

**Совместная обработка данных BABAR,
BELLE, BES, CLEO и КЕДР в области
 $\psi(3770)$**

А. Г. Шамов, К. Ю. Тодышев

7 ноября 2013

Основные загадки $\psi(3770)$

- Форма сечения в $D\bar{D}$ и адронном канале (BES)
- Вероятность распада в не- $D\bar{D}$ состояния
 - велика по данным BES
 - мала по данным CLEO, что в согласии с теоретическими ожиданиями
- Вероятности эксклюзивных распадов в легкие адроны малы

Мотивация анализа

- Имеются данные целого ряда экспериментов в области $\psi(3770)$. Совместная обработка могла бы прояснить ситуацию.
- Полностью корректный учёт систематических ошибок различных экспериментов и их корреляции только на основе публикаций вряд ли реален, тем не менее такой анализ даёт несколько интересных результатов.

204 точки $3.678 < W < 3.9$ ГэВ

- **BES** $e^+e^- \rightarrow hadrons$ [PRL 97 2006) 262001]
измерение R , 68 точек, декабрь 2003
- **BABAR** $D\bar{D}$ [PRD 76 2007) 11105], 36 точек, $\int_{W-\Delta W/2}^{W+\Delta W/2} \sigma_{D\bar{D}}(W') dW' / \Delta W$,
 $\Delta W = 5$ МэВ, известно число событий
- **BES** $D\bar{D}$ [PLB 668 (2008) 263], 14 точек, $\sigma_{e^+e^- \rightarrow D\bar{D}(\gamma)}(W)$
- **BELLE** $D\bar{D}$ [PRD 77 2008) 11103], 9 точек, $\Delta W = 20$ МэВ
- **CLEO** $D\bar{D}$, $e^+e^- \rightarrow hadrons$ [PRL 104 (2010) 159901]
одна точка (3773 МэВ), измерено $\sigma_{e^+e^- \rightarrow h(\gamma)}(W)$, $\sigma_{e^+e^- \rightarrow D\bar{D}(\gamma)}(W)$
- **KEDR** $e^+e^- \rightarrow hadrons$ [PLB 711 (2012) 292] 17+21+38 точек
3 сканирования, $\sigma_{e^+e^- \rightarrow h(\gamma)}^{visible}(W)$, известно число событий
- **BES** данные, упомянутые в [PRL 101(2008) 102004]
(2003 Декабрь+Март = "двугорбость"), официально недоступны.

В области энергии от $\psi(2S)$ до ~ 3.9 ГэВ:

$$\begin{aligned} \sigma_{e^+e^- \rightarrow h(\gamma)}^{\text{visible}} = & (\epsilon_{\psi(2S)} \sigma_{\psi(2S)}^{RC} + \epsilon_{J/\psi} \sigma_{J/\psi}^{RC} + \epsilon_{\tau\tau} \sigma_{\tau\tau}^{RC} + \epsilon_{uds} \sigma_{uds}^{RC} \\ & + \epsilon_{D\bar{D}\pi} \sigma_{D\bar{D}\pi}^{RC}) + (\epsilon_{D\bar{D}} \sigma_{D\bar{D}}^{RC} + \epsilon_{nD\bar{D}} \mathcal{B}_{nD\bar{D}} \sigma_{\psi(3770)}^{RC}) \quad (1) \end{aligned}$$

Все эффективности, кроме ϵ_{uds} , возрастающей на 2–3%, можно считать постоянными. Для BES и КЕДР $\epsilon_{uds} \simeq 0.55$, $\epsilon_{D\bar{D}} \simeq 0.65$.

Первая скобка (1) представляет собой фон. В данных КЕДР он вычитается введением дополнительных параметров подгонки.

Данные BES представлены в виде R :

- Упрощает вычитание фона
- При вычислении результирующей эффективности и рад. поправок заложены предположения о форме сечения и параметрах $\psi(3770)$

Конверсия $R \Rightarrow \sigma_{e^+e^- \rightarrow h(\gamma)}^{\text{visible}}$ по данным [PRL 97 2006) 262001]

Основная модель $D\bar{D}$ сечения

$D\bar{D}$ сечение, опубликованное BABAR и BELLE, соответствует интегралу теоретического сечения в интервалах ΔW :

$$\sigma_{D\bar{D}}(W) = \frac{\pi\alpha^2}{3W^2} \beta_D^3 |F_D(W)|^2, \quad \beta_D = \sqrt{1 - 4m_D^2/W^2}.$$

где $F_D(W)$ — форм фактор D -мезона.

В духе модели векторной доминантности (VDM):

$$F_D(W) = F^{\psi(3770)}(W) e^{i\phi} + F^{\psi(2S)}(W) + F_0. \quad (2)$$

$F^{\psi}(W)$ — р-волновая Брейт-Вигнеровская амплитуда с зависящей от энергии полной шириной резонанса $\Gamma(W)$

F_0 — реальная константа (вклад более возбужденных ψ -состояний состояний)

Обработка адронного сечения в интервале 3.7–4.6 ГэВ в духе VDM:
BES [PLB 660 (2008) 315]

Вклад $\psi(2S)$ выше $D\bar{D}$ -порога не учитывался.

Сечение $D\bar{D}(\gamma)$, опубликованное BES, соответствует

$$\sigma_{D\bar{D}}^{RC}(W) = \int z_{D\bar{D}}(W' \sqrt{1-x}) \sigma_{D\bar{D}}(W' \sqrt{1-x}) \\ \times \mathcal{F}(x, W'^2) G(W, W') dW' dx,$$

Вероятность потери энергии $\mathcal{F}(x, s)$ рассчитывается по работе Э.А. Кураев и В.С. Фадин [Sov. J. Nucl. Phys. 41 (1985) 466]

$G(W, W')$ — гауссово распределение по энергии столкновения, $\sigma_W \approx 1.3$ МэВ для BEPC

Минимизируется сумма функций правдоподобия по отдельным экспериментам

$$\mathcal{L}^{exp} = \mathcal{L}_{data}(f_N, \Delta_W) + \mathcal{L}_{syst}(f_N, \Delta_W)$$

\mathcal{L}_{data} – $2 \times$ пуассоновское правдоподобие при известном числе событий или χ^2 , если известно только сечение со статистической ошибкой

Интегрирование теоретического сечения для BABAR и BELLE производится численно с шагом 0.5 МэВ

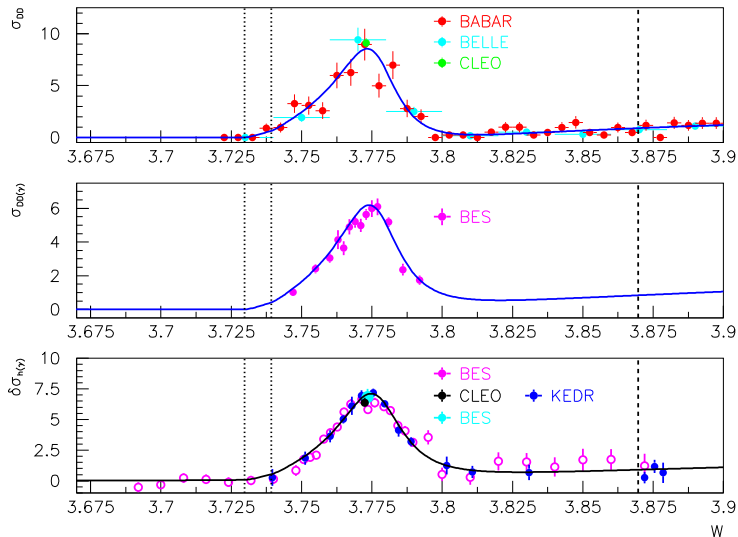
Ожидаемые значения вычисляются со свободными параметрами f_N и Δ_W (учёт ошибки в нормализации и сдвиг энергетической шкалы). Их вариация ограничивается слагаемым

$$\mathcal{L}_{syst} = (f_N - 1)^2 / \sigma_N^2 + \Delta_W^2 / \delta_W^2$$

σ_N and δ_W взяты из соответствующих публикаций. $\sigma_N \simeq 10\%$ для $D\bar{D}$ сечения и около 3% для адронного сечения; $\delta_W^2 \simeq 1$ МэВ (кроме КЕДР)

Результаты обработки по основной модели

Подгонка в каналах $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$, $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}(\gamma)$, $e^+e^- \rightarrow h(\gamma)$:



Результаты обработки по основной модели

$$\chi^2/N_{DoF} = 232/189, \quad P(\chi^2) = 1.8\% \quad (\text{Официальные данные})$$

$$\chi^2/N_{DoF} = 223/189, \quad P(\chi^2) = 4.3\% \quad (\text{Неофициальные } \sigma_{D\bar{D}(\gamma)}^{BES})$$

Результаты можно считать удовлетворительными, учитывая наличие нестатистических выбросов в данных

Для использованной модели форм фактора функция правдоподобия имеет два локальными минимума с очень близкими χ^2 при двух значения фазы интерференции $\psi(2S)$ - $\psi(3770)$:

	M (МэВ)	Γ (МэВ)	$\mathcal{B}_{nD\bar{D}}$	Γ_{ee} (эВ)	ϕ (град)
1:	3779.3±1.0	26.7±1.4	0.19±0.05	202±18	185.6±5.2
2:	3779.5±1.0	26.8±1.4	0.11±0.03	346±19	228.6±3.0

На новом уровне точности подтверждаются результаты работы КЕДР

Подтверждается большие значения вероятности не- $D\bar{D}$ распадов $\psi(3770)$, заявленное BES

Альтернативные модели $D\bar{D}$ сечения

- Н.Н. Ачасов и Г.Н. Шестаков [PRD 86 (2012) 114013] – форм фактор D -мезона, удовлетворяющий условию унитарности в упругом рассеянии
- G.-Y. Chen and Q. Zhao [PLB 718(2013) 1369] - форма линии $\psi(3770)$ в эффективной полевой теории.

В обоих случаях нет предсказаний по полному адронному сечению для пренебрежимого значения $\mathcal{B}_{nD\bar{D}}$

Сравнение трех моделей на $D\bar{D}$ -данных BABAR, BELLE, BES и CLEO в двух энергетических диапазонах:

модель	χ^2	$P(\chi^2)\%$	χ^2	$P(\chi^2)\%$
VDM	71.78/54	5.3	34.07/29	23.7
A.-Ш.	80.05/54	1.2	33.52/28	21.7
C.-Z.	210.3/54		33.66/29	25.2
W	< 3.9 GeV		< 3.8 GeV	

Нет сколько-нибудь значительного улучшения в описании $D\bar{D}$ данных

О выборе решения из двух математически ВОЗМОЖНЫХ

Для двухчастичных процессов типа $ab \rightarrow cd$ при заданном орбитальном моменте условие унитарности требует, чтобы фаза интерференции промежуточных резонансов составляла либо 0, либо 180° .

Если предположить, что то же требование сохраняется для процесса $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$, первое решение с фазой $\psi(2S)$ - $\psi(3770)$ интерференции 185.6 ± 5.2 получает существенное преимущество по сравнению со вторым с фазой 228.6 ± 3.0 .

	M (МэВ)	Γ (МэВ)	$\mathcal{B}_{nD\bar{D}}$	Γ_{ee} (эВ)
Данная работа	3779.3 ± 1.0	26.7 ± 1.4	0.19 ± 0.05	202 ± 18
КЕДР	3779.2 ± 1.9	$24.9^{+4.6}_{-4.1}$		154^{+81}_{-63}
PDG	3778.1 ± 1.2	27.5 ± 0.9	$0.07^{+0.09}_{-0.08}$	256 ± 16

О распаде $\psi(3770)$ в не- $D\bar{D}$ состояния

Полученное значение $\mathcal{B}_{nD\bar{D}} = 0.19 \pm 0.05$ согласуются с результатом BES по “инклюзивному не- $D\bar{D}$ ” отбору, основанному на отсутствии K -мезонов с большим импульсом в распадах $D\bar{D}$ -событиях не слишком далеко от порога:

$$\mathcal{B}_{nD\bar{D}} = 0.151 \pm 0.056 \pm 0.018 \quad [\text{PLB 659 (2008) 74}]$$

Для дополнительной проверки была проведена обработка с исключением данных BES:

$$\Gamma_{nD\bar{D}} = 5.06_{-1.46}^{+1.39} \text{ МэВ} \quad (\text{все данные})$$

$$\Gamma_{nD\bar{D}} = 7.06_{-1.97}^{+1.82} \text{ МэВ} \quad (\text{без BES})$$

Выводы

На основании попытки совместной обработки почти всех имеющихся данных можно заключить, что

- качество экспериментальных данных оставляет желать лучшего
- проблемы с формой линии $\psi(3770)$ кажутся преувеличенными
- высокая вероятность распада $\psi(3770)$ в не- $D\bar{D}$ состояния получает дополнительное подтверждение

Выводы

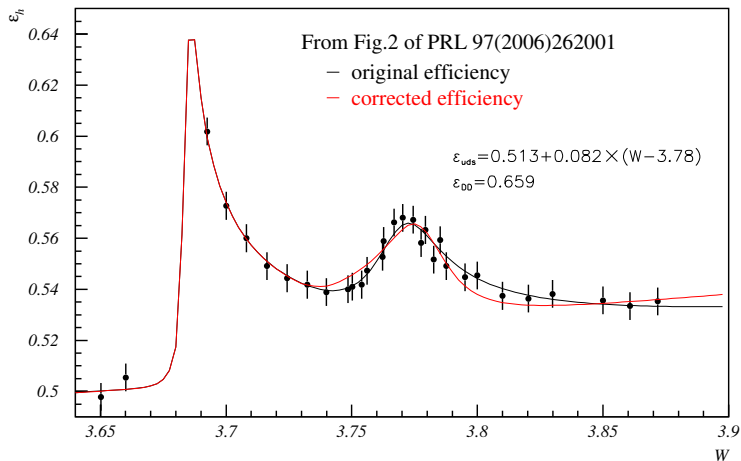
На основании попытки совместной обработки почти всех имеющихся данных можно заключить, что

- качество экспериментальных данных оставляет желать лучшего
- проблемы с формой линии $\psi(3770)$ кажутся преувеличенными
- высокая вероятность распада $\psi(3770)$ в не- $D\bar{D}$ состояния получает дополнительное подтверждение

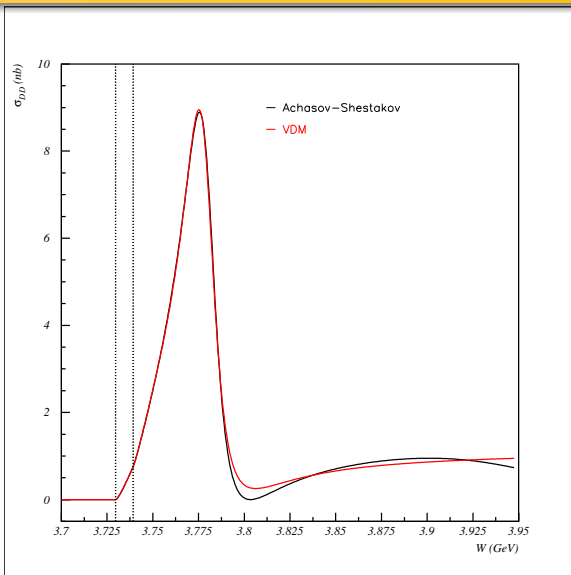
Пожелание

Желательно большее внимание теоретиков к вопросам обработки данных и настойчивость в поиске ответов на загадки, которые ставит эксперимент.

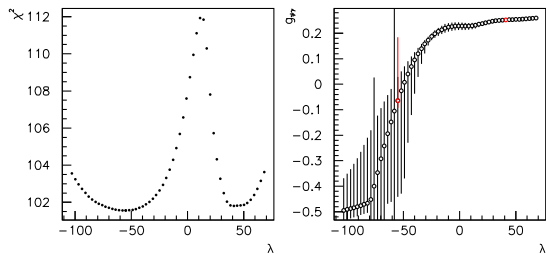
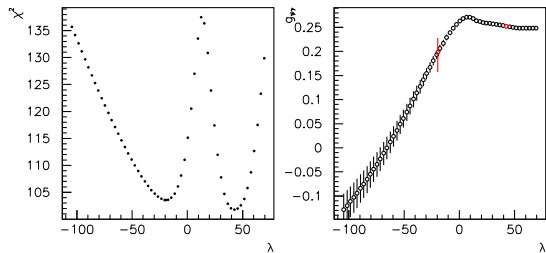
Поправка эффективности регистрации событий:



Сравнение унитарного подхода и ВДМ

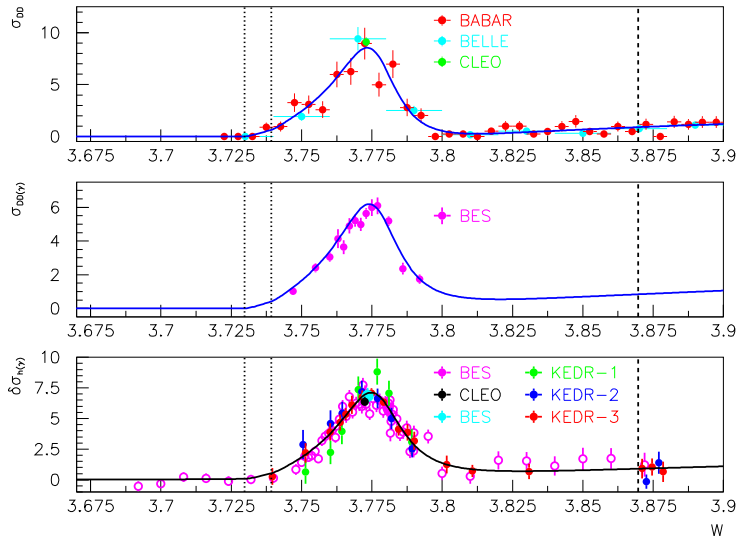


Остаточная неоднозначность в унитарном подходе



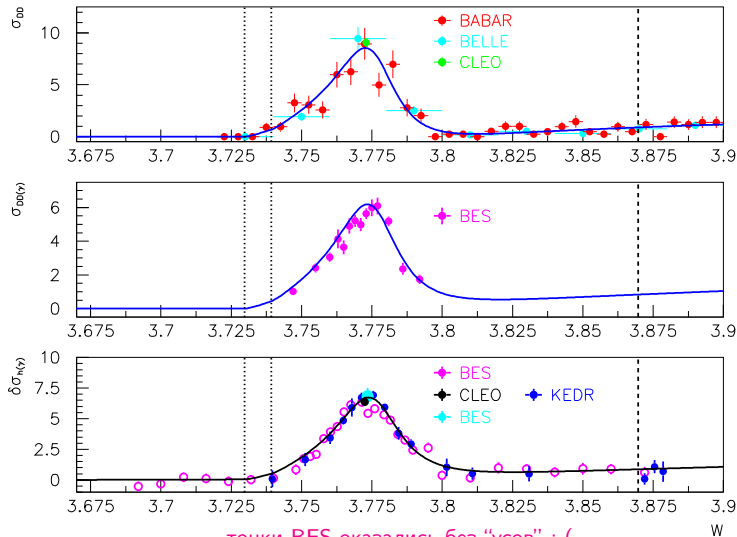
Результаты обработки по основной модели

Подгонка в каналах $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$, $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}(\gamma)$, $e^+e^- \rightarrow h(\gamma)$:



Результаты обработки по основной модели

Подгонка в каналах $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$, $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}(\gamma)$, $e^+e^- \rightarrow h(\gamma)$:



точки BES оказались без "усов" :-)