

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

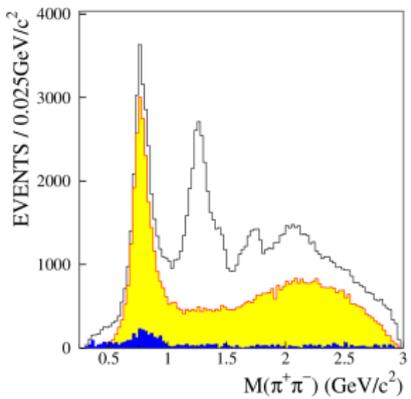
Резанова Ольга, коллаборация КЕДР

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

Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН.
Новосибирск, 10 марта 2026

- 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 II):



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⁾ | BES II 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

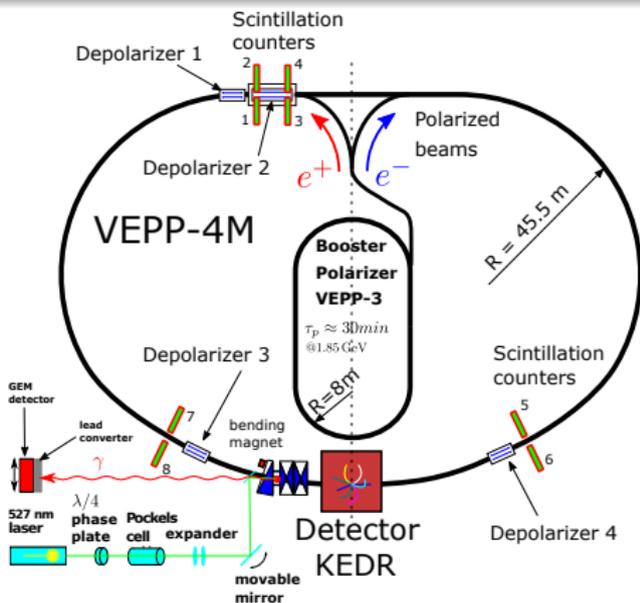
³⁾ M. Ablikim et al., Phys.Lett. B642 (2006) 441

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

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

В работе BES II дополнительно рассматривались резонансы $f_2(1810)$, $f_0(2200)$ и $f_2(2150)$, однако, вероятности распада не публиковались. В работах BES III 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-Вигнеровскими 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 II (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-Вигнера 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-Вигнеровскими 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-Вигнера с зависимостью $\Gamma(W)$ для двухчастичных и многочастичных распадов. В отличие от других анализов, значения масс и ширин резонансов фиксированные, соответствующие неопределенности включены в систематические ошибки



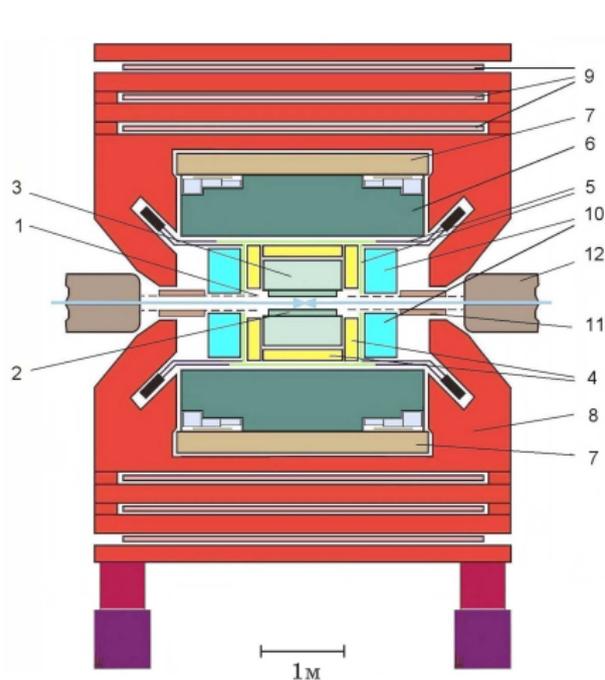
ВЭПП-4 начал работу 1981,
с 1998 – ВЭПП-4М

| | |
|-----------------------|--|
| Периметр | 366 м |
| Энергия пучка | 1 ÷ 5 ГэВ |
| Количество сгустков | 2 × 2 |
| Светимость: $E = 1.9$ | $2 \cdot 10^{30} \frac{1}{\text{CM}^2 \cdot \text{C}}$ |
| $E = 3.5$ | $1 \cdot 10^{31} \frac{1}{\text{CM}^2 \cdot \text{C}}$ |

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 ÷ 60 keV)
- Лазерный поляриметр (асимметрия рассеяния поляризованного света). При 4.73 ГэВ
статистическая точность $\simeq 1.5 \times 10^{-6}$ / 10 – 20 минут
корректируемая систематическая неопределенность 1×10^{-6} (30 кэВ)

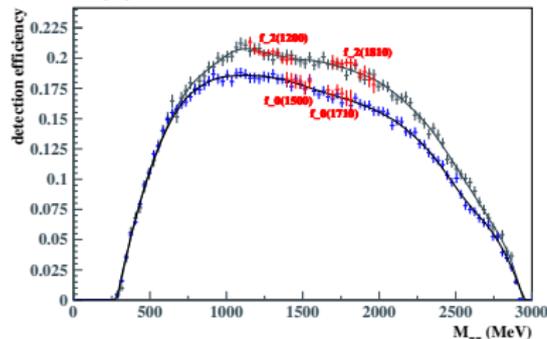
Детектор КЕДР



- 1 Вакуумная камера
 - 2 Вершинный детектор
 - 3 Дрейфовая камера
 - 4 Аэрогелевые счетчики
 - 5 Сцинтилляционные счетчики
 - 6 Калориметр на жидком криптоне
 - 7 Суперпроводящая катушка
 - 8 Ярмо магнита
 - 9 Мюонная система
 - 10 CsI калориметр
 - 11 Компенсационный соленоид
 - 12 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 II. 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 $1 + \cos^2(\theta)$.



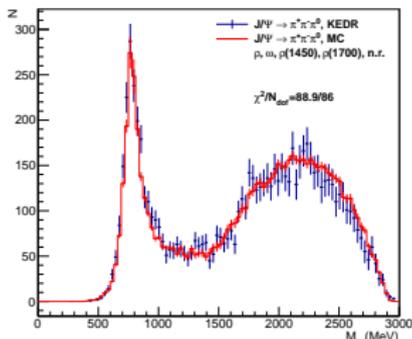
Зависимость эффективности регистрации $\pi^+\pi^-\gamma$ от инвариантной массы $\pi^+\pi^-$ пары. Черный — резонансы f_2 , синий — f_0 , красный — эффективность регистрации отдельных резонансов: $f_2(1270)$, $f_2(1810)$, $f_0(1500)$, $f_0(1710)$.

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

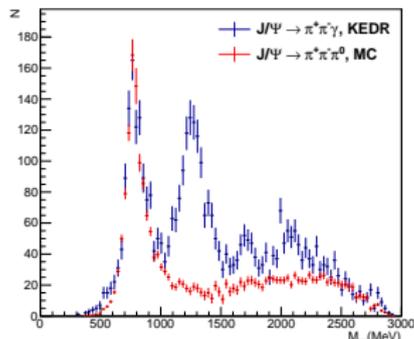
Условия отбора $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$:

- 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



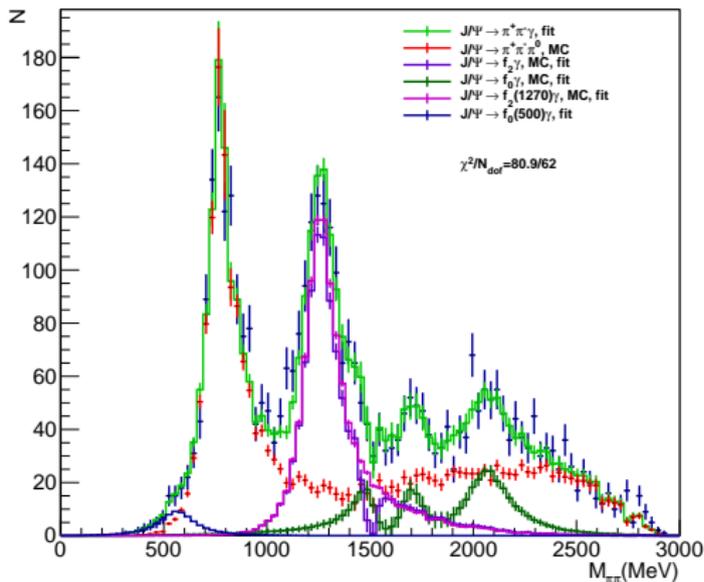
Моделирование $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ с пятью интерферирующими вкладками, имеется хорошее согласие моделирования с экспериментом



$J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ (3928 событий). Форма фона $J/\psi \rightarrow 3\pi$, определяется по событиям моделирования, прошедшим отбор $\pi^+\pi^-\gamma$, сложением вкладов согласно моделированию $J/\psi \rightarrow 3\pi$

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.



3928 событий

Мы представляем 2 результата:

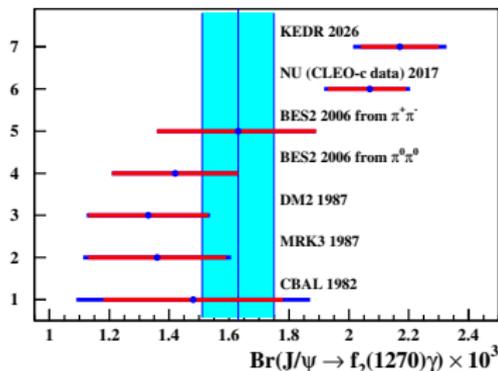
- $Br(J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma) = (222.5 \pm 7.2 \pm 14.0) \times 10^{-5}$
- $Br(J/\psi \rightarrow f_2(1270)\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma) = (121.9 \pm 4.8 \pm 7.1) \times 10^{-5}$,

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

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% |
| Условие на χ^2 к.р. | 2% | 2% |
| Модель $\Gamma(W)$ | | 1.5% |
| Разница эффективностей f_2 и f_0 | 1.4% | |
| Реконструкция треков | 0.8% | 0.8% |
| Фиксация ширины резонансов | | 0.8% |
| Фиксация масс резонансов | | 0.3% |
| Идентификация π/K по кин.рек. | 0.3% | 0.2% |
| Квадратичная сумма | 6.3% | 5.8% |

- 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 $Br(J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma) = (222.5 \pm 7.2 \pm 14.0) \times 10^{-5}$, 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 $Br(J/\psi \rightarrow f_2(1270)\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma) = (121.9 \pm 4.8 \pm 7.1) \times 10^{-5}$
 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 $Br(J/\psi \rightarrow \gamma f_2) = (2.17 \pm 0.15 \pm 0.13) \times 10^{-3}$



Спасибо за внимание!

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

| | | |
|-------------|-----------------|-------|
| $f_2(1270)$ | 212.9 ± 4.8 | 4.0% |
| $f_0(1500)$ | $10. \pm 4.8$ | 47.7% |
| $f_0(1710)$ | 8.3 ± 3.9 | 46.4% |
| $f_0(2100)$ | 38.8 ± 7.1 | 18.3% |

