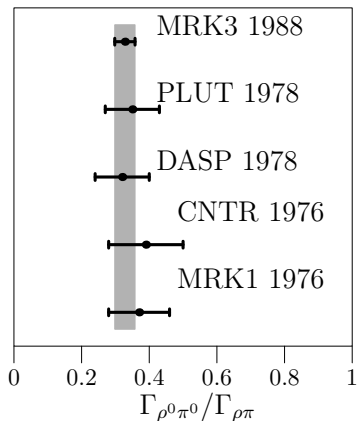
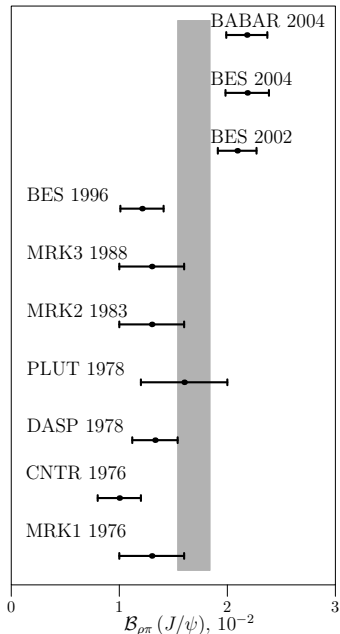


Анализ процесса $J/\psi \rightarrow \rho\pi$ в эксперименте КЕДР

К.Ю. Тодышев

25.03.22

Мотивация

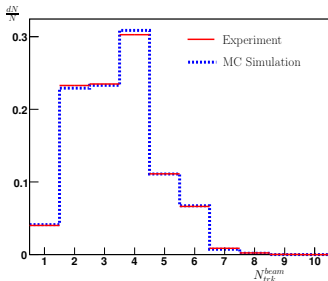


$$\mathcal{B}_{\rho\pi}(J/\psi) = 1.69 \pm 0.15\% ,$$

Scale Factor 2.4

$$\Gamma_{\rho^0\pi^0}/\Gamma_{\rho\pi} = 0.328 \pm 0.027$$

$$\mathcal{B}_{\rho^0\pi^0}(J/\psi) = (5.6 \pm 0.7) \times 10^{-3}$$



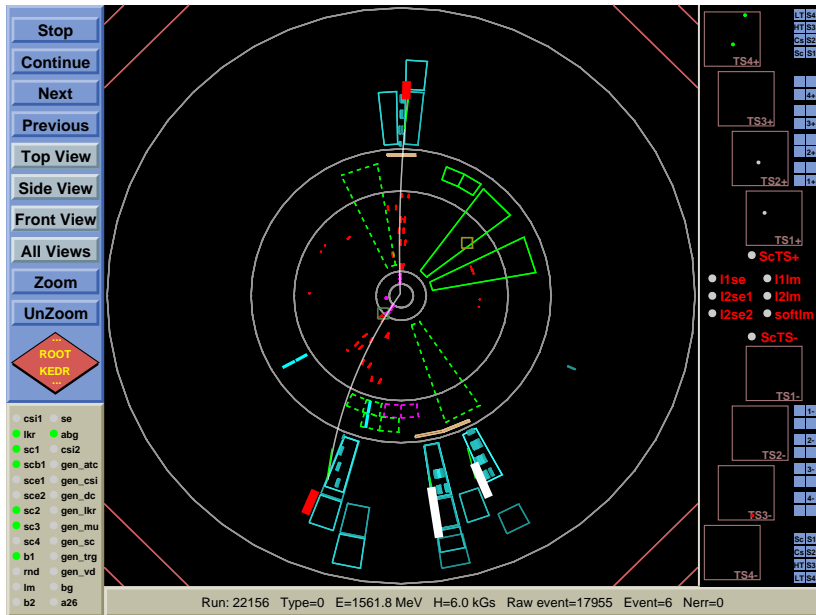
Имеется возможность настройки моделирования $J/\psi \rightarrow$ адроны, что позволяет с точностью $\sim 1.1\%$ определить число рождённых J/ψ (Объём статистики, использованной в анализе соответствует

$$N_{J/\psi} = 5.20593e + 06)$$

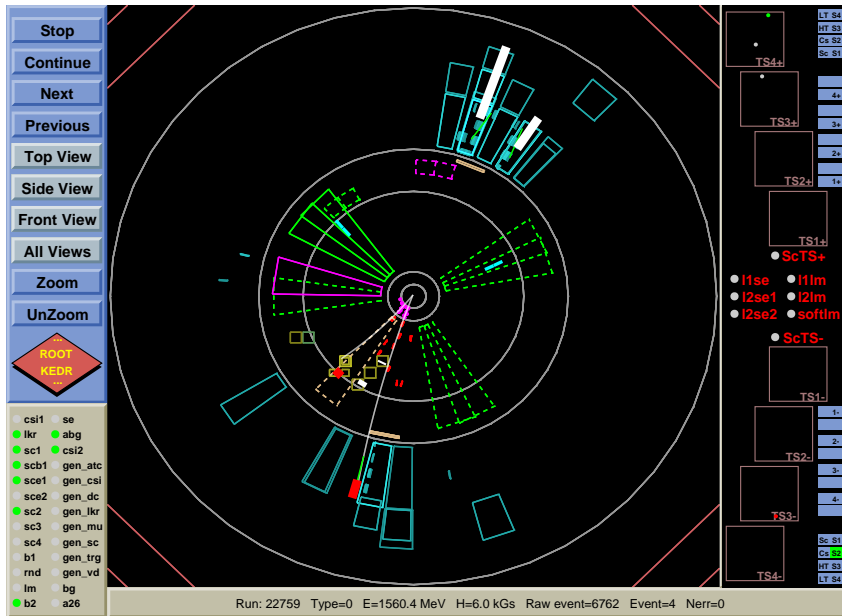
$\int L dt = 1.41 \text{ пб}^{-1}$ в области резонанса и $\int L dt = 0.27 \text{ пб}^{-1}$ вне.

	%
Неопределённость моделирования	0.7
Вариация критериев отбора	0.6
Варианты калибровки $X(t)$	0.5
Эффективность триггера	0.3
Ядерное взаимодействие	0.2
Квадратичная сумма	1.1

Пример события



Пример события



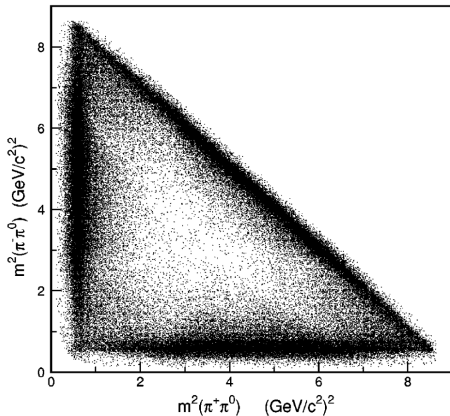


FIG. 3. The Dalitz plot for $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$.

Из работы BES 2004
Phys. Rev. D 70, 012005

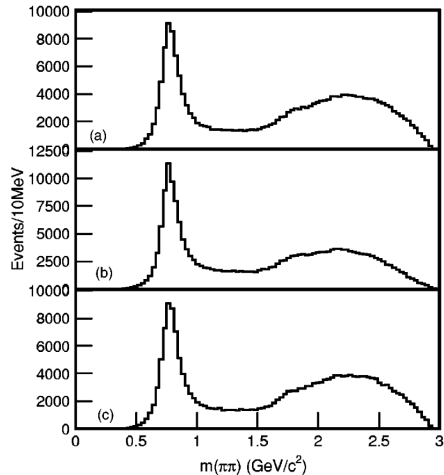
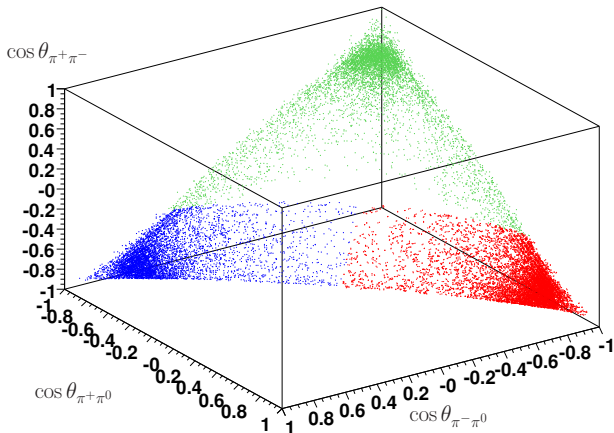


FIG. 4. The distributions of the invariant mass of two pions for (a) $m_{\pi^+ \pi^0}$, (b) $m_{\pi^+ \pi^-}$, and (c) $m_{\pi^- \pi^0}$.

Из работы BES 2004
Phys. Rev. D 70, 012005

Идея анализа



В координатах $\cos \theta_{\pi^+\pi^0}$, $\cos \theta_{\pi^-\pi^0}$, $\cos \theta_{\pi^+\pi^-}$

Критерии на ограничения парных углов разлёта более эффективны для выделения мод в процессе $J/\psi \rightarrow \rho\pi$, чем ограничения на квадраты инвариантных масс и сами инвариантные массы, восстанавливаемые по паре пионов.

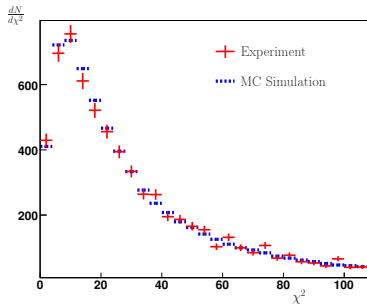
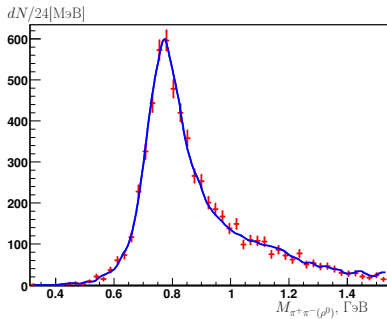
- 2 трека (1 IP || 2 IPXY).
- не меньше 2 кластеров с энергией больше 50 МэВ каждый, либо 1 кластер с энергией 150 МэВ.
- $\chi_{\pi^+\pi^-\pi^0}^2 < \chi_{K^+K^-\pi^0}^2$.
- $\chi_{\pi^+\pi^-\pi^0}^2 < 100$.

- Условия на косинусы углов

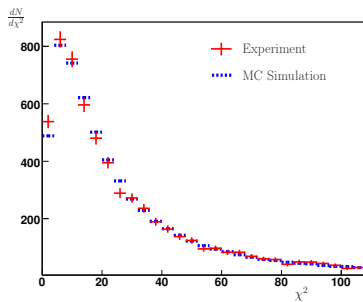
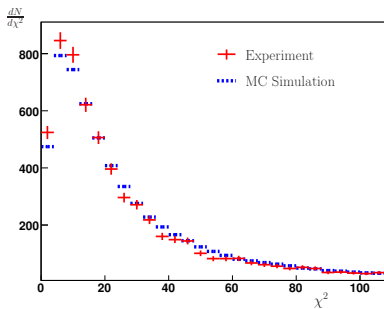
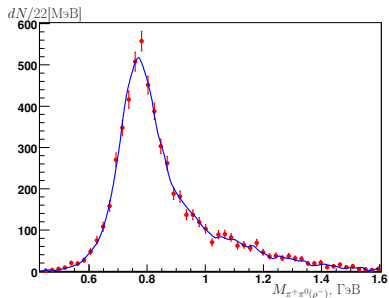
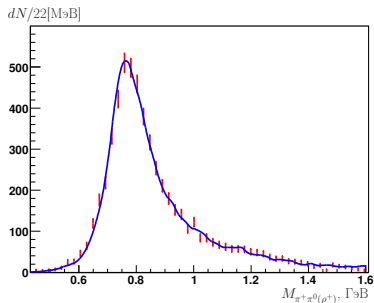
$\cos \theta_{\pi^+\pi^-}$	$\rho^0 \pi^0$	$\rho^+ \pi^-$	$\rho^- \pi^+$
> -0.475	> -0.475	< -0.475	< -0.475
-	$\cos \theta_{\pi^+\pi^0} > \cos \theta_{\pi^-\pi^0}$		$\cos \theta_{\pi^-\pi^0} > \cos \theta_{\pi^+\pi^0}$

- Если используется только один кластер для построения π^0 , то для треков $E/p < 0.75$ и условие $\cos \theta_{\pi^+\pi^-} + \cos \theta_{\pi^+\pi^0} + \cos \theta_{\pi^-\pi^0} < -1.1$.
- Отбраковка космики

$$J/\psi \rightarrow \rho^0 \pi^0$$



$J/\psi \rightarrow \rho^+ \pi^-, \rho^- \pi^+$



Аналитическая форма сечения

$$\frac{d\sigma}{d\Gamma} = \left| \sum_i a_i + \sum_j b_j e^{i\phi} \right|^2$$

$$a_0 \stackrel{\text{def}}{=} a_{\rho^0 \pi^0} = (\mathbf{p}_+ \times \mathbf{p}_-)^2 \sin^2 \theta_n \frac{m_{\rho^0}^2}{q_0^2 - m_{\rho^0}^2 + i q_0 \Gamma_{\rho^0}(q_0^2)}$$

$$b_0 \stackrel{\text{def}}{=} b_{\rho^0(1450) \pi^0} = (\mathbf{p}_+ \times \mathbf{p}_-)^2 \sin^2 \theta_n \frac{m_{\rho^0(1450)}^2}{q_0^2 - m_{\rho^0(1450)}^2 + i q_0 \Gamma_{\rho^0(1450)}(q_0^2)}$$

$$\Gamma_{\rho^0}(q_0^2) = \Gamma_{\rho^0} \left(\frac{p_\pi(q_0^2)}{p_\pi(m_{\rho^0}^2)} \right)^3 \left(\frac{m_{\rho^0}^2}{q_0^2} \right)$$

$$\frac{d\sigma}{d\Gamma} = \left| \sum_i a_i \right|^2 + \left| \sum_j b_j \right|^2 + \sum_{i,j} \left(a_i b_j^* e^{-i\phi} + a_i^* b_j e^{i\phi} \right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
& a_0 b_0^* e^{-i\phi} + a_0^* b_0 e^{i\phi} = \\
& \frac{2m_{\rho^0}^2 m_{\rho^0(1450)}^2 (q_0^4 + m_{\rho^0}^2 m_{\rho^0(1450)}^2 + q_0^2 \Gamma_{\rho^0} \Gamma_{\rho^0(1450)})}{((q_0^2 - m_{\rho^0}^2)^2 + q_0^2 \Gamma_{\rho^0}^2)((q_0^2 - m_{\rho^0(1450)}^2)^2 + q_0^2 \Gamma_{\rho^0(1450)}^2)} \cos \phi \\
& - \frac{2m_{\rho^0}^2 m_{\rho^0(1450)}^2 q_0^2 (m_{\rho^0}^2 + m_{\rho^0(1450)}^2)}{((q_0^2 - m_{\rho^0}^2)^2 + q_0^2 \Gamma_{\rho^0}^2)((q_0^2 - m_{\rho^0(1450)}^2)^2 + q_0^2 \Gamma_{\rho^0(1450)}^2)} \cos \phi \\
& + \frac{2m_{\rho^0}^2 m_{\rho^0(1450)}^2 (q_0^3 \Gamma_{\rho^0(1450)} + q_0 \Gamma_{\rho^0} m_{\rho^0(1450)}^2)}{((q_0^2 - m_{\rho^0}^2)^2 + q_0^2 \Gamma_{\rho^0}^2)((q_0^2 - m_{\rho^0(1450)}^2)^2 + q_0^2 \Gamma_{\rho^0(1450)}^2)} \sin \phi \\
& - \frac{2m_{\rho^0}^2 m_{\rho^0(1450)}^2 (q_0^3 \Gamma_{\rho^0} + q_0 \Gamma_{\rho^0(1450)} m_{\rho^0(1450)}^2)}{((q_0^2 - m_{\rho^0}^2)^2 + q_0^2 \Gamma_{\rho^0}^2)((q_0^2 - m_{\rho^0(1450)}^2)^2 + q_0^2 \Gamma_{\rho^0(1450)}^2)} \sin \phi
\end{aligned}$$

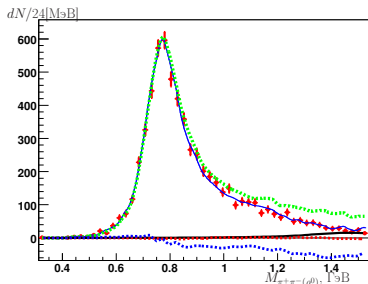
Представимо в виде $(c_{00}^+ - c_{00}^-) * \cos \phi + (d_{00}^+ - d_{00}^-) * \sin \phi$

$$\frac{d\sigma}{d\Gamma} = A + B + C^+ \cos \phi - C^- \cos \phi + D^+ \sin \phi - D^- \sin \phi$$

$$A = \left| \sum_i a_i \right|^2, \quad B = \left| \sum_j b_j \right|^2, \quad C^\pm = \sum_{i,j} c_{ij}^\pm, \quad D^\pm = \sum_{i,j} d_{ij}^\pm.$$

$$\sigma_{obs} = \varepsilon_1 A_\rho + \varepsilon_2 B_{\rho(1450)} + (\varepsilon_3 E^+ - \varepsilon_4 E^-) \cos \phi + (\varepsilon_5 F^+ - \varepsilon_6 F^-) \sin \phi$$

Промежуточные результаты после подгонки



Подгонка выполняется суммой гистограмм, эффективности и вес гистограмм определяется из моделирования.

При совместной подгонке учтены также вероятности распадов:

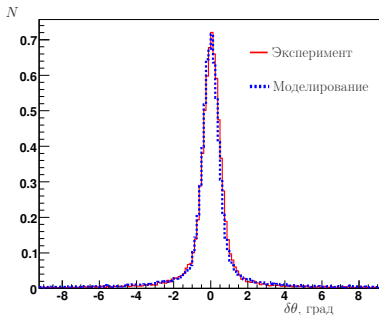
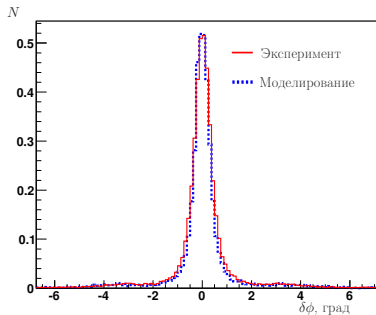
$$\mathcal{B}_{\gamma\gamma}(\pi^0) = 0.98823 \pm 0.00034$$

$$\mathcal{B}_{\pi^+\pi^-}(\rho^0) = 0.9891 \pm 0.0016$$

	$\rho^0\pi^0$	$\rho^+\pi^-$	$\rho^-\pi^+$
Число событий	6343.	5829.	5879.
$P(\chi^2)$ (127.481/(135-8))		0.471	
ϕ		-1.775 ± 0.090	
$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho\pi}^{\text{fit}}, \%$	1.942 ± 0.030	1.864 ± 0.026	1.866 ± 0.026
$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho\pi}^{\text{fit}}, \%$		1.888 ± 0.016	
$\mathcal{B}_{\pm}/\mathcal{B}_0$		0.960 ± 0.018	
$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho(1450)\pi}^{\text{fit}}$	$(4.89 \pm 0.75) \times 10^{-4}$	$(2.11 \pm 0.43) \times 10^{-4}$	$(3.15 \pm 0.56) \times 10^{-4}$
$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho(1450)\pi}$		$(3.52 \pm 0.18) \times 10^{-4}$	
$\mathcal{B}_{\pm}/\mathcal{B}_0(\rho(1450))$		0.51 ± 0.10	

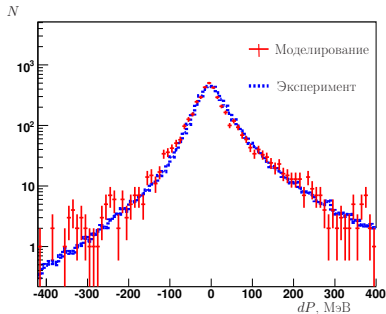
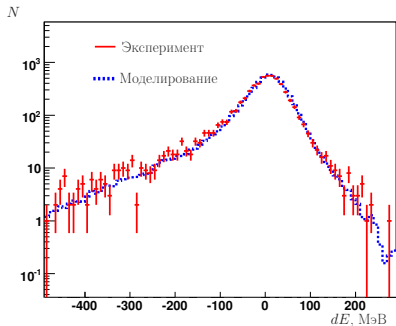
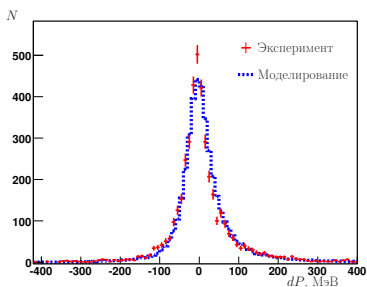
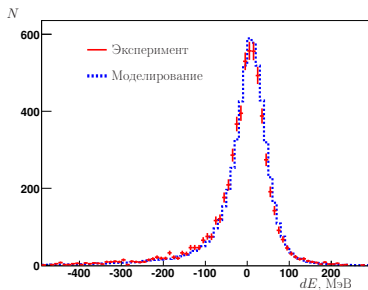
$$\text{Здесь и далее величина } \mathcal{B}_{\pm}/\mathcal{B}_0 = \frac{1}{2} \frac{\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho^+\pi^-} + \mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho^-\pi^+}}{\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho^0\pi^0}}$$

Настройка детектора



Первичная настройка импульсного разрешения по событиям $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$.

Настройка детектора



Анализ фоновых процессов

Рассматриваемый вклад	Вклад в наблюдаемое сечение, %		
	Моды процесса $J/\psi \rightarrow \rho\pi$		
	$\rho^0\pi^0$	$\rho^+\pi^-$	$\rho^-\pi^+$
Учитывались при подгонке напрямую			
Вклады $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma), \mu^+\mu^-(\gamma)$			
	0.2 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.8 ± 0.1
Вклады $K\bar{K}$			
$K^0\bar{K}^{*0}(892) + c.c.$	0.3 ± 0.1		
$K^{*+}(892)K^-$		0.5 ± 0.1	
$K^{*-}(892)K^+$			0.5 ± 0.1
Вклады различных процессов			
$\sum \rho\eta, \rho\eta', \phi\eta, \omega\pi^0, \omega\eta, \gamma\gamma$	$\lesssim 0.1$	$\lesssim 0.1$	$\lesssim 0.1$
Поправка и неопределённость	-0.5 ± 0.2	-1.5 ± 0.2	-1.3 ± 0.2

	$\rho^0\pi^0$	$\rho^+\pi^-$	$\rho^-\pi^+$
Число событий	6343.	5829.	5879.
$K\bar{K}$	20.0	30.9	29.6
$e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma), \mu^+\mu^-(\gamma)$	10.6	54.6	47.3

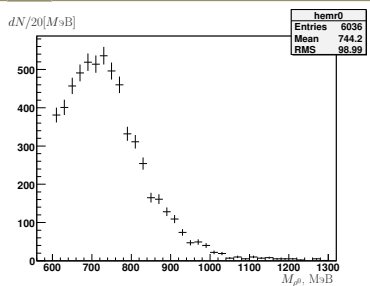
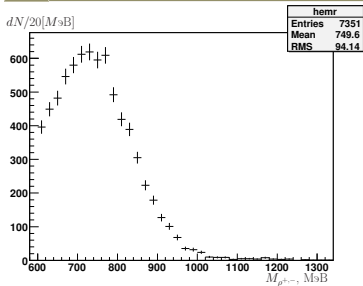
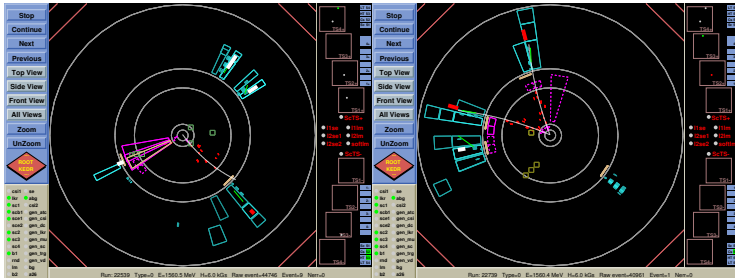
Систематические неопределённости, связанные с формой подгонки

	$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho(770)\pi}$		$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho(1450)\pi}$	
	%	$\mathcal{B}_{\pm}/\mathcal{B}_0$	%	$\mathcal{B}_{\pm}/\mathcal{B}_0$
Неопределённость параметров $\rho(1450)$	0.4	0.7	6.9	2.3
Интерференция с $\rho(1700)\pi$	+0.4	-0.1	-36.8	-25.8
Интерференция с $\omega\pi$	-0.5	-0.5	-3.7	+0.3
Вклад $\gamma f_2(1270)$	+0.2	-0.6	+15.6	-17.3
Квадратичная сумма	+0.6 -0.7	+0.7 -1.1	+7.1 -37.6	+2.3 -31.1

Вариация критериев отбора

	Вариация	$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho(770)\pi}$		$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho(1450)\pi}$	
		%	$\mathcal{B}_{\pm}/\mathcal{B}_0$	%	$\mathcal{B}_{\pm}/\mathcal{B}_0$
Область подгонки по M_{ρ}	1.3 ÷ 1.8 ГэВ	0.6	0.9	-15.3	+21.8 -36.6
Вариация χ^2	70 ÷ 110	0.4	0.5	2.4	4.7
Условий на косинусы углов разлёта	-0.425 ÷ -0.515	0.5	0.2	6.7	13.7
Условия на сумму косинусов	-1.15 ÷ -1.05	0.5	0.8	0.7	4.1
Условия на E/p	0.7 ÷ 0.8	0.3	0.4	1.2	3.6
Условия на энергию кластеров	50 ÷ 80 МэВ 150 ÷ 180 МэВ	0.2	0.2	0.4	0.9
Квадратичная сумма		1.1	1.4	+7.3 -16.9	+26.8 -39.7

Поправки к $\mathcal{B}_{\rho\pi}(J/\psi)$



Поправки к $\mathcal{B}_{\rho\pi}(J/\psi)$

	Поправка, %	Систематическая ошибка, %
Потеря трека ($0.59 \pm 0.12 \pm 0.22\%$)	+1.18	0.5
Потеря π^0 ($0.99 \pm 0.13 \pm 0.14\%$)	+0.99	0.2
Ядерное взаимодействие	-	1.3
Сумма	+2.17	1.4

Результаты

	%	$\mathcal{B}_{\pm}/\mathcal{B}_0$	%	$\mathcal{B}_{\pm}/\mathcal{B}_0$
Неопределённость числа J/ψ	1.1	-	1.1	-
Поправки, связанные с реконструкцией	1.4	-	1.4	-
Форма подгонки	+0.6 -0.7	+0.7 -1.1	+7.1 -37.6	+2.3 -31.1
Фон от физических процессов	0.2	0.2	0.2	0.2
Вариация критериев отбора	1.1	1.4	+7.3 -16.9	+26.8 -39.7
Неопределённость $\mathcal{B}_{\gamma\gamma}(\pi^0), \mathcal{B}_{\pi^+\pi^-}(\rho^0)$	0.1	0.2	0.1	0.2
Квадратичная сумма	2.2	+1.6 -1.8	+10.3 -41.3	+26.9 -50.4

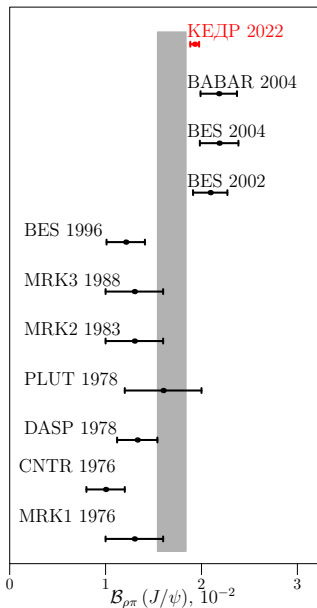
$$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho\pi} = (1.929 \pm 0.016 \pm 0.042) \times 10^{-2}$$

$$\mathcal{B}_{\pm}/\mathcal{B}_0(J/\psi \rightarrow \rho\pi) = 0.96 \pm 0.018_{-0.017}^{+0.015}$$

$$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho(1450)\pi} = (3.60 \pm 0.18_{-1.49}^{+0.37}) \times 10^{-4}$$

$$\mathcal{B}_{\pm}/\mathcal{B}_0(J/\psi \rightarrow \rho(1450)\pi) = 0.51 \pm 0.10_{-0.26}^{+0.14}$$

Сравнение с предыдущими экспериментами



В эксперименте КЕДР измерены величины вероятности процессов
 $J/\psi \rightarrow \rho\pi$, $J/\psi \rightarrow \rho(1450)\pi$.

$$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho\pi} = (1.929 \pm 0.016 \pm 0.042) \times 10^{-2}$$

$$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho(1450)\pi} = (3.60 \pm 0.18^{+0.37}_{-1.49}) \times 10^{-4}$$

Имеется некоторое указание на нарушение изотопической инвариантности

$$\mathcal{B}_{\pm}/\mathcal{B}_0(J/\psi \rightarrow \rho\pi) = 0.96 \pm 0.018^{+0.015}_{-0.017}$$

$$\mathcal{B}_{\pm}/\mathcal{B}_0(J/\psi \rightarrow \rho(1450)\pi) = 0.51 \pm 0.10^{+0.14}_{-0.26}$$

Предложенный способ анализа может использоваться при изучении распадов

$$\Upsilon(1S), \Upsilon(2S) \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0, \phi K^+K^-, \omega\pi^+\pi^-, K^{*0}(892)K^-\pi^+ \dots,$$

а также для определения эффектов нарушения изотопической симметрии.

Эффективность регистрации событий

	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
$J/\psi \rightarrow \rho^0 \pi^0$	0.074047	0.081884	0.074247	0.075034	0.076952	0.073675
$J/\psi \rightarrow \rho^- \pi^0$	0.065449	0.062087	0.061658	0.061571	0.063163	0.063133
$J/\psi \rightarrow \rho^+ \pi^0$	0.065235	0.06149	0.060795	0.060901	0.062763	0.062573

Вес, учитывающийся в компонентах сечения.

w_ρ	$w_{\rho(1450)}$	w_1	w_2	w_3	w_4
0.232384685	1.39987124	7.52130707	7.298986	2.13004887	1.64039557

Иллюстрация систематической неопределённости, связанной с лишним треком

