

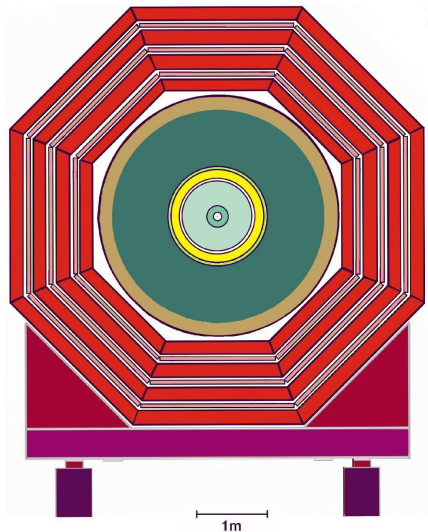
Исследование процесса распада  $J/\psi \rightarrow \rho\eta$  и  $J/\psi \rightarrow \phi\eta$  на эксперименте с детектором КЕДР

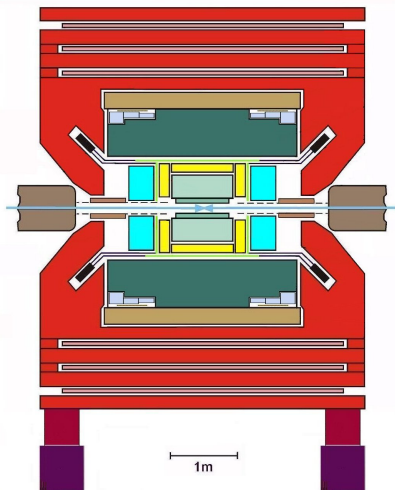
Кыштымов Дмитрий  
и коллаборация КЕДР

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН  
17 — 21 февраля 2025

ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск  
D.A.Kyshtymov@inp,nsk.su

- 1 Детектор КЕДР
- 2 Процесс  $J/\psi \rightarrow \rho\eta$ 
  - Идея анализа
  - Условия отбора
  - Результаты
  - Оценка неопределённостей
- 3 Процесс  $J/\psi \rightarrow \phi\eta$ 
  - Условия отбора
  - Результаты
  - Оценка неопределённостей
- 4 Заключение





Детектор состоит из:

- Вершинный детектор
- Дрейфовая камера
- Аэрогелевые счетчики
- Сцинтилляционные счетчики
- LKr калориметр
- CsI калориметр
- Мюонная система

Процесс  $J/\psi \rightarrow \rho\eta$

# Процесс $J/\psi \rightarrow \rho\eta$

- Процесс  $J/\psi \rightarrow \rho\eta$  является доминирующей модой распада в  $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ , измерение бранчинга распада в  $\rho\eta$  осуществлялось в 1988 и 1990 годах на детекторах MARK-III и DM2
- $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$  измерялся BaBar при помощи ISR и BES-III

$$\text{BES-III: } (3.78 \pm 0.68) \times 10^{-4}$$

$$\text{BaBar: } (4.2 \pm 0.8) \times 10^{-4}$$

$$\text{PDG: } (3.8 \pm 0.7) \times 10^{-4}$$

$$J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$$

$$\text{MARK-III: } (1.93 \pm 0.13 \pm 0.29) \times 10^{-4}$$

$$\text{DM2: } (1.94 \pm 0.17 \pm 0.29) \times 10^{-4}$$

$$\text{PDG: } (1.93 \pm 0.23) \times 10^{-4}$$

$$J/\psi \rightarrow \rho\eta$$

$$Br(\rho \rightarrow \pi^+\pi^-) \simeq 100\%$$

$$Br(\eta \rightarrow \gamma\gamma) = (39.36 \pm 0.18)\%$$

Ожидается значительная интер. с процессом  $J/\psi \rightarrow \omega\eta$ , несмотря на малую вероятность распада

$$Br(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-) = (1.53^{+0.11}_{-0.13})\%$$

Был обнаружен резонанс

$$J/\psi \rightarrow \rho(1450)\eta$$

В силу большого

$$Br(J/\psi \rightarrow \omega\eta) = (1.74 \pm 0.20) \times 10^{-3} / 21$$

$$\frac{d\sigma}{d\Gamma} = |a + be^{i\phi}|^2 = |a|^2 + |b|^2 + ab^*e^{-i\phi} + a^*be^{i\phi}$$

$$a = (p_{\pi^+} \times p_{\pi^-}) \sin\theta_n \frac{m_\rho^2}{q^2 - m_\rho^2 + iq\Gamma_\rho(q^2)} - \text{Амплитуда распада}$$

$$\Gamma(q^2) = \Gamma\left(\frac{p_{\pi(q^2)}}{p_{\pi(m_\rho^2)}}\right)^3 \left(\frac{m_\rho^2}{q^2}\right) - \text{Ширина}$$

$$\begin{aligned} ab^*e^{-i\phi} + a^*be^{i\phi} = & \frac{2(p_{\pi^+} \times p_{\pi^-})^2 \sin^2\theta_n m_\rho^2 m_\omega^2 (q^4 + m_\rho^2 m_\omega^2 + q^2 \Gamma_\rho \Gamma_\omega)}{((q^2 - m_\rho^2)^2 + q^2 \Gamma_\rho^2) ((q^2 - m_\omega^2)^2 + q^2 \Gamma_\omega^2)} \cos\phi \\ & - \frac{2(p_{\pi^+} \times p_{\pi^-})^2 \sin^2\theta_n m_\rho^2 m_\omega^2 q^2 (m_\rho^2 + m_\omega^2)}{((q^2 - m_\rho^2)^2 + q^2 \Gamma_\rho^2) ((q^2 - m_\omega^2)^2 + q^2 \Gamma_\omega^2)} \cos\phi \\ & + \frac{2(p_{\pi^+} \times p_{\pi^-})^2 \sin^2\theta_n m_\rho^2 m_\omega^2 (q^3 \Gamma_\omega + q \Gamma_\rho m_\omega^2)}{((q^2 - m_\rho^2)^2 + q^2 \Gamma_\rho^2) ((q^2 - m_\omega^2)^2 + q^2 \Gamma_\omega^2)} \sin\phi \\ & - \frac{2(p_{\pi^+} \times p_{\pi^-})^2 \sin^2\theta_n m_\rho^2 m_\omega^2 (q^3 \Gamma_\rho + q \Gamma_\omega m_\rho^2)}{((q^2 - m_\rho^2)^2 + q^2 \Gamma_\rho^2) ((q^2 - m_\omega^2)^2 + q^2 \Gamma_\omega^2)} \sin\phi \end{aligned}$$

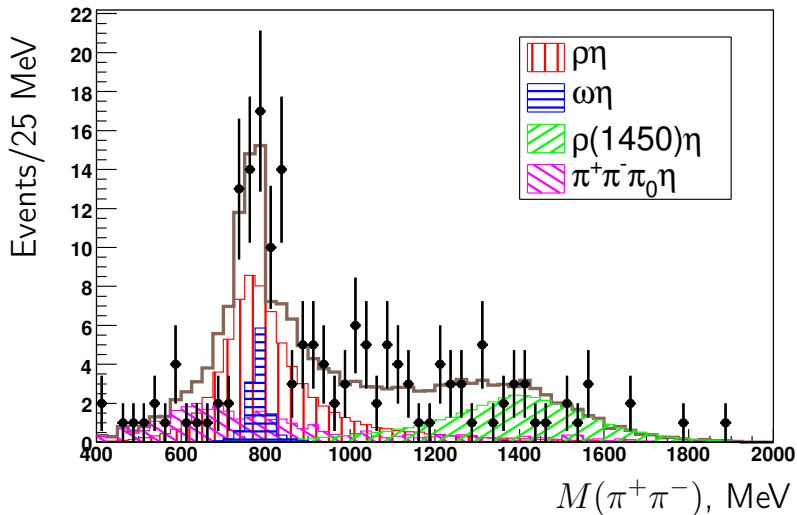
$$\begin{aligned} N_{sim} = & N_\rho \varepsilon_\rho H_\rho + N_\omega \varepsilon_\omega H_\omega + \\ & + \sqrt{N_\rho N_\omega} (\varepsilon_{\cos^+} H_{\cos^+} - \varepsilon_{\cos^-} H_{\cos^-}) \cos(\phi) \\ & + \sqrt{N_\rho N_\omega} (\varepsilon_{\sin^+} H_{\sin^+} - \varepsilon_{\sin^-} H_{\sin^-}) \sin(\phi) + \dots \end{aligned} \quad \varepsilon \approx 17\%$$

Подгонка осуществлялась при помощи максимизации функции

$L$ :

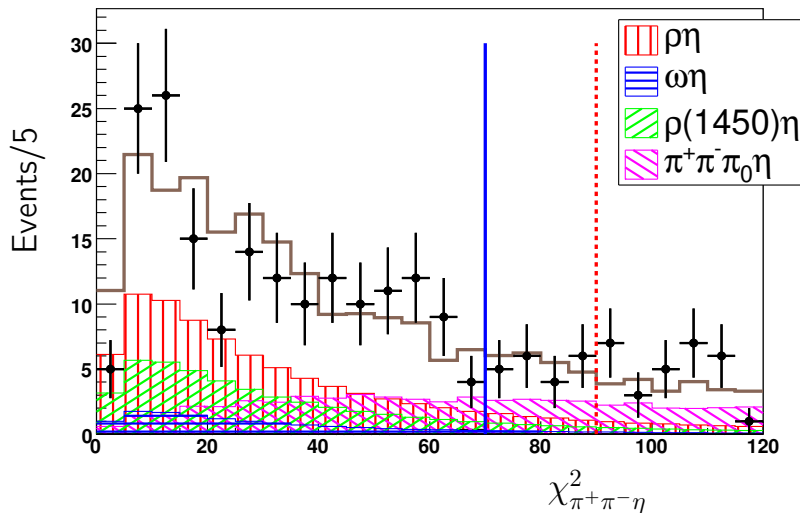
$$L = -2 \sum (N_{th} - N_{exp} + N_{exp} \ln(N_{exp}/N_{th}))$$

- 1  $\chi^2 < 70$
- 2  $\chi^2 < \chi^2_{K+K-\eta}$ , для разделения  $\pi/K$  событий
- 3  $0.4 < \text{Cos}(\theta_{\gamma\gamma})$ , подавляет фон от  $\rho\pi$
- 4  $500 < M_{\gamma\gamma} < 600$ ,  $M_{\gamma\gamma}$  — инвариантная масса двух свободных фотонов
- 5  $N_{cl} < 3$ , подавляет фон от  $\pi^+\pi^-\pi_0\eta$

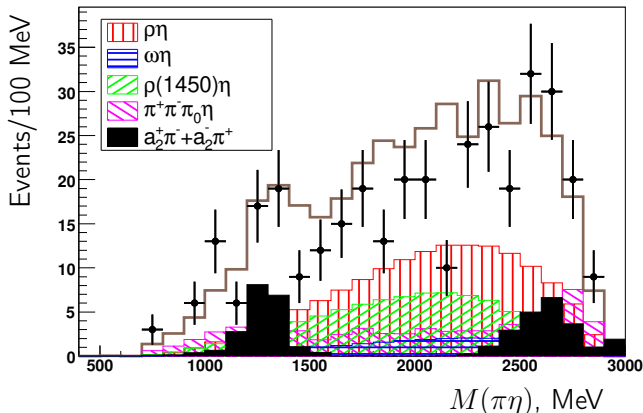


Подгонка инвариантной массы двух пионов с учетом интерференции  
 ( $L/Ndf = 53/42$ ), 25 МэВ в бине





Подгонка  $\chi^2$  кинематической реконструкции с учетом интерференции  
( $L/Ndf = 29/23$ )



Подгонка  $M(\eta\pi)$ , чёрной гистограммой показан вклад от  $a_2\pi$ . Все параметры за исключением  $a_2\pi$  и  $\Delta M$  фиксированы ( $L/Ndf = 43/19$ )  
 Для данного процесса  $J/\psi \rightarrow (a_2^+\pi^- + a_2^-\pi^+) \rightarrow \pi^+\pi^-\eta < 1.41 \times 10^{-3}$   
 с вероятностью 90%

Результат при фиксированном  $Br(J/\psi \rightarrow \omega\eta)$ :

- 1  $Br(J/\psi \rightarrow \rho\eta) = (2.28 \pm 0.69 \pm 0.28) \times 10^{-4}$  ( $N_\rho = 74$ )
- 2  $Br(J/\psi \rightarrow \omega\eta) = 2.352 \times 10^{-3}$  ( $N_\omega = 12$  fixed)
- 3  $Br(J/\psi \rightarrow \rho(1450)\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\eta) =$   
 $1.65 \pm 0.77 \pm 0.70 \times 10^{-4}$  ( $N_{\rho(1450)} = 34$ )
- 4  $Br(J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta) = 4.58 \pm 1.49 \pm 0.97 \times 10^{-4}$   
( $N_{total} = 137$ )
- 5  $\phi_{\rho-\omega} = (85.1 \pm 7.5 \pm 6.8)^\circ$
- 6  $\phi_{\rho-\rho(1450)} = (182.2 \pm 43.4 \pm 33.8)^\circ$
- 7  $\Delta M = (3.65 \pm 5.78 \pm 3.60)$  МэВ

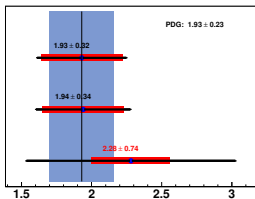
# Оценка неопределённостей в $Br(J/\psi \rightarrow \rho\eta)$ , условия отбора

Критерий	Отбор	Вариация	$\Delta N/N$ , %	Неопр., %
$\chi^2$	$\chi^2 < 70$	$\chi^2 < 90$	6.7	4.4
$\chi^2_{K^+K^-\eta}$	$\chi^2 < \chi^2_{K^+K^-\eta}$	$\chi^2 < 0.9\chi^2_{K^+K^-\eta}$	0.4	< 0.1
$\text{Cos}(\theta_{\gamma\gamma})$	$0.4 < \text{Cos}(\theta_{\gamma\gamma})$	$0.2 < \text{Cos}(\theta_{\gamma\gamma})$	9.5	6.4
$M_{\gamma\gamma}$	$500 < M_{\gamma\gamma} < 600$	$450 < M_{\gamma\gamma} < 650$	2.3	2.0
$N_{cl}$	$N_{cl} < 3$	$N_{cl} < 4$	19.5	2.0
Сумма	—	—	—	8.3

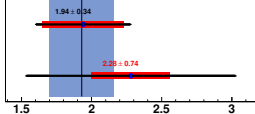
Вариация условий отбора для процесса  $\rho\eta$ . Неопр. — неопределённость, вносимая в процесс  $\rho\eta$

# Оценка неопределённостей в $Br(J/\psi \rightarrow \rho\eta)$

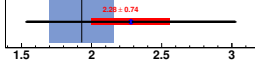
MARK-III, 1988



DM2, 1990

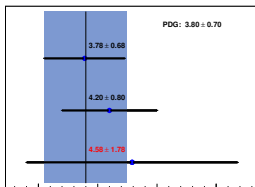


KEDR, 2025

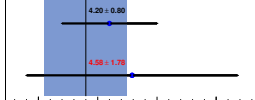


$Br(J/\psi \rightarrow \rho\eta) \times 10^4$

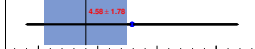
BES-III, 2019



BaBar, 2018



KEDR, 2025



$Br(J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi_0\eta) \times 10^4$

Источник	Неопр., %
Отклик детектора	0.7
Ядерное взаимодей.	1.4
Моделирование	0.4
$\chi(t)$ калибровка	3.0
$\pi/K$ разделение	4.3
$Br(J/\psi \rightarrow \omega\eta)$	2.0
Число $J/\psi$	1.1
$Br(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$	0.5
Стат. от эффект.	2.1
Стаб. подгонки	0.1
Физический фон	5.8
Форма фона $\pi^+\pi^-\pi_0\eta$	3.1
Условия отбора	8.3
Итог. ошибка	12.3

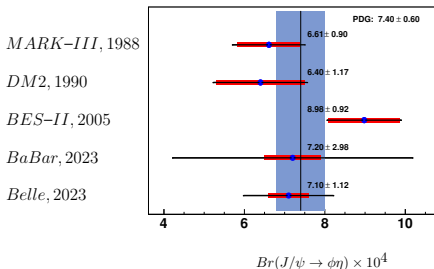
Процесс  $J/\psi \rightarrow \phi\eta$

# Процесс $J/\psi \rightarrow \phi\eta$

- $J/\psi \rightarrow \phi\eta$  измерялся Belle и BaBar при помощи ISR в 2023, BES-II в 2005, DM2 в 1990 и MARK-III в 1988

- Belle:  $(7.1 \pm 1.0 \pm 0.5) \times 10^{-4}$   
( $N_{\phi\eta} \approx 99$ , 2023)
- BaBar:  $(7.2 \pm 2.9 \pm 0.9) \times 10^{-4}$   
( $N_{\phi\eta} \approx 149$ , 2023)
- BES-II:  $(8.99 \pm 0.18 \pm 0.89) \times 10^{-4}$   
( $N_{\phi\eta} \approx 500 - 1000$ , 2005)
- DM2:  $(6.4 \pm 0.4 \pm 1.1) \times 10^{-4}$   
( $N_{\phi\eta} \approx 346$ , 1990)
- MARK-III:  
 $(6.61 \pm 0.45 \pm 0.78) \times 10^{-4}$   
( $N_{\phi\eta} \approx 200 - 300$ , 1988)

PDG:  
 $(7.4 \pm 0.6) \times 10^{-4}$   
 $J/\psi \rightarrow \phi\eta$



$$Br(\phi \rightarrow K^+K^-) = (49.1 \pm 0.5)\%$$

$$Br(\eta \rightarrow \gamma\gamma) = (39.36 \pm 0.18)\%$$

Моделирование процесса:  $\frac{d\sigma}{d\Gamma} = |A|^2 + |B|^2$

$$A = (p_{K^+} \times p_{K^-}) \sin\theta_n \frac{m_\phi^2}{q^2 - m_\phi^2 + iq\Gamma_\phi(q^2)}$$

$$\Gamma(q^2) = \Gamma \left( \frac{p_\pi(q^2)}{p_\pi(m_\phi^2)} \right)^3 \left( \frac{m_\phi^2}{q^2} \right)$$

$$N_{sim} = N_{\phi\eta} \varepsilon_{\phi\eta} H_{\phi\eta} + N_{K^+K^-\eta} \varepsilon_{K^+K^-\eta} H_{K^+K^-\eta}$$

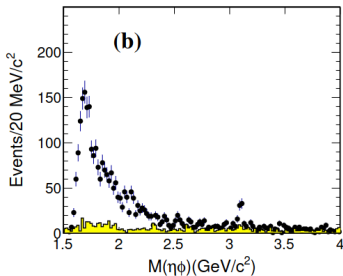
$$\varepsilon_{\phi\eta} \approx 9\%$$

1  $\chi^2 < 70$

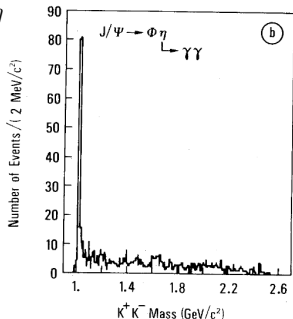
2  $\chi^2 < \chi^2_{\pi^+\pi^-\eta}$

3  $500 < M_{\gamma\gamma} < 600$

4  $N_{cl} < 3$

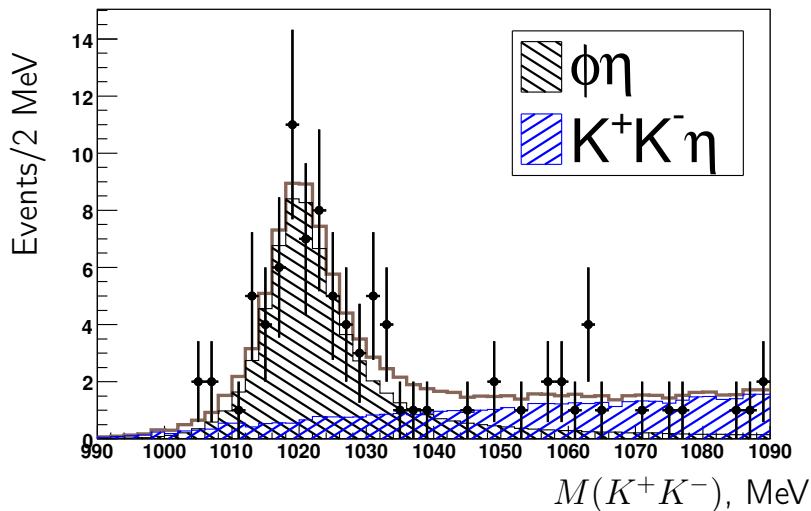


Масса  $\phi\eta$  в измерении Belle в  
моде  $\eta \rightarrow \gamma\gamma$

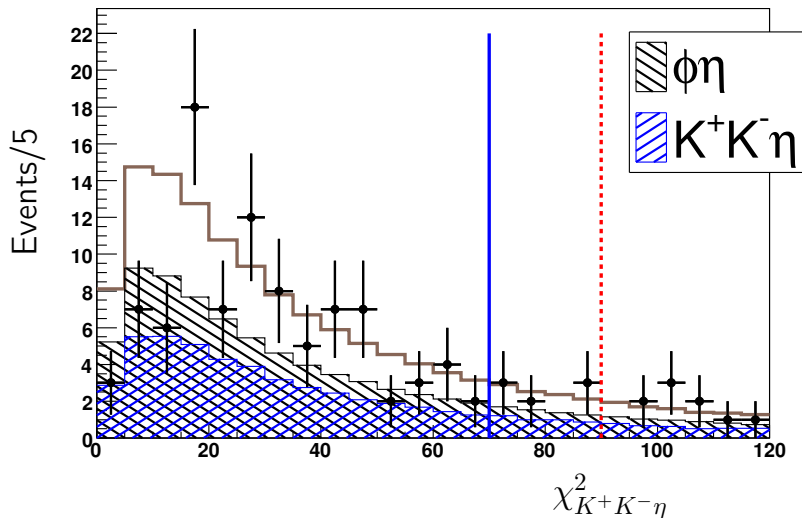


Масса  $\phi$  в измерении DM2





Подгонка инвариантной массы двух каонов с учетом интерференции  
 $(L/Ndf = 15/28)$ , 2 МэВа в бине



Подгонка  $\chi^2$  ( $L/Ndf = 25/21$ )

# Оценка неопределённостей в $Br(J/\psi \rightarrow \phi\eta)$ , условия отбора

Критерий	Отбор	Вариация	$\Delta N/N$ , %	Неопр., %
$\chi^2$	$\chi^2 < 70$	$\chi^2 < 90$	8.5	1.2
$\chi^2_{\pi^+\pi^-\eta}$	$\chi^2 < \chi^2_{\pi^+\pi^-\eta}$	$\chi^2 < 0.9\chi^2_{\pi^+\pi^-\eta}$	0.4	0.3
$M_{\gamma\gamma}$	$500 < M_{\gamma\gamma} < 600$	$450 < M_{\gamma\gamma} < 650$	3.5	2.4
$N_{cl}$	$N_{cl} < 3$	$N_{cl} < 6$	34.4	2.4
Сумма	—	—	—	3.6

Вариация условий отбора для процесса  $\phi\eta$ . Неопр. — неопределённость, вносимая в процесс  $\phi\eta$

# Оценка неопределённостей в $Br(J/\psi \rightarrow \phi\eta)$

MARK-III, 1988

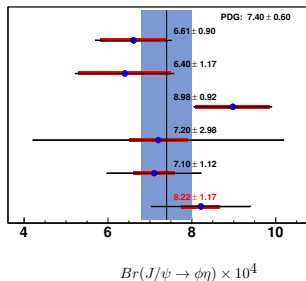
DM2, 1990

BES-II, 2005

BaBar, 2023

Belle, 2023

KEDR, 2025



- $Br(J/\psi \rightarrow \phi\eta) =$   
 $(8.22 \pm 1.08 \pm 0.56) \times 10^{-4}$   
 $(N_\phi = 62)$

Источник	Неопр., %
Отклик детектора	0.7
Ядерное взаим.	3.0
Моделирование	0.6
$\chi(t)$ калибровка	3.0
$\pi/K$ разделение	0.2
$Br(\phi \rightarrow K^+K^-)$	1.0
Число $J/\psi$	1.1
$Br(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$	0.5
Стат. от эффект.	0.6
Физический фон	3.3
Условия отбора	3.6
Итог. ошибка	6.8

- Точность измерений бранчингов для  $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ ,  $J/\psi \rightarrow \rho \eta$  и  $J/\psi \rightarrow \phi \eta$  сопоставимы с предыдущими измерениями
- Впервые был измерен бранчинг распада  $J/\psi \rightarrow \rho(1450) \eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$
- Был посчитан 90% CL для бранчинга распада  $J/\psi \rightarrow (a_2^+ \pi^- + a_2^- \pi^+) \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta < 1.41 \times 10^{-3}$

Результаты измерений:

- $Br(J/\psi \rightarrow \rho \eta) = (2.28 \pm 0.69 \pm 0.28) \times 10^{-4}$  ( $N_\rho = 74$ )
- $Br(J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta) = 4.58 \pm 1.49 \pm 0.97 \times 10^{-4}$   
( $N_{total} = 136$ )
- $Br(J/\psi \rightarrow \rho(1450) \eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta) = 1.65 \pm 0.77 \pm 0.70 \times 10^{-4}$  ( $N_{\rho(1450)} = 34$ )
- $Br(J/\psi \rightarrow \phi \eta) = 8.22 \pm 1.08 \pm 0.56 \times 10^{-4}$  ( $N_\phi = 62$ )

Благодарю за внимание!

# Дополнительные материалы

# Параметры детектора КЕДР

## Дрейфовая камера:

- Внутренний радиус: 125 мм
- Наружный радиус: 535 мм
- Длина: 1100 мм
- Количество аксиальных суперслоев: 4
- Количество стерео суперслоев: 3
- Число измерений: 42
- Число ячеек: 252
- Пространственное разрешение: 150 мкм
- $dE/dx$ : 8.2%

## CsI калориметр:

- Полярный угол: (6 - 38) градусов мм
- Толщина калориметра: 30 см ( $15 X_0$ )
- Энергетическое разрешение для 0.1 ГэВ: 3%
- Энергетическое разрешение для 1 ГэВ: 2.5%
- Угловое разрешение для 0.1 ГэВ: 18 мрад
- Угловое разрешение для 1 ГэВ: 9 мрад

## LKr калориметр:

- Полярный угол: (38 - 142) градусов мм
- Внутренний радиус: 75 см
- Толщина калориметра: 68 см ( $14.8 X_0$ )
- Энергетическое разрешение для 0.1 ГэВ: 6%
- Энергетическое разрешение для 1 ГэВ: 2.5%
- Угловое разрешение для 0.1 ГэВ: 4 мрад
- Угловое разрешение для 1 ГэВ: 4 мрад

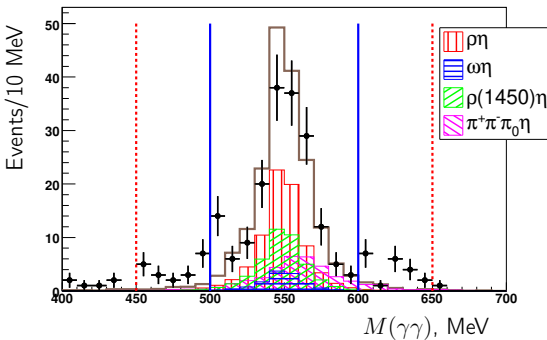
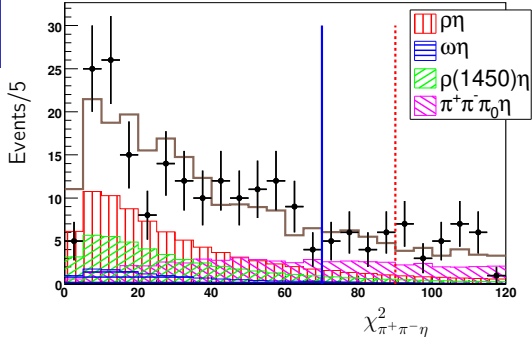
$$\begin{aligned}
Br(\pi^+\pi^-\eta) &= (3.8 \pm 0.8) \times 10^{-4} \\
Br(\rho\eta) &= (1.93 \pm 0.23) \times 10^{-4} \\
Br(\omega\eta) &= (1.74 \pm 0.2) \times 10^{-3} \\
Br(\rho\pi) &= (1.69 \pm 0.15) \times 10^{-2} \\
Br(\phi\eta) &= (7.4 \pm 0.8) \times 10^{-4} \\
Br(\rho(1450)\pi \rightarrow 3\pi) &= (2.3 \pm 0.7) \times 10^{-3} \\
Br(\pi^+\pi^-\pi_0\eta) &= (1.17 \pm 0.2) \times 10^{-2} \\
Br(\omega\pi_0) &= (4.5 \pm 0.5) \times 10^{-3} \\
Br(\omega\pi_0\pi_0) &= (3.4 \pm 0.8) \times 10^{-3} \\
Br(\omega\eta\pi_0) &= (3.4 \pm 1.7) \times 10^{-4} \\
Br(\rho(1450)\eta' \rightarrow 2\pi\eta') &= (3.3 \pm 0.7) \times 10^{-6}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Br(\rho \rightarrow \pi^+\pi^-) &\approx 100\% \\
Br(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-) &= \\
&(1.53 \pm 0.13) \times 10^{-2} \\
Br(\eta \rightarrow \gamma\gamma) &= \\
&(39.36 \pm 0.18) \times 10^{-2} \\
Br(\pi_0 \rightarrow \gamma\gamma) &= \\
&(98.823 \pm 0.034) \times 10^{-2} \\
Br(\phi \rightarrow K^+K^-) &= \\
&(49.1 \pm 0.5) \times 10^{-2} \\
Br(\eta' \rightarrow \gamma\gamma) &= \\
&(2.307 \pm 0.033) \times 10^{-2}
\end{aligned}$$



# Результаты $\rho\eta$

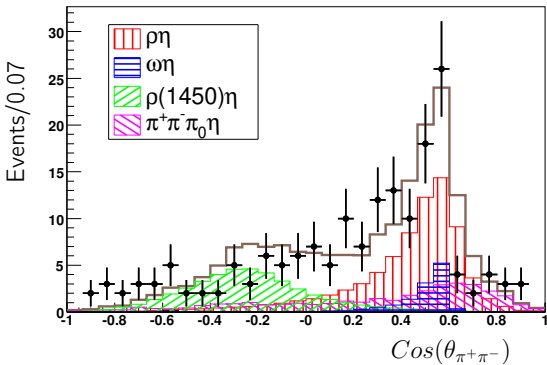
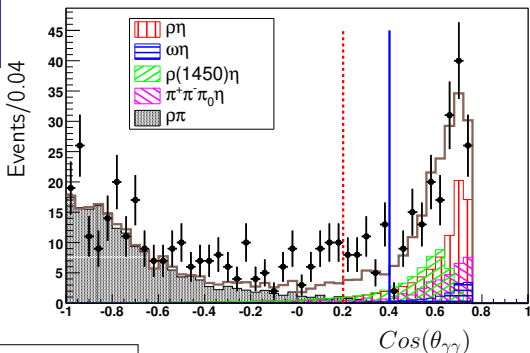
$\chi^2$  кинематической реконструкции



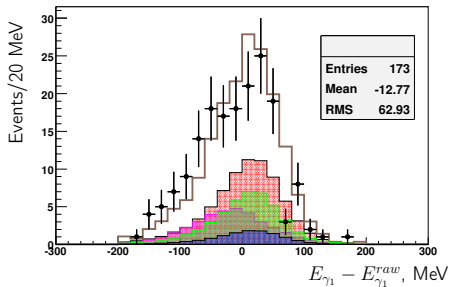
⇐ Инвариантная масса двух свободных фотонов

# Результаты $\rho\eta$

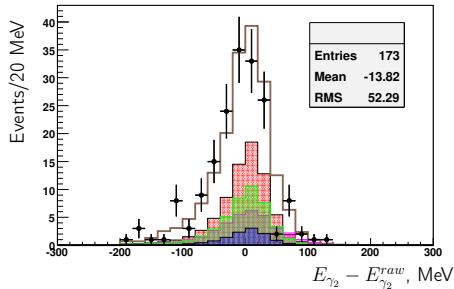
Угол между двумя фотонами  $\Rightarrow$



$\Leftarrow$  Угол между двумя пионами



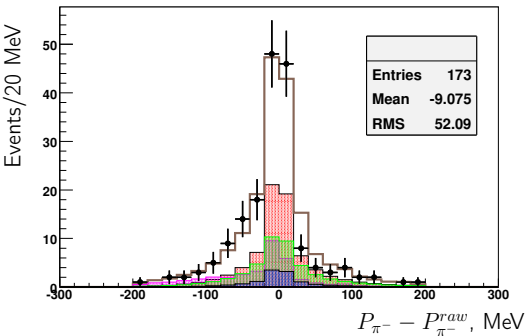
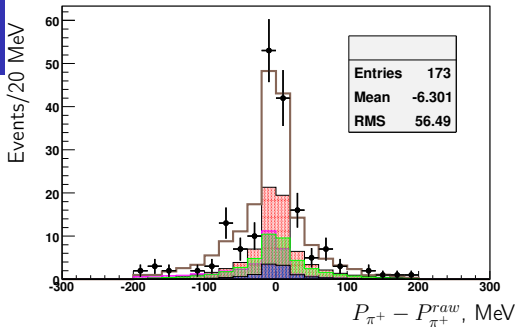
Точность реконструкции энергии  
первого фотона



Точность реконструкции энергии  
второго фотона

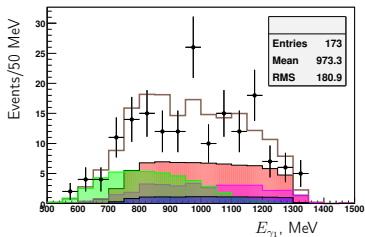
# Результаты $\rho\eta$

Точность рек. попереч. импульса  $\pi^+$

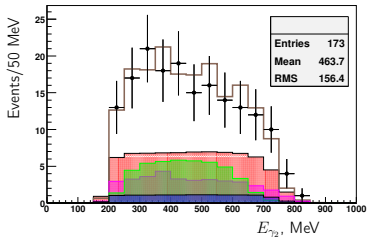


⇐ Точность рек. попереч. импульса  $\pi^-$

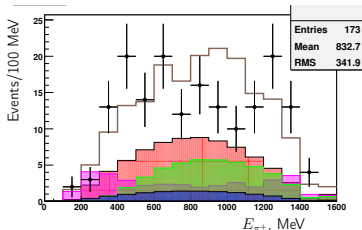
# Результаты $\rho\eta$



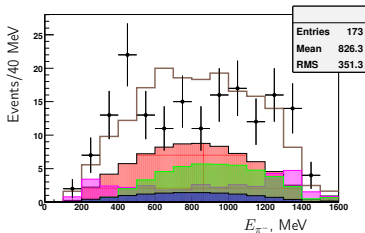
Энергия первого фотона



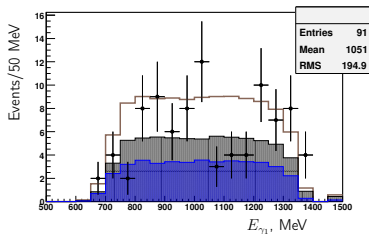
Энергия второго фотона



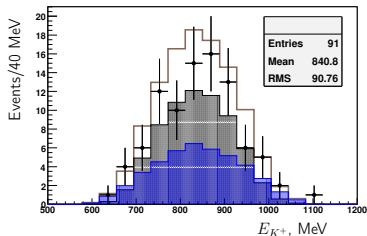
Энергия  $\pi^+$



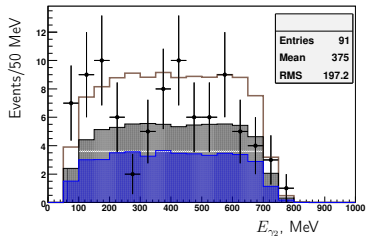
Энергия  $\pi^-$



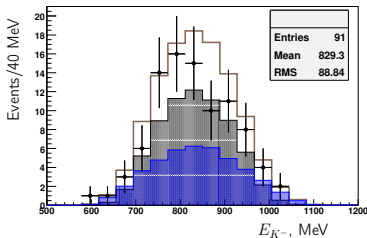
Энергия первого фотона



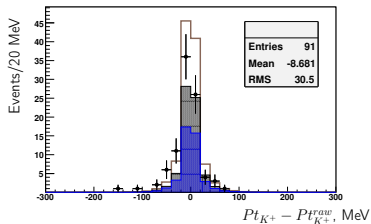
Энергия  $K^+$



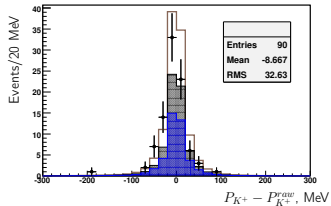
Энергия второго фотона



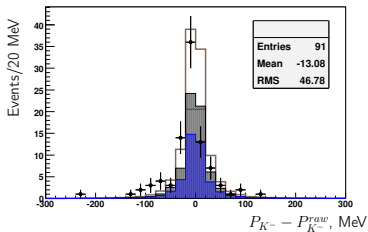
Энергия  $K^-$



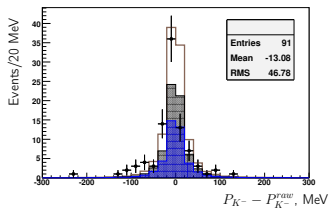
Точность рек. попереч. импульса  $K^+$



Точность рек. импульса  $K^+$



Точность рек. попереч. импульса  $K^-$



Точность рек. импульса  $K^-$