

Измерение вероятности распада $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ и резонансного вклада $f_2(1270)\gamma$

Резанова Ольга, коллаборация КЕДР

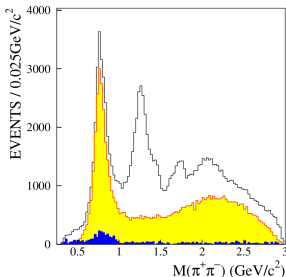
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск



LXXV Международная конференция ЯДРО-2025.
Санкт-Петербург, 1-6 июля 2025

- 1 Обзор опубликованных результатов
- 2 Применявшиеся методы обработки
- 3 Детектор КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М
- 4 Моделирование
- 5 Процедура обработки
- 6 Предварительные результаты $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$,
 $J/\psi \rightarrow f_2(1270)\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$
- 7 Заключение

Характерный спектр масс в процессе $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ с учетом фона $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ (желтый) и других процессов (синий) (работа BES):



Обзор опубликованных результатов

- Основной интерес к радиационным распадам J/ψ связан с поиском глюболов, однако, ни один из наблюдаемых в распаде резонансов как несомненный глюбол идентифицирован не был
- Экспериментальная ситуация по процессу $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ неоднозначна. Цель нашей работы — прояснить ситуацию, насколько позволяет ограниченная статистика, и получить недостающий результат по полной вероятности такого распада

Опубликованные результаты по $Br(J/\psi \rightarrow \gamma X) \times Br(X \rightarrow \pi^+\pi^-) \times 10^5$:

Резонанс	Mark III ¹⁾	DM2 ²⁾	BES2 ³⁾	on CLEO data ⁴⁾
$f_2(1270)$	$115 \pm 7 \pm 19$	$74.4 \pm 2.4 \pm 11.2$	$91.4 \pm 0.7 \pm 14.8$	$108.8 \pm 3.9 \pm 8.1$
$f_2(1430)$	—	$7.9 \pm 2.4 \pm 1.2$	—	+
$f_2'(1525)$	—	$2.5 \pm 1. \pm 0.4$	—	+
$f_0(1500)$	—	—	$6.7 \pm 0.2 \pm 3.0$	$11.0 \pm 2.4 \pm 1.6$
$f_2(1720)$ $f_0(1710)$	$16 \pm 4 \pm 3$	$10.3 \pm 1.6 \pm 1.5$	$26.4 \pm 0.4 \pm 7.5$	$27.9 \pm 2.5 \pm 2.9$
$f_4(2030)$	—	$16.3 \pm 2.4 \pm 2.4$	+	—
$f_0(2100)$	$30 \pm 5 \pm 6$	—	—	$44.3 \pm 3.3 \pm 5.8$

1) R.M.Baltrusaitis et al., Phys.Rev.D 35 (1987) 2077

3) M. Ablikim et al., Phys.Lett. B642 (2006) 441

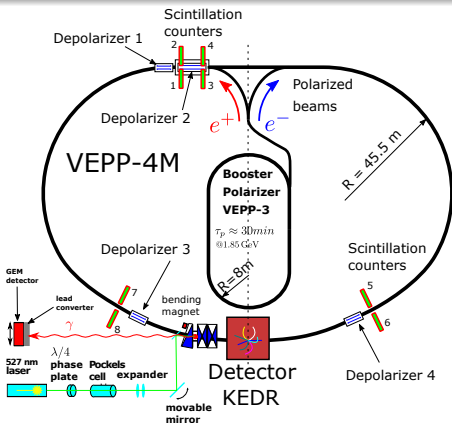
2) J.E. Augustin et al., Z.Phys.C 36 (1987) 369

4) Dobbs et al., Phys.Rev.D 91 (2015), 052006

В работе BES2 дополнительно рассматривались резонансы $f_2(1810)$, $f_0(2200)$ и $f_2(2150)$, однако, вероятности распада не публиковались. В работах BES3 получена вероятность распадов $J/\psi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ и $J/\psi \rightarrow K_s K_l \gamma$ как функция массы пары без рассмотрения отдельных резонансов

- Mark III (13M J/ψ): Подгонка области 0.9-2.5 ГэВ тремя не интерферирующими Брейт-Виггнеровскими формами плюс плавный фон от $J/\psi \rightarrow \rho\pi$. Подгонка 4 интерферирующими амплитудами для обнаружения сигнала $f_2'(1525) \rightarrow \pi^+\pi^-$. Дополнительно рассматривается мода $J/\psi \rightarrow K^+K^-\gamma$. Спиновый анализ в окрестностях резонансов
- DM2 (8.6M J/ψ): Подгонка аналогично Mark III. Дополнительно вводится резонанс M_x ($f_2(1430)$). Учет интерференции $f_2(1270)$ и $f_2'(1525)$
- BES (58M J/ψ): Парциально-волновой анализ с необычным выбором рассматриваемых резонансов (нет $f_2'(1525)$, $f_2(1430)$, $f_0(2100)$), рассматриваются $f_2(1810)$ либо $f_2(1950)$, $f_0(2020)$, $f_2(2150)$). Функции Брейта-Виггнера с постоянной $\Gamma(W)$. Систематические ошибки до 45%. Независимо рассматривается мода $J/\psi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$
- Dobbs et al на данных CLEO (5.1M J/ψ): Подгонка Брейт-Виггнеровскими формами с зависимостью $\Gamma(W)$ для двухчастичного распада без учета интерференции. Дополнительно рассматриваются моды $J/\psi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$, $J/\psi \rightarrow K\bar{K}\gamma$
- КЕДР (4.3M J/ψ): Учет интерференции резонансов с одинаковыми квантовыми числами, подгонка формами Брейт-Виггнера с зависимостью $\Gamma(W)$ для двухчастичных и многочастичных распадов. В отличие от других анализов, значения масс и ширин резонансов фиксированные, неопределенности включены в систематические ошибки

Коллайдер ВЭПП-4М



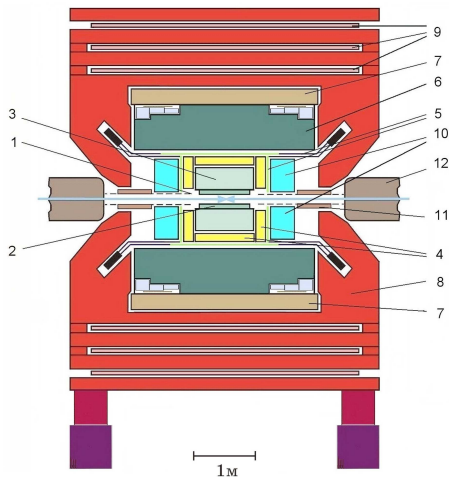
ВЭПП-4 начал работу 1981,
с 1998 – ВЭПП-4М

Периметр	366 м
Энергия пучка	$1 \div 5$ ГэВ
Количество сгустков	2×2
Светимость: $E = 1.9$	$2 \cdot 10^{30} \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$
$E = 3.5$	$1 \cdot 10^{31} \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$

Измерение энергии методом
резонансной деполяризации:

- Тушековский поляриметр (внутрисгустковое рассеяние), $E < 2$ ГэВ
Мгновенная точность измерений $\simeq 1 \times 10^{-6}$
Точность интерполяции энергии $(5 \div 15) \times 10^{-6}$ ($10 \div 60$ keV)
- Лазерный поляриметр (асимметрия рассеяния поляризованного света). При 4.73 ГэВ
статистическая точность $\simeq 3 \times 10^{-6}$ / 15 минут
корректируемая систематическая неопределенность 3×10^{-6} (30 кэВ)

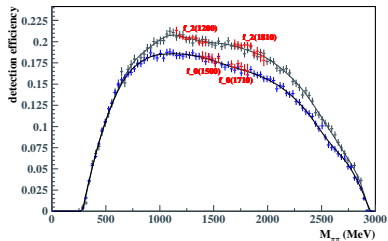
Детектор КЕДР



- ❶ Вакуумная камера
 - ❷ Вершинный детектор
 - ❸ Дрейфовая камера
 - ❹ Аэрогелевые счетчики
 - ❺ Сцинтилляционные счетчики
 - ❻ Калориметр на жидком криптоне
 - ❼ Сверхпроводящая катушка
 - ❽ Ярмо магнита
 - ❾ Мюонная система
 - ❿ CsI калориметр
 - ⓫ Компенсационный соленоид
 - ⓬ Линза ВЭПП-4м
-
- Монитор светимости по ОТИ в направлениях e^+ и e^-
 - Система регистрации рассеянных электронов для изучения двухфотонной физики

Обзор результатов на низких энергиях Physics of Particles and Nuclei. Volume 54, pp. 185-226

- 1 Моделирование $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ делалось в согласии с работой V.V. Anashin *et al.* [KEDR], JHEP 06 (2023) 196. Рассматривались вклады $\rho(770)$, ω , $\rho(1450)$, $\rho(1700)$ и нерезонансный $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, с учетом интерференции
- 2 Для моделирования резонансов f_2 отношение спиральных амплитуд бралось из работы BES. Эффективность регистрации умеренно зависит от выбора спиральных амплитуд и определяется инвариантной массой пары $\pi^+\pi^-$. Эффективность регистрации состояний f_0 ниже, чем у f_2 , из-за распределения по полярному углу $1 + \cos^2(\theta)$.



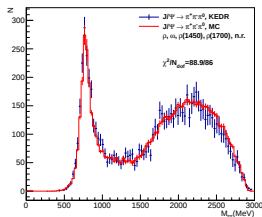
Зависимость эффективности регистрации $\pi^+\pi^-\gamma$ от инвариантной массы $\pi^+\pi^-$ пары. Черный — резонансы f_2 , синий — f_0 , красный — эффективность регистрации отдельных резонансов: $f_2(1270)$, $f_2(1810)$, $f_0(1500)$, $f_0(1710)$.

При реконструкции данных моделирования накладываются экспериментальные события, записанные при произвольных столкновениях пучков без требования срабатывания детектора

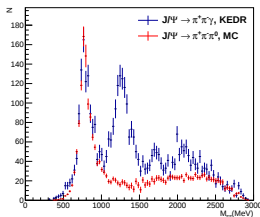
Условия отбора $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$:

- Два противоположно заряженных трека из места встречи, допускается наличие одного дополнительного трека не из места встречи
- Требуется фотон с энергией $200 < E_\gamma < 1700$ МэВ
- Допускается наличие дополнительных фотонов с энергией < 50 МэВ
- Угол между направлением вылета фотона и системы $\pi^+\pi^-$ больше 168°
- Отбраковываются события $J/\psi \rightarrow e^+e^-\gamma$, $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$
- После кинематической реконструкции (к.р.) $\chi^2_{\pi\pi} < 100$, $\chi^2_{\pi\pi} < \chi^2_{KK}$

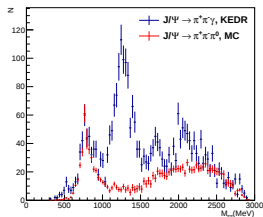
Использовано 4.3 млн событий J/ψ отобранных из данных 2015 года



Моделирование $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ с пятью интерферирующими вкладками, имеется хорошее согласие моделирования с экспериментом



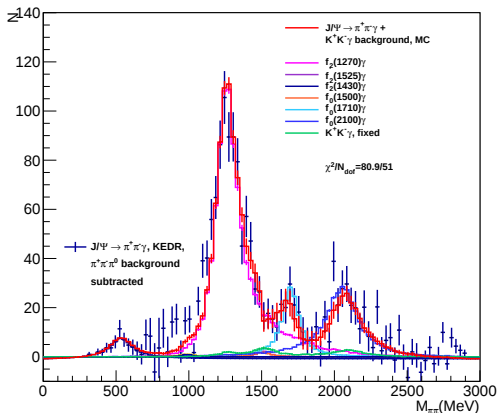
$J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ (3928 событий)
Вклад фона $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, определяется по событиям моделирования, прошедшим отбор $\pi^+\pi^-\gamma$, путем подгонки



$J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ (2797 событий)
Фон $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, подавлен: отброшены события, в которых π^0 зарегистрирован как один фотон, с использованием информации от полосок LKr калориметра

Предварительные результаты $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$, $J/\psi \rightarrow f_2(1270)\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$

Подгонка сигнала $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ с интерференцией резонансов с одинаковыми квантовыми числами. Массы и ширины резонансов фиксированы. Для наглядности вычтен вклад $J/\psi \rightarrow 3\pi$



Мы представляем 2 результата:

- $Br(J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma) = (207.4 \pm 7.9 \pm 12.8) \times 10^{-5}$
- $Br(J/\psi \rightarrow f_2(1270)\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma) = (116.0 \pm 5.3 \pm 7.1) \times 10^{-5},$

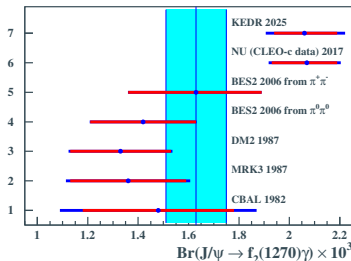
поскольку набор резонансов выше $f_2(1270)$ не однозначен, и статистические ошибки велики

1506 событий после вычитания $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

Систематические ошибки

Источник неопределенности	$J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$	$J/\psi \rightarrow f_2(1270)\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$
Спиральные амплитуды $J/\psi \rightarrow f_2\gamma$	2.0%	3.2%
Ядерное взаимодействие	2.5%	2.5%
Моделирование $J/\psi \rightarrow 3\pi$	3.5%	2.0%
Дополнительные резонансы	2.5%	2.0%
Фон от не 3π распадов J/ψ	1.5%	0.5%
Число J/ψ	1.1%	1.1%
Алгоритм подавления π^0	1.2%	1.0%
Условие на χ^2 к.р.	2%	2%
Модель $\Gamma(W)$		1.5%
Разница эффективностей f_2 и f_0	0.3%	
Реконструкция треков	0.8%	0.8%
Фиксация ширин резонансов		0.8%
Фиксация масс резонансов		0.3%
Идентификация π/K по кин.рек.	0.3%	0.2%
Квадратичная сумма	6.2%	6.1%

- Проведена обработка процесса $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ с использованием 4.3 млн событий распада J/ψ
- Впервые получен результат (предварительный) по полной вероятности распада $Br(J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma) = (207.4 \pm 7.9 \pm 12.8) \times 10^{-5}$, который в предположении изотопической инвариантности согласуется с результатом BES III:
 $Br(J/\psi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma) = (115. \pm 50.) \times 10^{-5}$
- Получен предварительный результат $Br(J/\psi \rightarrow f_2(1270)\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma) = (116.0 \pm 5.3 \pm 7.1) \times 10^{-5}$ с учетом интерференции резонансов с одинаковыми квантовыми числами
- Используя табличное значение вероятности распада $Br(f_2(1270) \rightarrow \pi\pi) = 0.843^{+0.029}_{-0.009}$, мы получили вероятность распада $Br(J/\psi \rightarrow \gamma f_2) = (2.06 \pm 0.01^{+0.13}_{-0.12}) \times 10^{-3}$

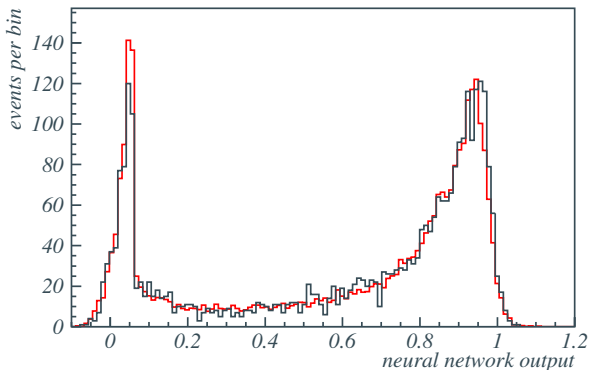


Спасибо за внимание!

Подавление слившихся π^0

Используется трехуровневая нейросеть с входной информацией от 7 слоев полосок и 3 слоев башен LKr-калориметра. Выход сети для слившихся фотонов от распада π^0 меньше, чем для одиночных фотонов

Проверка на фотонах от распада π^0 в процессе $J/\psi \rightarrow \rho^0 \pi^0$:



Черный цвет - эксперимент, красный - моделирование

Поправка на потерю одиночных фотонов составляет 0.964 ± 0.01

Вероятности распадов $J/\psi \rightarrow R\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ с неопределенностью менее 50 (10^{-5}):

$f_2(1270)$	116.3 ± 5.3	4.7%
$f_0(1710)$	$26.1 \pm 11.$	42.%
$f_0(2100)$	56.1 ± 11.5	20.6%