение чармониев, в 2020 году Коллаборация LHCb объявила об обнаружении узкого резонанса $X(6900)$.
 - Также были зафиксированы широкие структуры в районах 6.4 и 7.2 ГэВ.
 - В 2022 году Коллаборации ATLAS и CMS подтвердили $X(6900)$ и указали на ещё несколько структур, включая замеченные ранее в районах 6.4 и 7.2 ГэВ.



Экспериментальные данные II

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Савченко

- Обнаруженные состояния и наши предсказания:

Таблица 5: Экзотические X-состояния, наблюдаемые Коллаборациями LHCb, ATLAS и CMS в инвариантном спектре масс $J/\psi J/\psi$ и $J\psi\psi(2S)$ мезонов, и наши кандидаты для их интерпретации.

Коллаборация	Резонанс	M	Γ	Наши кандидаты				
				nL	S	J^{PC}	M	
LHCb	X(6600)	$6400 \div 6600$		1S	2	2^{++}	6367	
ATLAS		$m_0, \text{ model A}$	$6410 \pm 80^{+80}_{-30}$					$590 \pm 350^{+120}_{-200}$
		$m_0, \text{ model B}$	$6650 \pm 20^{+30}_{-20}$					$440 \pm 50^{+60}_{-50}$
CMS		$m_1, \text{ model A}$	$6630 \pm 50^{+80}_{-10}$	$350 \pm 110^{+110}_{-40}$	2S	0	0^{++}	6782
		$BW_1, \text{ no interference}$	$6552 \pm 10 \pm 12$	$124^{+32}_{-26} \pm 33$				
	$BW_1, \text{ interference}$	6638^{+43+16}_{-38-31}	$440^{+230+110}_{-200-240}$					
LHCb	X(6900)	$6905 \pm 11 \pm 7$	$80 \pm 19 \pm 33$	2S	2	2^{++}	6868	
ATLAS		NRSPS, no interference	$6886 \pm 11 \pm 11$					$168 \pm 33 \pm 69$
		NRSPS, interference	$6860 \pm 30^{+10}_{-20}$	$110 \pm 50^{+20}_{-10}$				
		$m_2, \text{ model A}$	$6910 \pm 10 \pm 10$	$150 \pm 30 \pm 10$				
CMS		$m_2, \text{ model B}$	$6960 \pm 50 \pm 30$	$510 \pm 170^{+110}_{-100}$	1D	2	0^{++}	6899
		$m_3, \text{ model } \beta$	$6927 \pm 9 \pm 4$	$122^{+24}_{-21} \pm 18$				
	$BW_2, \text{ no interference}$	6847^{+44+48}_{-28-20}	191^{+66+25}_{-49-17}					
	$BW_2, \text{ interference}$							
LHCb	X(7200)	$7200 \div 7400$		3S	0	0^{++}	7259	
ATLAS		$m_3, \text{ model } \alpha$	$7220 \pm 30^{+10}_{-30}$					$90 \pm 60^{+60}_{-30}$
CMS		$BW_3, \text{ no interference}$	$7287^{+20}_{-18} \pm 5$					$95^{+59}_{-40} \pm 19$
	$BW_3, \text{ interference}$	7134^{+48+41}_{-25-15}	97^{+40+29}_{-29-26}					



- ◇ В ближайшем будущем ожидаются многочисленные новые экспериментальные данные, в том числе и в интересующих нас процессах и диапазонах энергии.



Выводы I

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Савченко

Введение

Описание модели

Релятивистская Кварковая Модель

Результаты

Анализ

Эксперимент

Выводы

Публикации

- ◇ Вычислены массы основных состояний всех возможных составов трижды тяжёлых тетракварков.
- ◇ Был учтён конечный размер дикварка.
- ◇ Дикварки и антидикварки рассматривались как взаимодействующие целиком.



Выводы II

Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Савченко

Введение

Описание модели

Релятивистская Кварковая Модель

Результаты

Анализ

Эксперимент

Выводы

Публикации

- ◇ Выделены состояния трижды тяжёлых тетракварков, которые могут быть экспериментально обнаружены.
- ◇ Уже имеются экспериментальные данные по четырежды тяжёлым тетракваркам, и наши предыдущие предсказания в рамках Релятивистской Кварковой Модели согласуются с ними.



◇ Предыдущие связанные публикации

- Masses of the $QQ\bar{Q}\bar{Q}$ tetraquarks in the relativistic diquark–antidiquark picture, *Physical Review D*, 2020, vol. 102, №11, p. 114030;
- Heavy Tetraquarks in the Relativistic Quark Model, *Universe*, 2021, vol. 7, №4, p. 94;
- Fully Heavy Tetraquark Spectroscopy in the Relativistic Quark Model, *Symmetry*, 2022, vol. 14, №12, p. 2504;
- Relativistic description of asymmetric fully heavy tetraquarks in the diquark–antidiquark model, 2023, arXiv: 2310.20247.



Массы основных состояний трижды тяжёлых тетракварков

Елена Савченко

Введение

Описание модели

Релятивистская Кварковая Модель

Результаты

Анализ

Эксперимент

Выводы

Публикации

Спасибо за внимание!

Исследование поддержано Фондом развития теоретической физики и математики “БАЗИС”, грант №22-2-10-3-1.