

Экзотические адроны с тяжёлыми кварками

Алексей Нефедьев

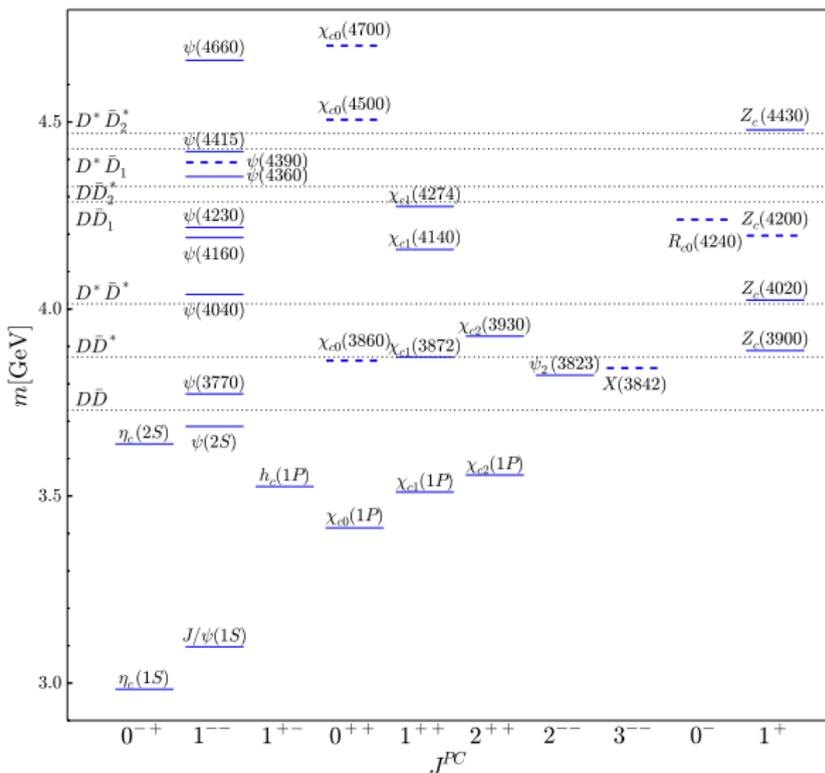
(ФИАН)

По совместным работам с
В.Бару, Ч.Ванг, А.Филиным, К.Ханхартом, Е.Эпельбаумом

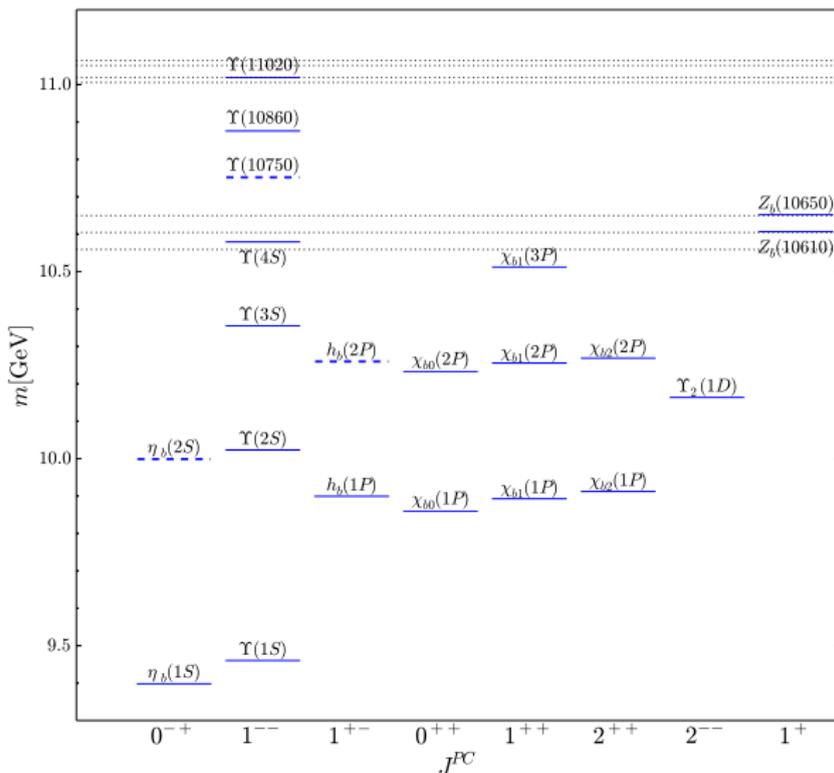
Некоторые ссылки

- “Bottomonium-like states: Physics case for energy scan above the $B\bar{B}$ threshold at Belle-II”, A.E. Bondar, R.V. Mizuk, M.B. Voloshin, Mod.Phys.Lett. **A32** (2017) 1750025
- “X(3872) in the molecular model”, Yu S. Kalashnikova, A.V. Nefediev, УФН **189** (2019) 603
- “The Belle II Physics Book”, Belle-II Collaboration, PTEP 2019 (2019) no.12, 123C01
- “Hadronic molecules”, F.-K. Guo, C. Hanhart, U.-G. Meißner, Q. Wang, Q. Zhao, B.-S. Zou, Rev.Mod.Phys. **90** (2018) 015004
- “The XYZ states: experimental and theoretical status and perspectives”, N. Brambilla, S. Eidelman, C. Hanhart, A. Nefediev, C.-P. Shen, C.E. Thomas, A. Vairo, C.-Z Yuan, arXiv:1907.07583

Спектр чармония



Спектр боттомония



Что мы понимаем о спектре чармония и боттомония

- **Ниже порога** открытого аромата **адронные состояния** имеют малые ширины и хорошо описываются **кварковой моделью**
- **Выше** порога рождения открытого аромата считать ширину **постоянной нельзя** \implies **пороговые явления**
- Важны **эффекты унитаризации**
- **Связь каналов** играет важную роль
- Описывать **околопороговые состояния** формулой Брейта-Вигнера **нельзя**
- Описывать **перекрывающиеся структуры** суммой Брейт-Вигнеров **нельзя**

Совместный анализ данных

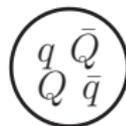
Обработка каждого канала реакции отдельно равносильна независимому изучению слона с разных сторон:



Только одновременный анализ всех каналов рождения и распада окологорогового резонанса использует всю полноту информации, содержащейся в данных

Если не $\bar{Q}Q$, то что?

- Тетракварк



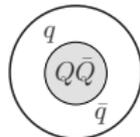
Компактный объект, состоящий из $(Qq)_{\bar{3}}$ и $(\bar{q}\bar{Q})_3$

- Гибрид



Компактный объект вида $(Q\bar{Q})_8 + \text{глюоны}$

- Адрокварконий



$(Q\bar{Q})_1$ в окружении облака лёгких кварков

- Адронная молекула



Протяжённый объект, состоящий из $(\bar{Q}q)_1$ и $(\bar{q}Q)_1$

Адронная молекула

Молекула = большая вероятность обнаружить резонанс в адронном канале

- Близость порогов с открытым ароматом
⇒ большая примесь адрон-адронной компоненты
- Связанное состояние/виртуальный уровень/резонанс
⇒ динамическая задача
- Удерживающие силы
⇒ различные модели
- Фиксация свободных параметров
⇒ комбинированный анализ данных

Встречались ли мы раньше с адронными молекулами?

Да! Мы знакомы с ними много лет

- 3S_1 Двухнуклонная система с $I = 0$:

$$a = 5.4 \text{ Фм} \quad r_e = 1.7 \text{ Фм}$$

Полюс на **RS-I** с $E_B = 2.23 \text{ МэВ} \implies$ **дейтрон**

- 1S_0 Двухнуклонная система $I = 1$:

$$a = -24 \text{ Фм} \quad r_e = 2.7 \text{ Фм}$$

Полюс на **RS-II** с $E_B = 0.067 \text{ МэВ} \implies$ **виртуальный уровень**

Симметрия спина тяжёлого кварка (HQSS)

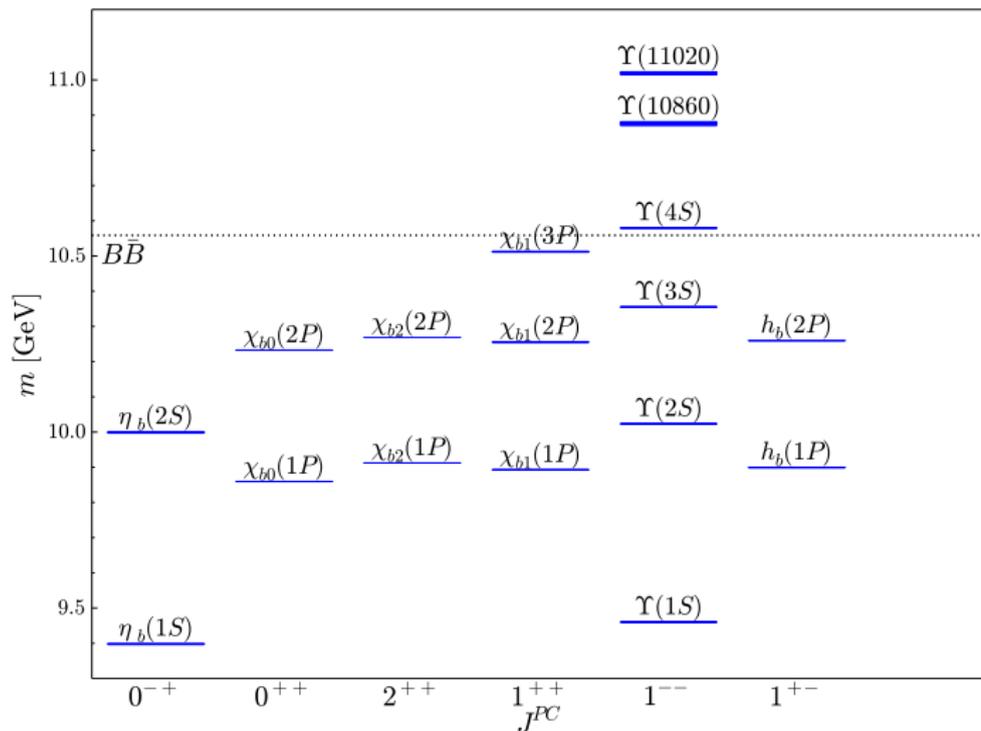
- Экзотические состояния XYZ содержат **тяжёлые кварки**
- В пределе $m_Q \rightarrow \infty$ ($m_Q \gg \Lambda_{\text{QCD}}$) спин тяжёлого кварка **отщепляется**

\implies **Симметрия спина тяжёлого кварка (HQSS)**

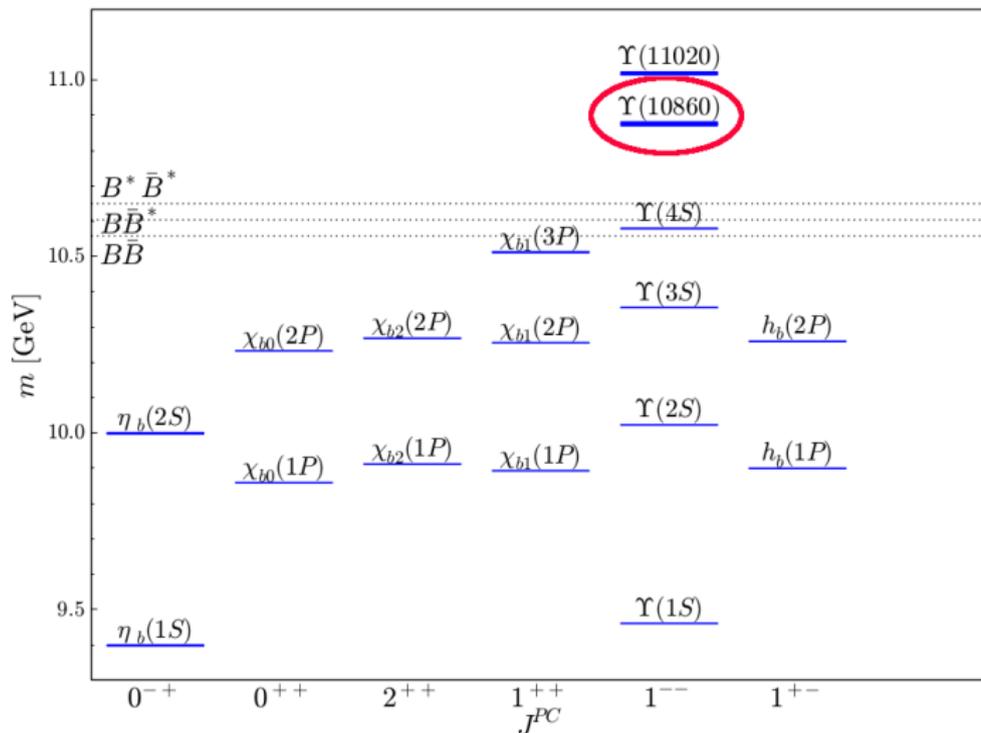
- Для реалистичных m_Q HQSS есть **приближённая**, но весьма **точная** симметрия КХД
- Предсказания HQSS **зависят** от **природы** состояния
- HQSS позволяет **связать** свойства адронов с разной ориентацией спина тяжёлого кварка

\implies **Спиновые партнёры**

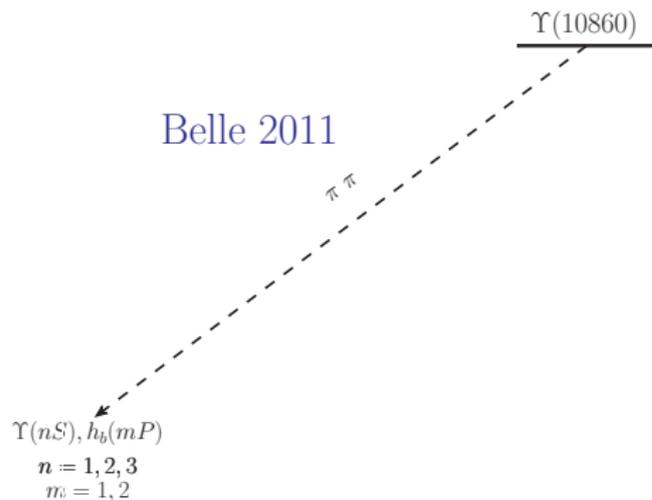
Распады векторных боттомониев



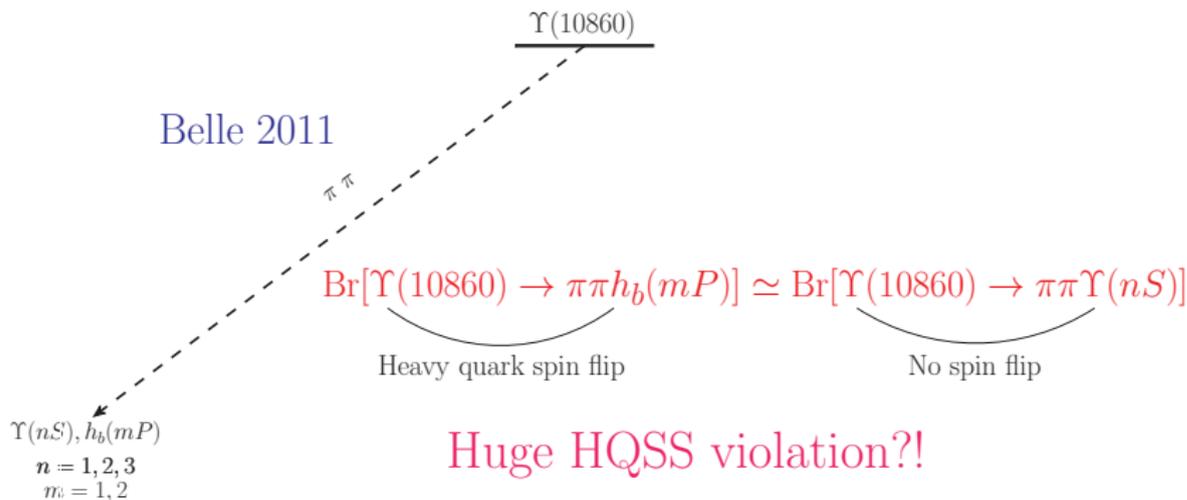
Распады векторных боттомониев



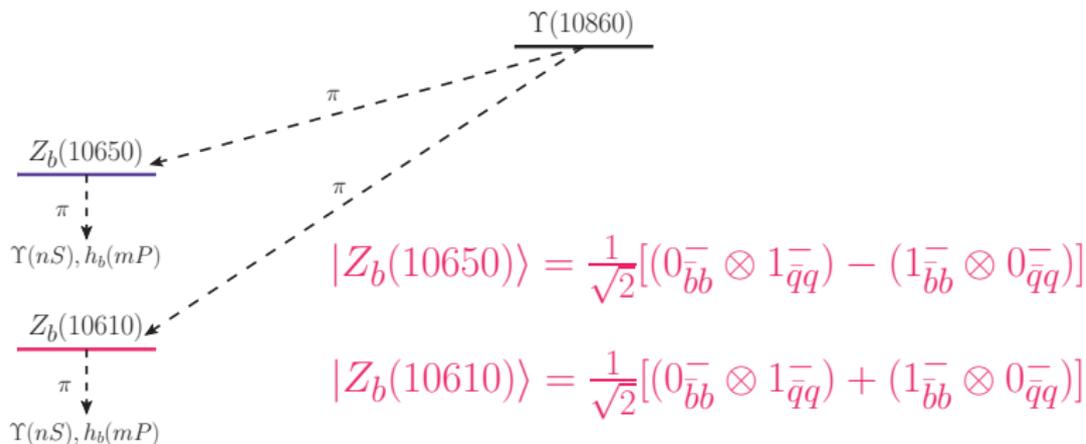
Двухпионные распады $\Upsilon(10860)$



Двухпионные распады $\Upsilon(10860)$



Распады $\Upsilon(10860)$

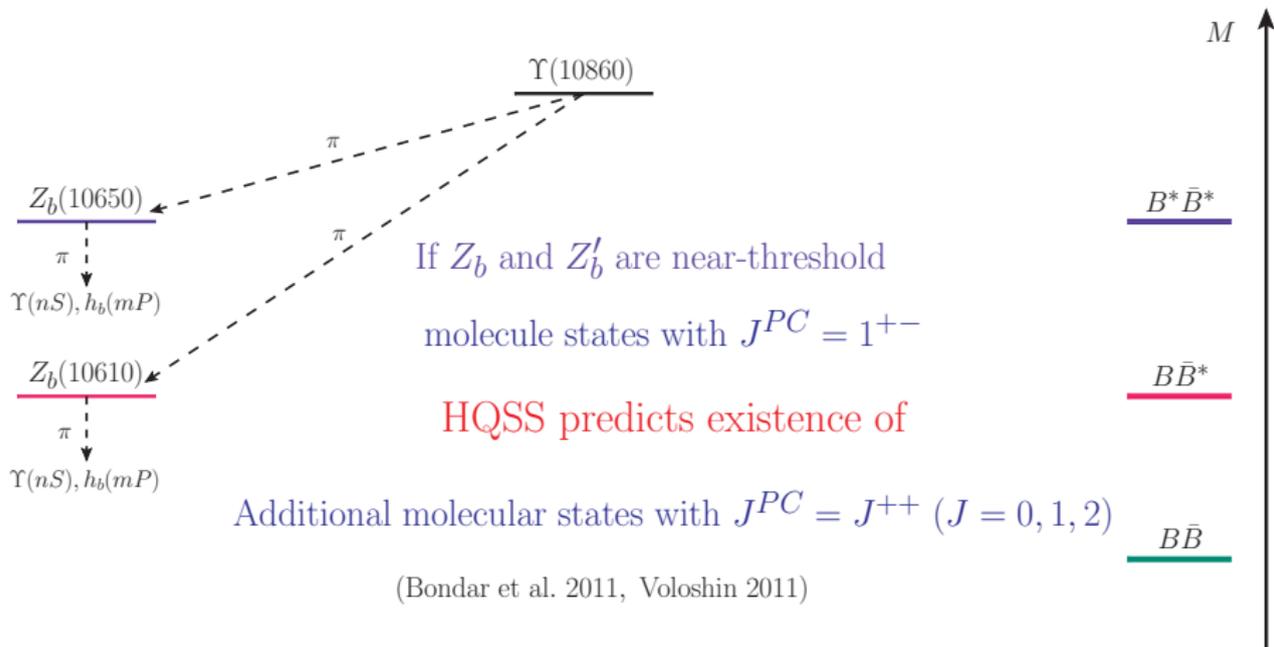


$$|Z_b(10650)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[(0_{\bar{b}b}^- \otimes 1_{\bar{q}q}^-) - (1_{\bar{b}b}^- \otimes 0_{\bar{q}q}^-)]$$

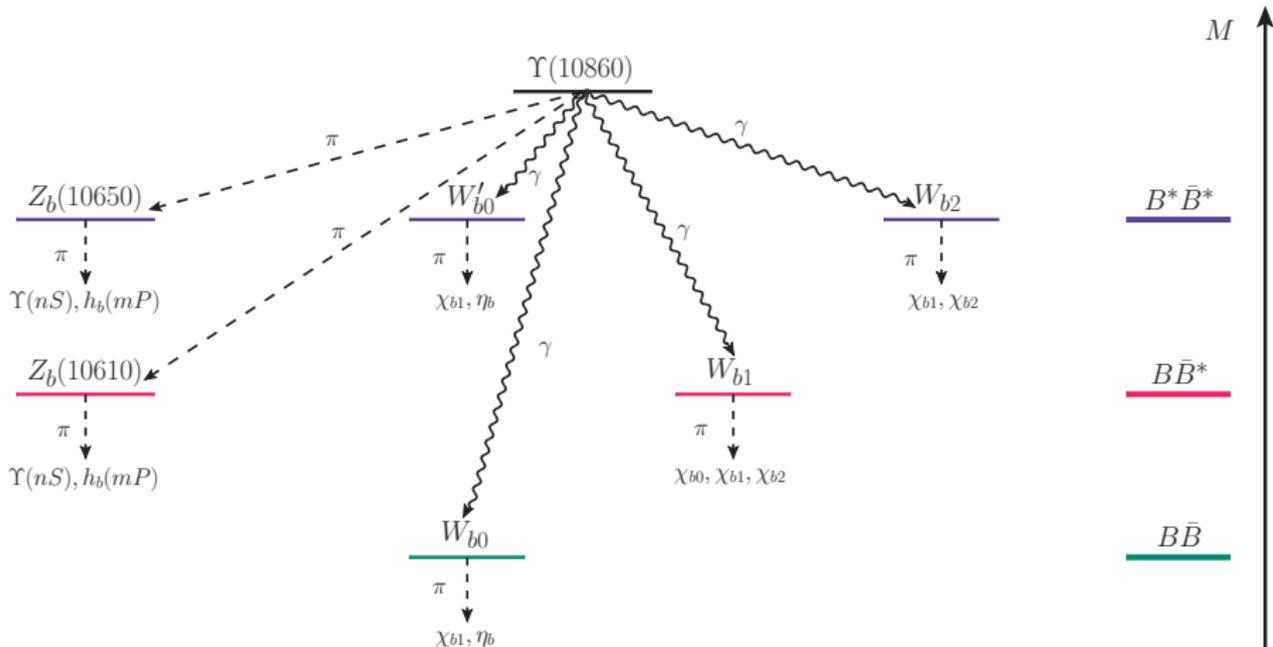
$$|Z_b(10610)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[(0_{\bar{b}b}^- \otimes 1_{\bar{q}q}^-) + (1_{\bar{b}b}^- \otimes 0_{\bar{q}q}^-)]$$

Bondar et al. 2011

Спиновые партнёры W_{bJ} ($J = 0, 1, 2$)

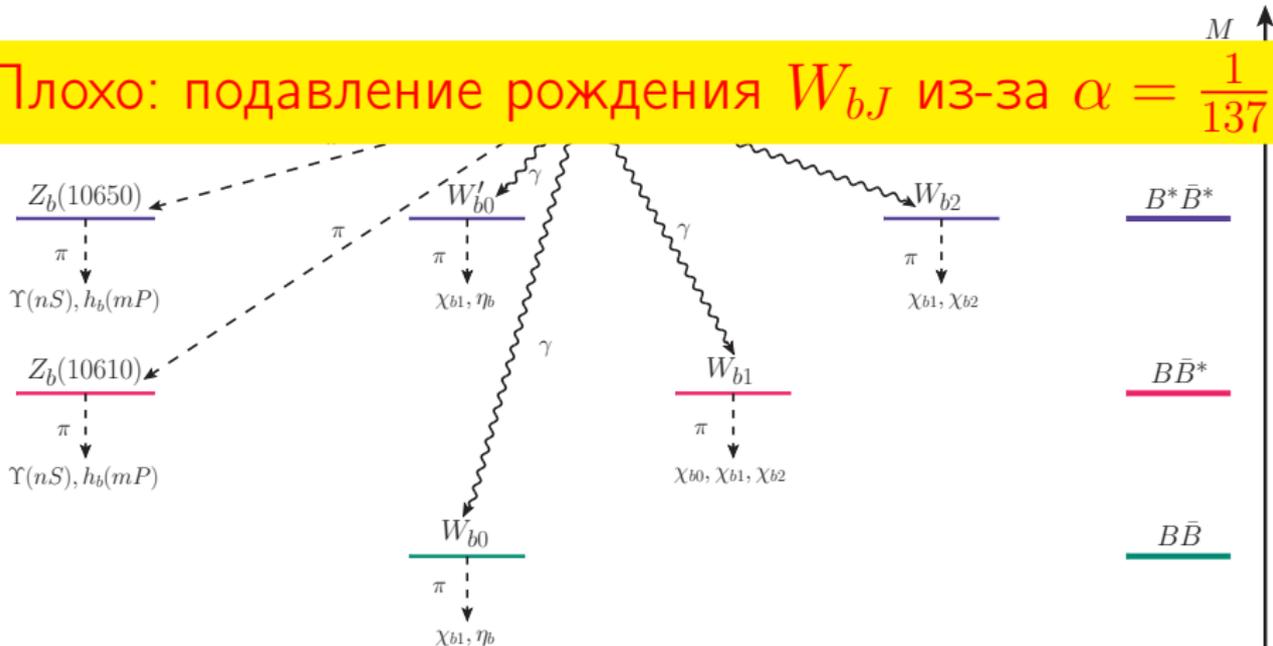


W_{bJ} в радиационных распадах $\Upsilon(10860)$



W_{bJ} в радиационных распадах $\Upsilon(10860)$

Плохо: подавление рождения W_{bJ} из-за $\alpha = \frac{1}{137}$



W_{bJ} в радиационных распадах $\Upsilon(10860)$

Плохо: подавление рождения W_{bJ} из-за $\alpha = \frac{1}{137}$



Хорошо: высокая статистика на Belle-II

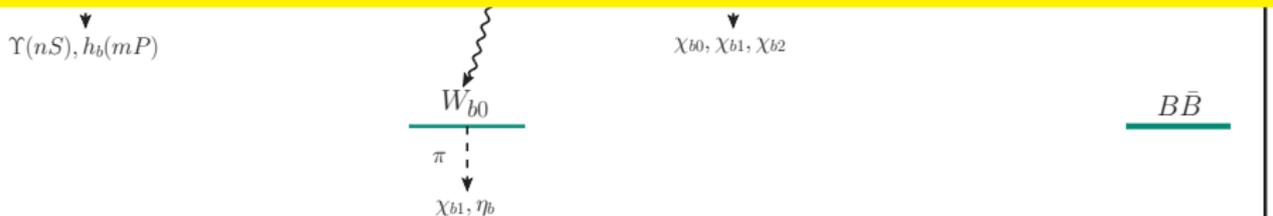
W_{bJ} в радиационных распадах $\Upsilon(10860)$

Плохо: подавление рождения W_{bJ} из-за $\alpha = \frac{1}{137}$



Хорошо: высокая статистика на Belle-II

Хорошо: предсказания для W_{bJ} из данных для Z_b



Эффективная теория поля для Z_b и W_{bJ}

- HQSS в **потенциале** \implies параметр $\Lambda_{\text{QCD}}/m_b \ll 1$
- Характерный масштаб, генерируемый динамикой связанных каналов

$$p_{\text{тип}} = \sqrt{m_B \delta} \simeq 500 \text{ МэВ} \quad \delta = m_{B^*} - m_B \approx 45 \text{ МэВ}$$

есть **мягкая шкала** (**жёсткая шкала** $\Lambda \simeq 1 \text{ ГэВ}$) \implies параметр $p_{\text{тип}}/\Lambda \lesssim 1$

Эффективная теория поля для Z_b и W_{bJ}

- HQSS в потенциале \implies параметр $\Lambda_{\text{QCD}}/m_b \ll 1$
- Характерный масштаб, генерируемый динамикой связанных каналов

$$p_{\text{тип}} = \sqrt{m_B \delta} \simeq 500 \text{ МэВ} \quad \delta = m_{B^*} - m_B \approx 45 \text{ МэВ}$$

есть мягкая шкала (жёсткая шкала $\Lambda \simeq 1 \text{ ГэВ}$) \implies параметр $p_{\text{тип}}/\Lambda \lesssim 1$

Тогда

- Пионная динамика (без дополнительных параметров!) должна включаться явно
- D волны от пионного обмена важны
- Сходимость эффективной теории есть ключевой вопрос

Задача связанных каналов

Упругий потенциал:

$$V_{\text{el-el}} = V_{\text{CT}}(\text{to order } O(p^0))$$

Связанные каналы:

$$1^{+-} : B\bar{B}^*(^3S_1, -), B^*\bar{B}^*(^3S_1)$$

$$0^{++} : B\bar{B}(^1S_0), B^*\bar{B}^*(^1S_0)$$

$$1^{++} : B\bar{B}^*(^3S_1, +)$$

$$2^{++} : B^*\bar{B}^*(^5S_2)$$

Задача связанных каналов

Упругий потенциал:

$$V_{\text{el-el}} = V_{\text{CT}}(\text{to order } O(p^2)) + V_{\pi}$$

Связанные каналы:

$$1^{+-} : B\bar{B}^*({}^3S_1, -), B^*\bar{B}^*({}^3S_1), B\bar{B}^*({}^3D_1, -), B^*\bar{B}^*({}^3D_1)$$

$$0^{++} : B\bar{B}({}^1S_0), B^*\bar{B}^*({}^1S_0), B^*\bar{B}^*({}^5D_0)$$

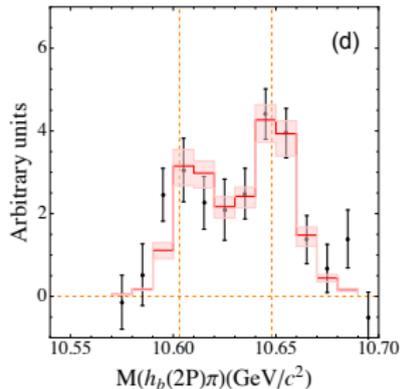
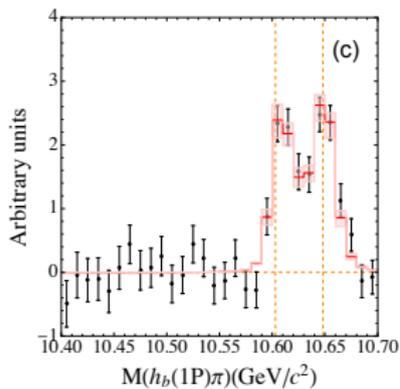
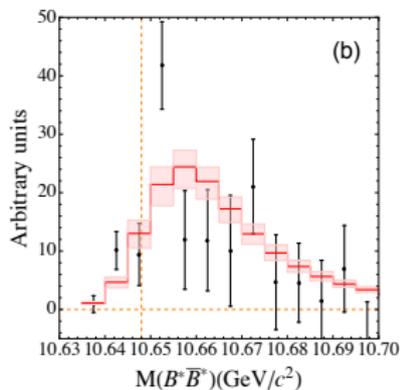
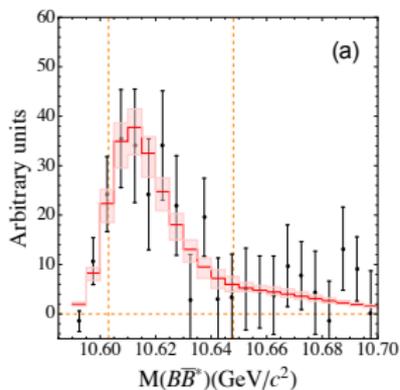
$$1^{++} : B\bar{B}^*({}^3S_1, +), B\bar{B}^*({}^3D_1, +), B^*\bar{B}^*({}^5D_1)$$

$$2^{++} : B^*\bar{B}^*({}^5S_2), B\bar{B}({}^1D_2), B\bar{B}^*({}^3D_2), \\ B^*\bar{B}^*({}^1D_2), B^*\bar{B}^*({}^5D_2), B^*\bar{B}^*({}^5G_2)$$

Уравнение Липпманна–Швингера ($V^{\text{eff}} = V_{\text{el-el}} + \sum_{\text{inel}} V_{\text{el-inel-el}}$):

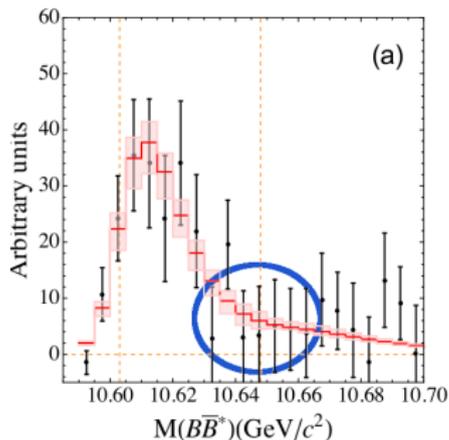
$$T_{\alpha\beta}(M, \mathbf{p}, \mathbf{p}') = V_{\alpha\beta}^{\text{eff}}(\mathbf{p}, \mathbf{p}') - \sum_{\gamma} \int \frac{d^3q}{(2\pi)^3} V_{\alpha\gamma}^{\text{eff}}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) G_{\gamma}(M, \mathbf{q}) T_{\gamma\beta}(M, \mathbf{q}, \mathbf{p}')$$

Комбинированный фит к данным по Z_b

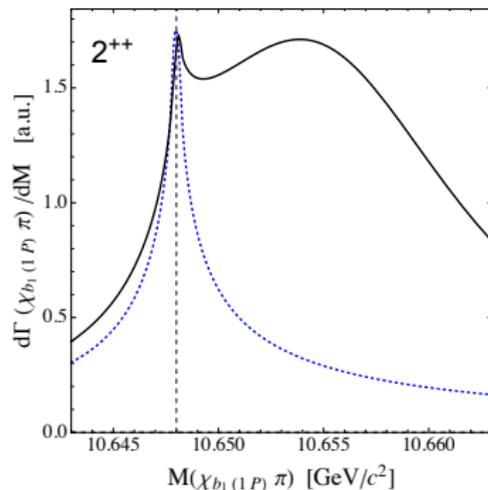
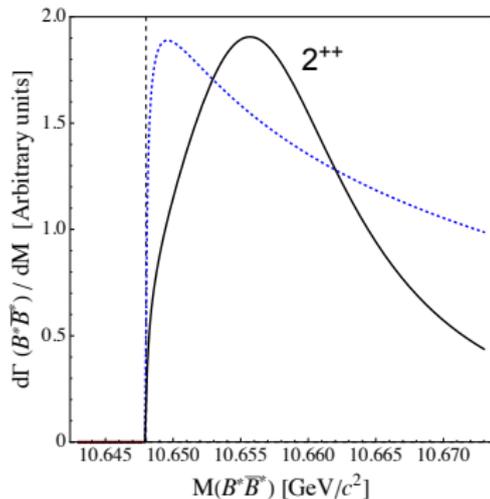


Результаты и выводы для Z_b

- Описание данных **хорошее** ($\chi^2/\text{d.o.f} = 0.83$)
- **Параметры** (низкоэнергетические константы и константы связи каналов) **извлекаются непосредственно из данных**
- Данные **совместимы с HQSS**
- Эффект (дальнодействующей части) **пионного обмена существенен**
- Переходы $B\bar{B}^* - B^*\bar{B}^*$:
 - **Усилены пионами**
 - **Отсутствуют в данных (Загадка!)**
 - **Подавляются S - D переходами за счёт контактных членов $O(p^2)$**

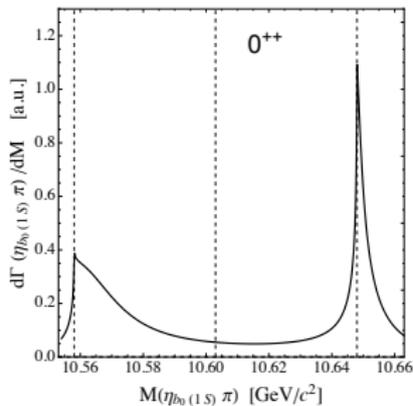
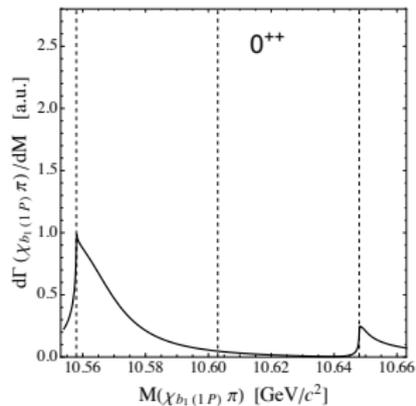
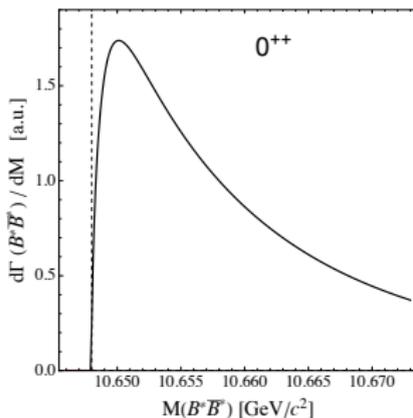
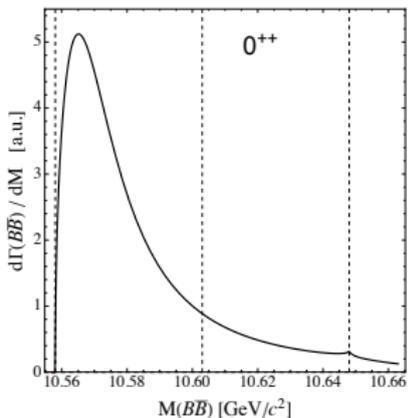


Роль пионного обмена

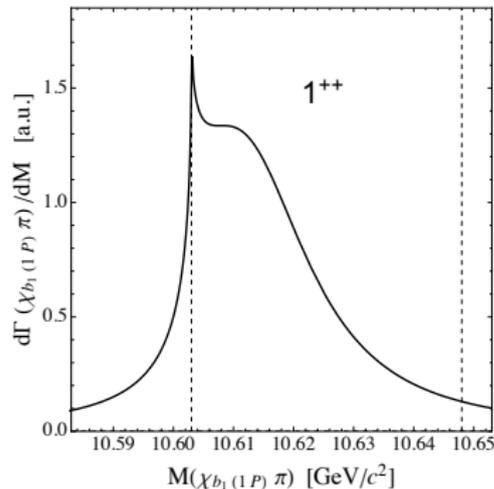
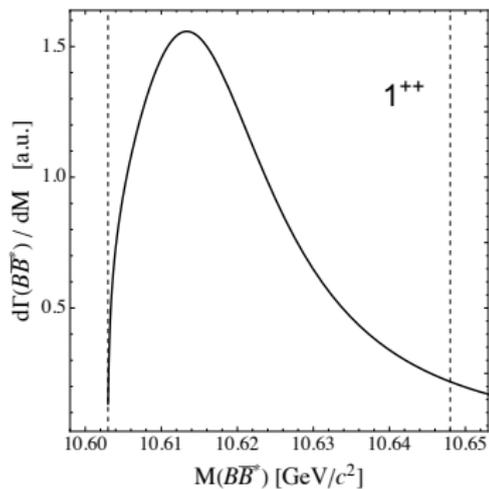


Голубая кривая: беспсионный фит \implies виртуальный уровень
 Чёрная кривая: фит с пионами \implies надпороговый резонанс

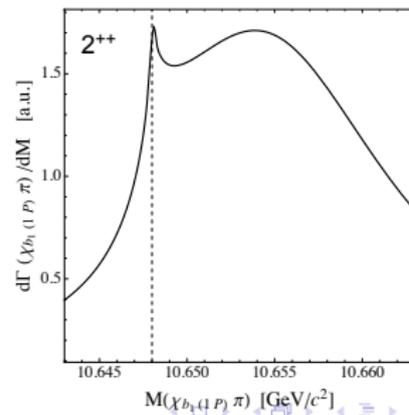
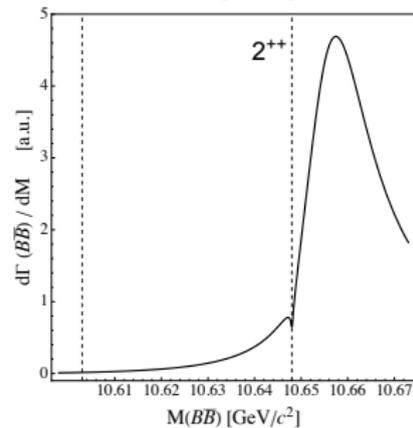
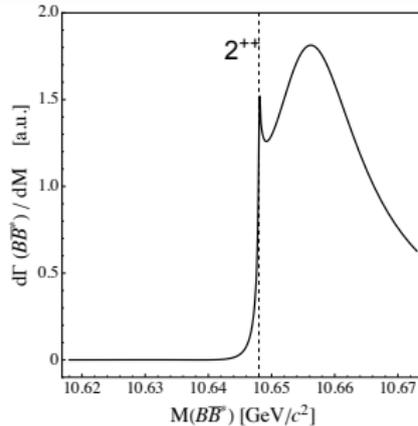
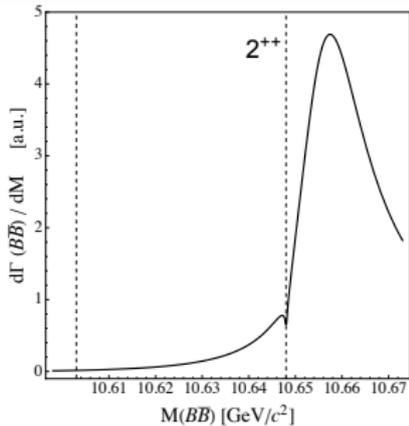
Предсказание для W_{b0}



Предсказание для W_{b1}



Предсказание для W_{b2}



Полюса амплитуды и парциальные вероятности

J^{PC}	Состояние	Порог	E_B (от порога) [МэВ]	Вычет
1^{+-}	Z_b	$B\bar{B}^*$	$(-2.3 \pm 0.5) - i(1.1 \pm 0.1)$	$(-1.2 \pm 0.2) + i(0.3 \pm 0.2)$
1^{+-}	Z'_b	$B^*\bar{B}^*$	$(1.8 \pm 2.0) - i(13.6 \pm 3.1)$	$(1.5 \pm 0.2) - i(0.6 \pm 0.3)$
0^{++}	W_{b0}	$B\bar{B}$	$(2.3 \pm 4.2) - i(16.0 \pm 2.6)$	$(1.7 \pm 0.6) - i(1.7 \pm 0.5)$
0^{++}	W'_{b0}	$B^*\bar{B}^*$	$(-1.3 \pm 0.4) - i(1.7 \pm 0.5)$	$(-0.9 \pm 0.3) - i(0.3 \pm 0.2)$
1^{++}	W_{b1}	$B\bar{B}^*$	$(10.2 \pm 2.5) - i(15.3 \pm 3.2)$	$(1.3 \pm 0.2) - i(0.4 \pm 0.2)$
2^{++}	W_{b2}	$B^*\bar{B}^*$	$(7.4 \pm 2.8) - i(9.9 \pm 2.2)$	$(0.7 \pm 0.1) - i(0.3 \pm 0.1)$

Парциальные вероятности радиационных переходов из $\Upsilon(10860)$ через W_{bJ}

J^{PC}	$B\bar{B}$	$B\bar{B}^*$	$B^*\bar{B}^*$	$\chi_{b0}(1P)\pi$	$\chi_{b0}(2P)\pi$	$\chi_{b1}(1P)\pi$	$\chi_{b1}(2P)\pi$	$\chi_{b2}(1P)\pi$	$\chi_{b2}(2P)\pi$	$\eta_{b0}(1S)\pi$	$\eta_{b0}(2S)\pi$
0^{++}	0.73	—	0.14	—	—	0.05	0.06	—	—	0.002	0.01
1^{++}	—	0.76	—	0.03	0.06	0.02	0.04	0.04	0.05	—	—
2^{++}	0.06	0.07	0.54	—	—	0.03	0.06	0.09	0.16	—	—

Заключение

- До 2003 года спектроскопия чармониев и боттомониев считалась вполне хорошо изученной областью сильных взаимодействий
- С момента открытия $X(3872)$ обнаружено около двух десятков экзотических адронов
- Единая картина экзотики на данный момент отсутствует
- Для понимания природы экзотики необходимо
 - учитывать пороговые явления
 - учитывать многоканальность задачи
 - уважать унитарность и аналитичность
 - использовать комбинированный анализ данных
- Несмотря на обилие данных, их всё ещё мало для построения теоретических подходов и надёжной фиксации параметров
- Плохая сходимість эффективных теорий
- Пока не удалось предложить простую и универсальную параметризацию формы линии околороговых резонансов
- Выживет ли отождествление состояние=полус?