

Изучение процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ и $\gamma^*\gamma^* \rightarrow \eta'(958)$ в эксперименте BABAR

(апробация диссертации на соискание ученой степени к.ф.-м.н.)



Козырев Евгений Анатольевич (м.н.с., лаб. 2)

Науч. рук.: д.ф.-м.н. Солодов Евгений Петрович



СОДЕРЖАНИЕ

- Эксперимент BaBar
- Введение
- Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \eta'(980)e^+e^-$
- Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta(\gamma)$
- Положения, выносимые на защиту

MC — Monte Carlo method

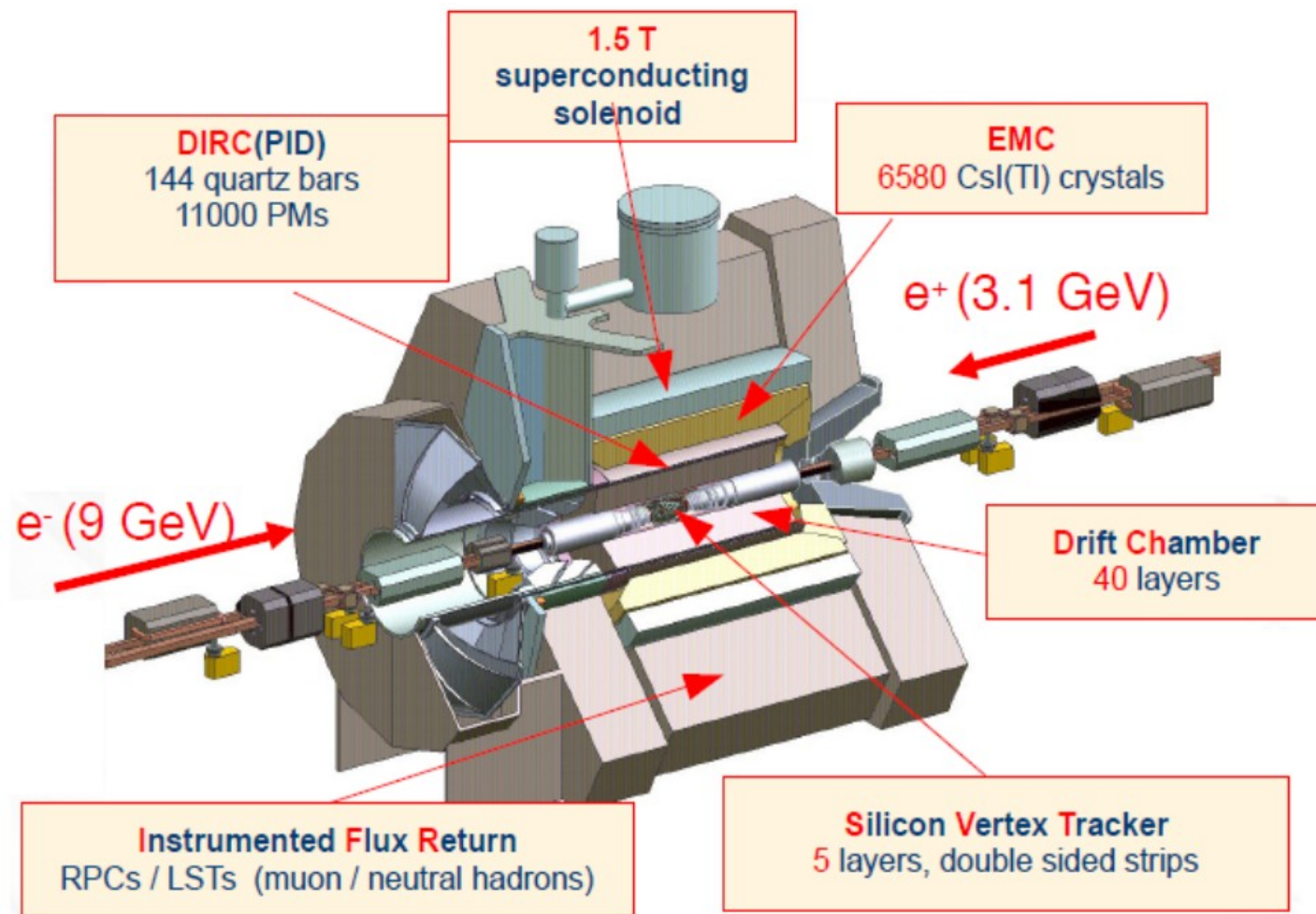
ПФФ — переходный форм-фактор

таггированные электроны — зарегистрированные электроны и позитроны

$E_{\text{с.м.}} \equiv m_{\pi\pi\eta} \equiv \sqrt{s}$ [ГэВ]

МВД — модель векторной доминантности

ДЕТЕКТОР ВАВАР НА КОЛЛАЙДЕРЕ РЕР-II С ЭНЕРГИЕЙ ~10.6 ГЭВ В С.Ц.М.



Resonance	$L(\text{fb}^{-1})$
$\Upsilon(4S)$	424
$\Upsilon(3S)$	28
$\Upsilon(2S)$	14
Off-resonance	48

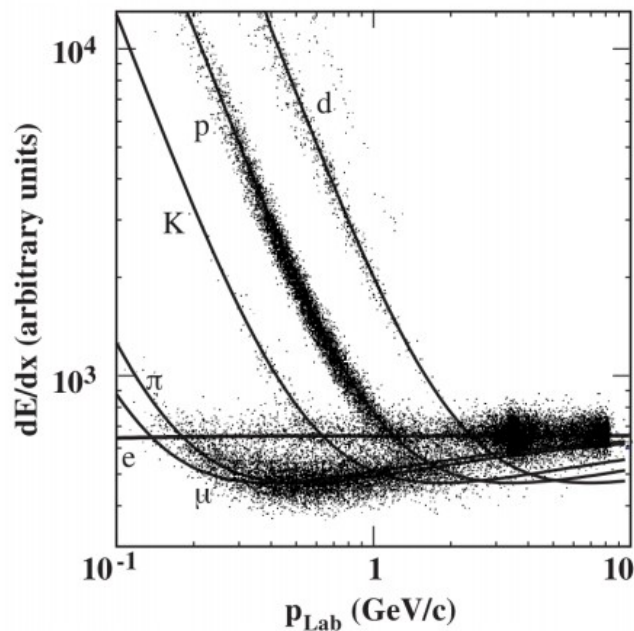
$$IL = 469 \text{ fb}^{-1}$$

ДЕТЕКТОР ВАВАР

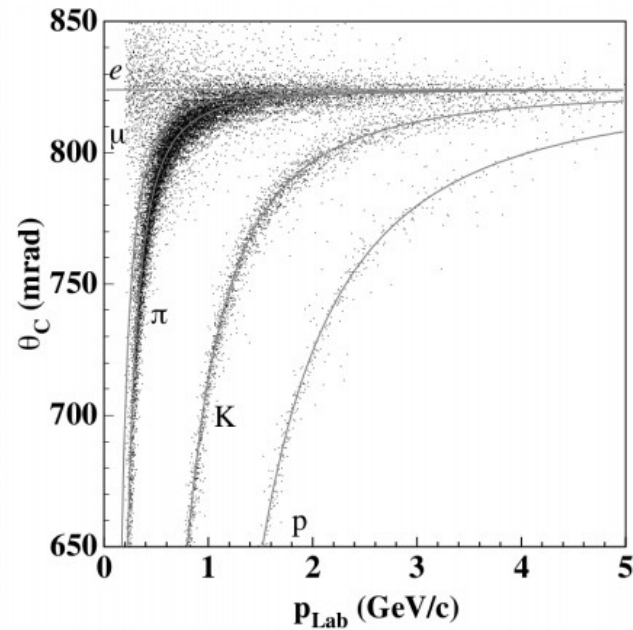
$$\frac{\sigma_{pt}}{pt} = (0.13 \pm 0.01) \cdot \frac{pt}{\text{GeV}/c} \oplus (0.45 \pm 0.03)\%$$

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(2.32 \pm 0.30)}{(E/\text{GeV})^{0.25}} \oplus (1.85 \pm 0.12)\%$$

$$\sigma_\theta \approx \sigma_\phi = \frac{(4.16 \pm 0.04)}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus (0.00 \pm 0.04) \text{ mrad.}$$

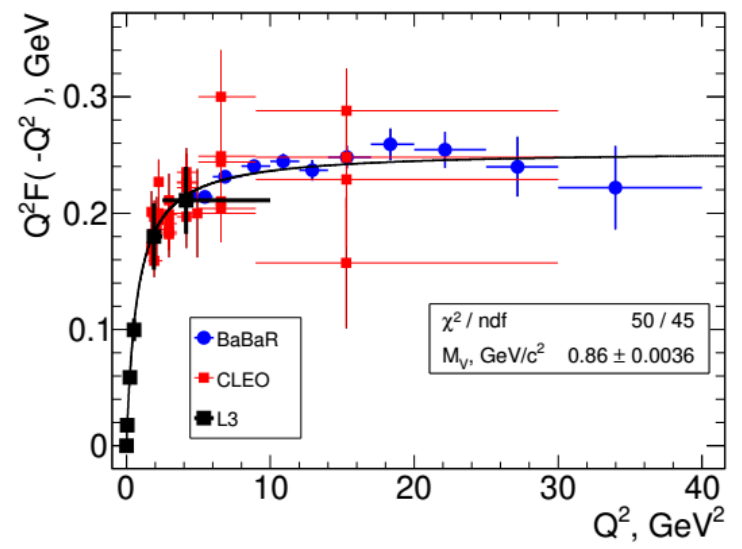
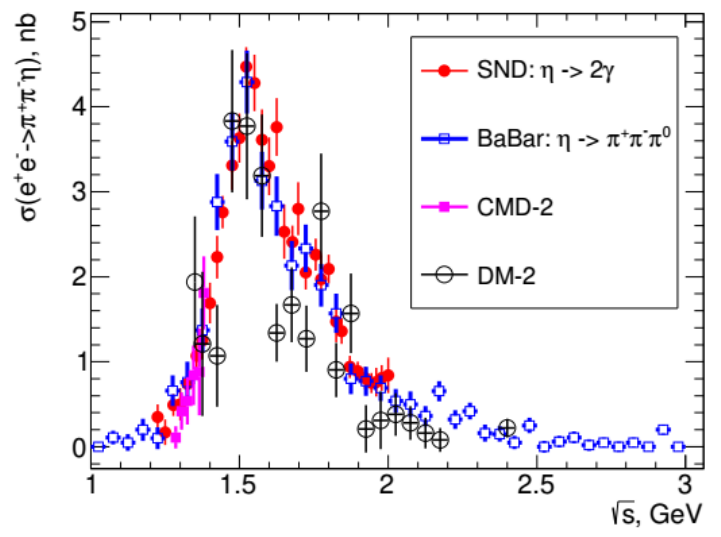
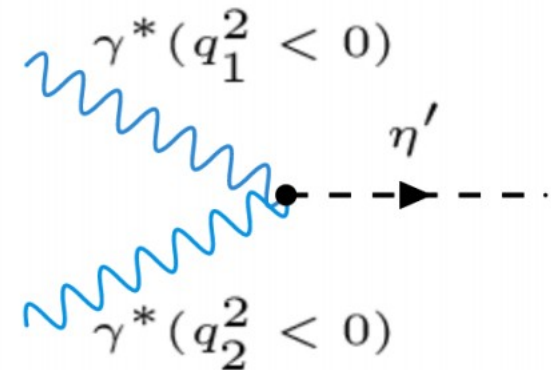
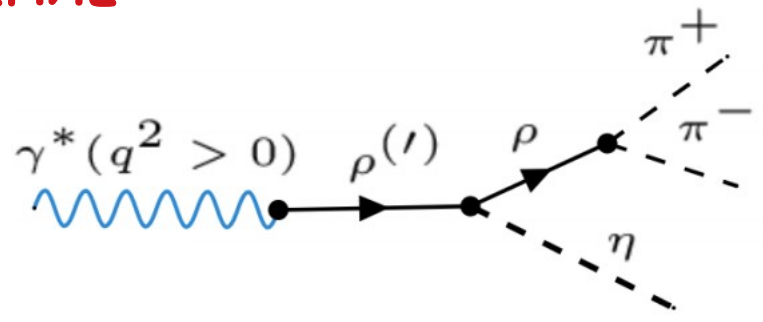


dE/dx в DCH



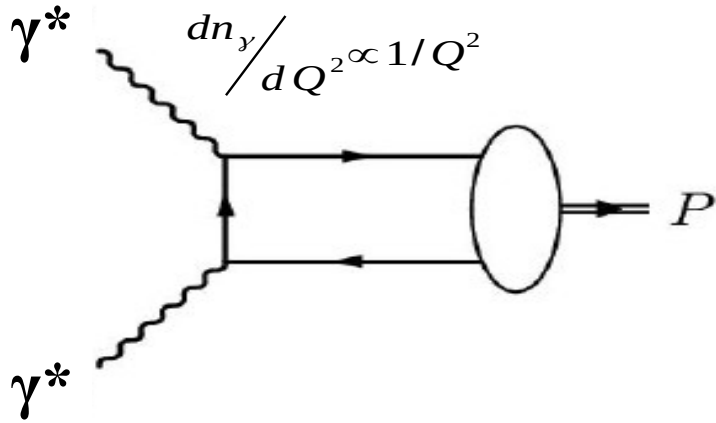
Угол черенковского излучения в DIRC

ВВЕДЕНИЕ



Данные по сечению $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ и ПДФ η' -МЕЗОНА на момент 2018 г.

ПЕРЕХОДНЫЙ ФОРМ-ФАКТОР η' -МЕЗОНА



$e_{1,2}$ — поляризация фотонов

$q_{1,2}$ — 4-импульсы фотонов

$Q^2 \equiv -q^2$

	VMD	pQCD
$Q_1^2 \approx 0, Q_2^2 \rightarrow \infty$	$1/Q^2$	$1/Q^2$
$Q_1^2, Q_2^2 \rightarrow \infty$	$1/Q^4$	$1/Q^2$

Амплитуда перехода $\gamma^*\gamma^* \rightarrow P$: $T = -i4\pi\alpha\epsilon_{\mu\nu\beta\gamma}\epsilon_1^\mu\epsilon_2^\nu q_1^\beta q_2^\gamma F_{\eta'}(Q_1^2, Q_2^2)$

- Измерение ПФФ в области $Q_{1,2}^2 \geq 0$ может быть произведено с помощью реакции $e^+e^- \rightarrow e^+e^- X$, когда рассеянные фермионы не детектируются (**untagged**), детектируется лишь один (**single-tagged**), детектируются оба (**double-tagged**).
- В данной работе впервые произведено **double-tagged** измерение ПФФ псевдоскалярного мезона.

ПФФ η' -МЕЗОНА vs МВД

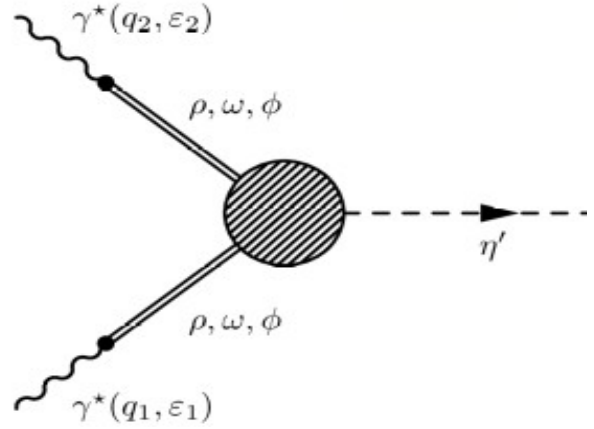
• Ширина распада η' -мезона на два фотона:

$$\Gamma_{\eta' \rightarrow 2\gamma} = \frac{\pi \alpha^2 m_{\eta'}^3}{4} |F(0, 0)|^2 = 4.30 \pm 0.16 \text{ keV} \quad \rightarrow \quad F(0, 0) = 0.342 \pm 0.006 \text{ GeV}^{-1}.$$

• МВД широко используется для описания динамики ПФФ при малых Q^2 :

$$F(Q^2) = \frac{\sum_V \frac{f_{PV\gamma}}{f_V} \cdot \frac{m_V^2 - i\Gamma_V m_V}{m_V^2 - q^2 - i\Gamma_V m_V}}{\sum_V \frac{f_{PV\gamma}}{f_V}} \cdot F(0)$$

- PDG
- $\Gamma(\eta' \rightarrow \rho\gamma)$
 - $\Gamma(\eta' \rightarrow \omega\gamma)$
 - $\Gamma(\phi \rightarrow \eta'\gamma)$
 - $\Gamma(\phi \rightarrow ee)$
 - $\Gamma(\rho \rightarrow ee)$
 - $\Gamma(\omega \rightarrow ee)$



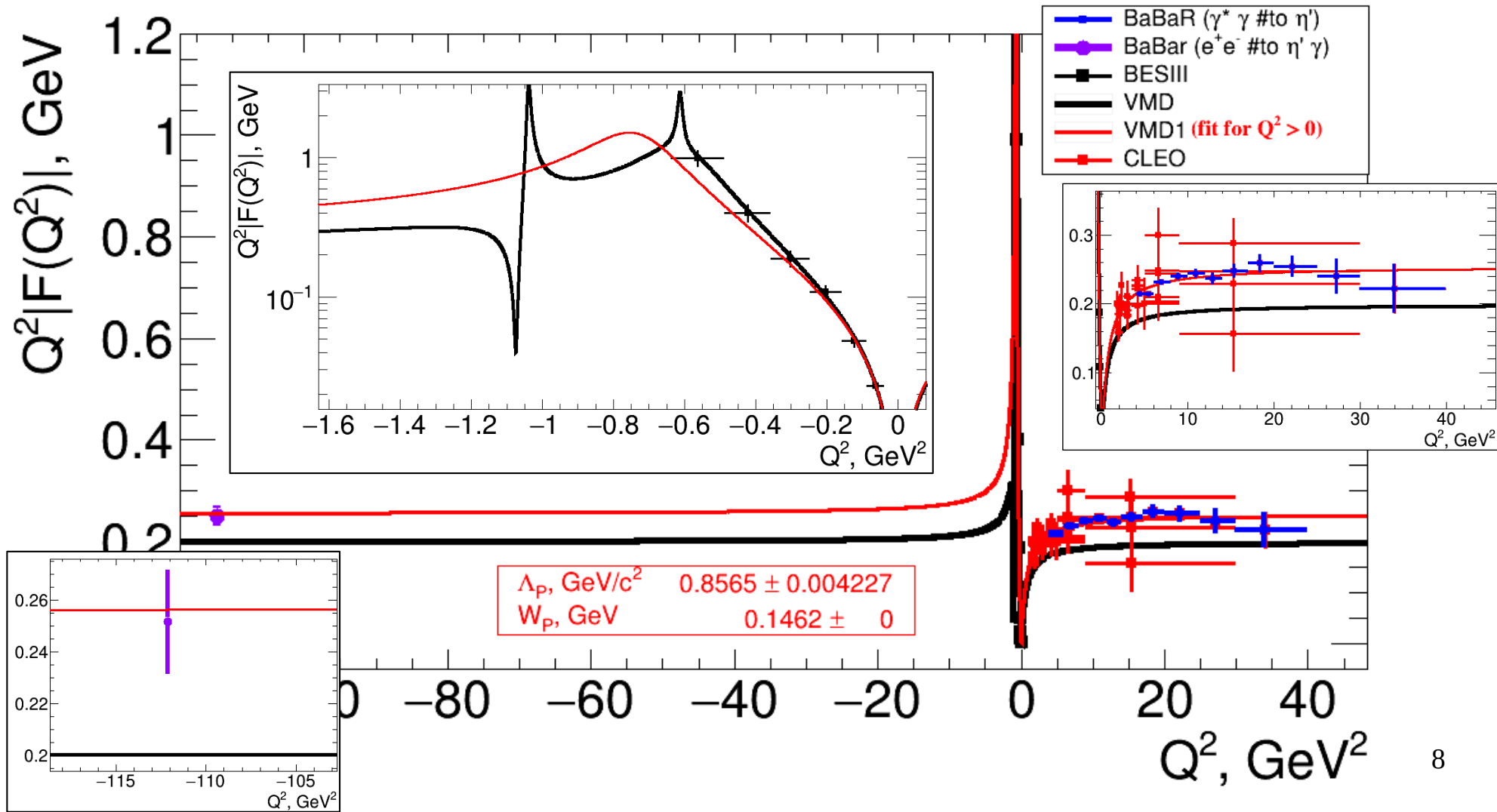
$$B(\phi \rightarrow \eta'\gamma) = (11, 4_{-4,4}^{+5,4} \pm 2, 0) \cdot 10^{-5}.$$

• В дважды виртуальной области:

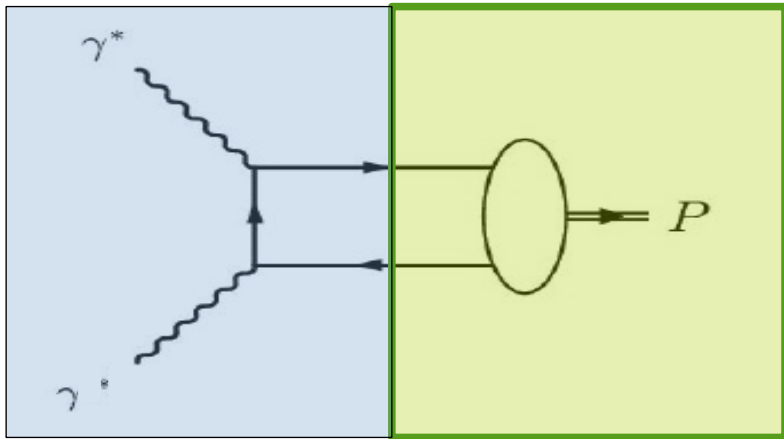
$$F_{\eta'}(Q_1^2, Q_2^2) = \frac{F_{\eta'}(0, 0)}{(1 + Q_1^2/\Lambda_P^2)(1 + Q_2^2/\Lambda_P^2)}$$

где Λ_p — эффективный массовый параметр

$\Pi\Phi\Phi \eta'$ -МЕЗОНА vs МВД



ТФФ η' -МЕЗОНА vs ПКХД



Жесткая часть

Мягкая часть

$$F(Q_1^2, Q_2^2) = \int T(x, Q_1^2, Q_2^2) \varphi(x, Q_1^2, Q_2^2) dx$$

x — доля продольного импульса, переносимого кварком

$T(x, Q_1^2, Q_2^2)$ — амплитуда $\gamma^* \gamma^* \rightarrow q\bar{q}$

$\varphi(x, Q_1^2, Q_2^2)$ — амплитуда распределения мезона

DA

$$T_H(x, Q_1^2, Q_2^2) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{xQ_1^2 + (1-x)Q_2^2} \cdot \left(1 + C_F \frac{\alpha_S(Q^2)}{2\pi} \cdot t(x, Q_1^2, Q_2^2) \right) + (x \rightarrow 1-x) + O(\alpha_s^2) + O(\Lambda_{QCD}^4/Q^4)$$

NLO поправка [E. Braaten, Phys. Rev. D **28**, 3 (1983)]

• $\varphi(x, Q_1^2, Q_2^2)$ зависит от масштаба перенормировки и при больших Q^2 принимает асимптотический вид:

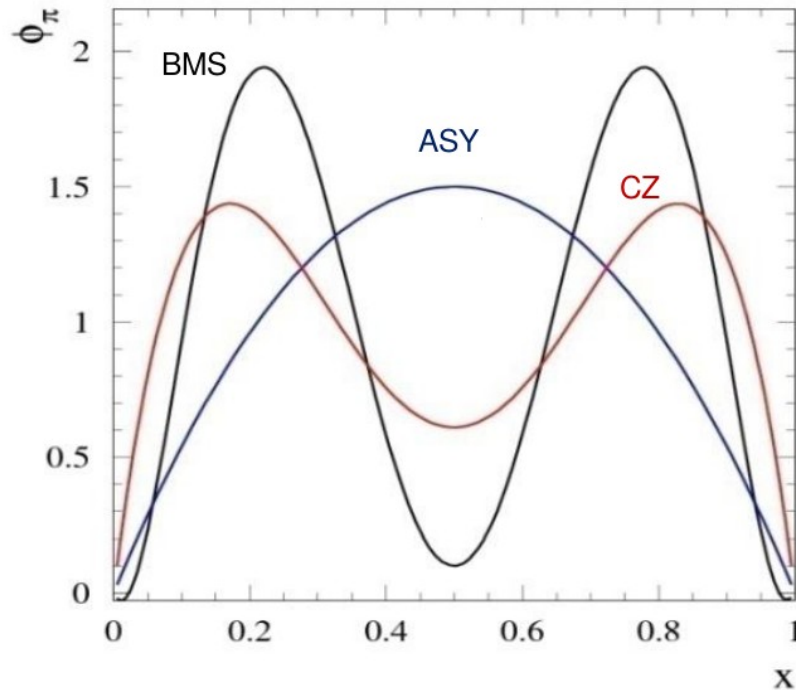
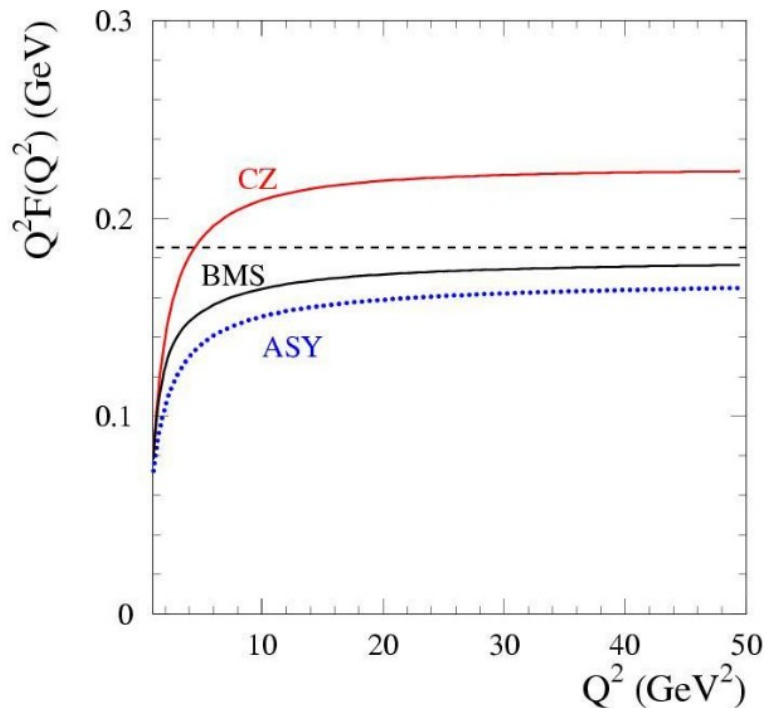
В пределе $\mu \rightarrow \infty$

$$\phi_P(x, \mu) = A_P 6x(1-x)(1 + O(\Lambda_{QCD}^2/\mu^2))$$

[S. J. Brodsky and G. P. Lepage, Phys. Rev. D **24**, 7 (1981)]

ПФФ η' -МЕЗОНА vs ПКХД: АМПЛИТУДА РАСТРЕДЕЛЕНИЯ МЕЗОНА

- Более широкая DA соответствует большому значению $Q^2 F(Q^2)$ при больших Q^2



ASY: G.P. Lepage and S.J. Brodsky, Phys. Lett. B 87, 359 (1979)

CZ: V.L. Chernyak and A.R. Zhitnitsky, Nucl. Phys. B 201, 492 (1982)

BMS: A.P. Bakulev, S.V. Mikhailov, and N.G. Stefanis, Phys. Lett. B 508, 279 (2001)

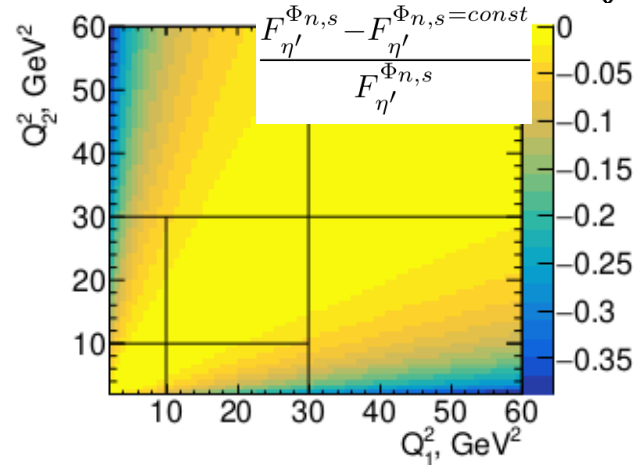
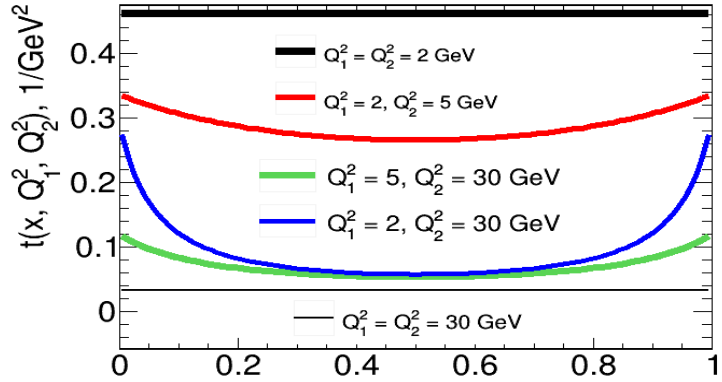
ТФФ η' -МЕЗОНА vs ПКХД

DA

$$F_{\eta'}(Q_1^2, Q_2^2) = \left(\frac{5\sqrt{2}}{9} f_n \sin \phi + \frac{2}{9} f_s \cos \phi \right) \int_0^1 dx \frac{1}{2} \frac{6x(1-x)}{xQ_1^2 + (1-x)Q_2^2} \left(1 + C_F \frac{\alpha_s(\mu^2)}{2\pi} \cdot t(x, Q_1^2, Q_2^2) \right) + (x \rightarrow 1-x),$$

NLO

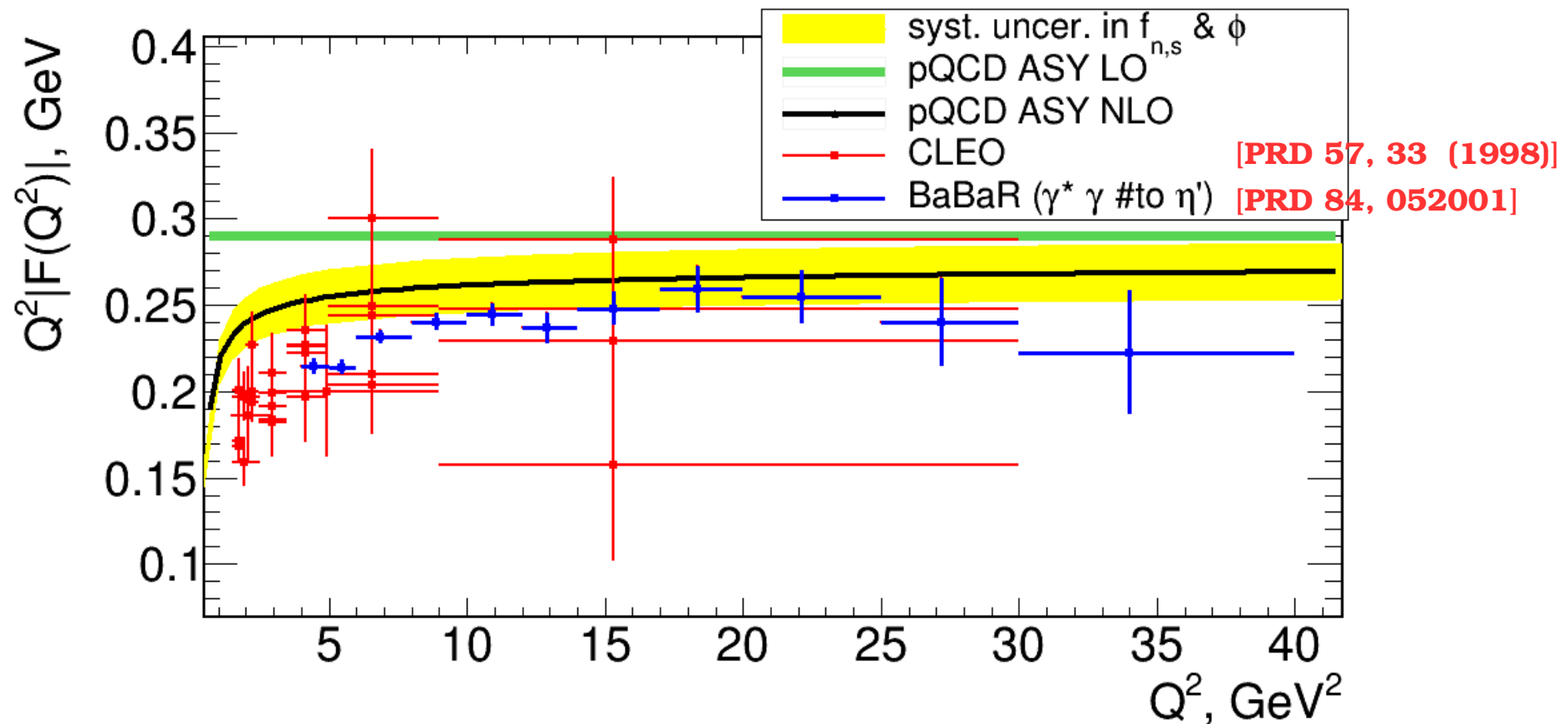
Мастер формула



- Вклад NLO в дважды виртуальный ТФФ значительно меньше чем в «single-tagged» моде

- Фактор $1/[xQ_1^2+(1-x)Q_2^2]$ регулярен везде, дважды виртуальный ТФФ значительно меньше зависит от формы DA, чем в «single-tagged» моде

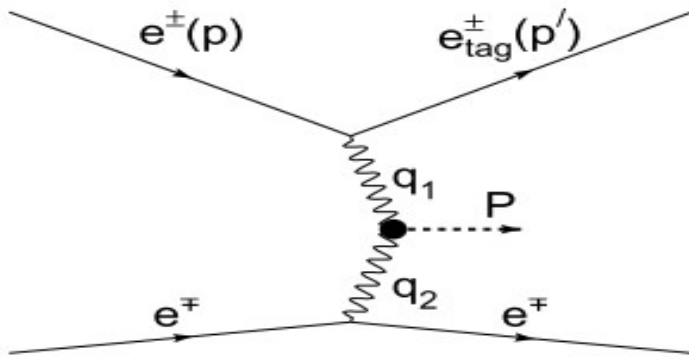
ТФФ η' -МЕЗОНА: ЭКСПЕРИМЕНТ vs ПКХД



Переходный форм-фактор $\gamma^* \gamma \rightarrow \eta'$

ИЗМЕРЕНИЕ $\text{P}\Phi\Phi$ η' -МЕЗОНА

Анализ основан на методике предыдущей работы способом single-tagged [1].



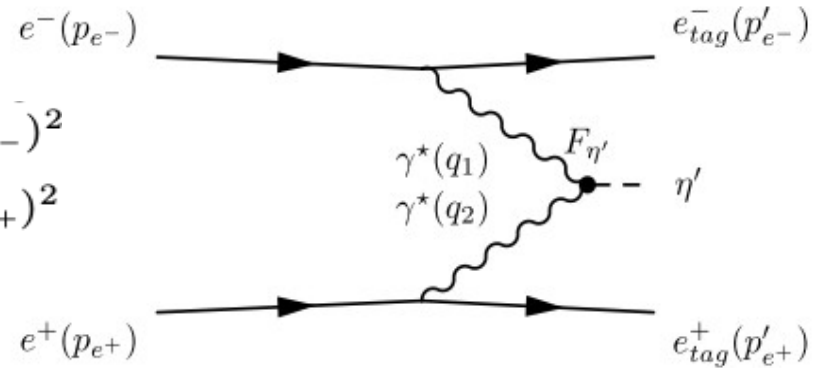
$$\gamma\gamma^* \rightarrow \eta'$$

Single-tagged

~ 5000 signal events

$$q_{e^-}^2 = -Q_{e^-}^2 = (p_{e^-} - p'_{e^-})^2$$

$$q_{e^+}^2 = -Q_{e^+}^2 = (p_{e^+} - p'_{e^+})^2$$



$$\gamma^*\gamma^* \rightarrow \eta'$$

double-tagged

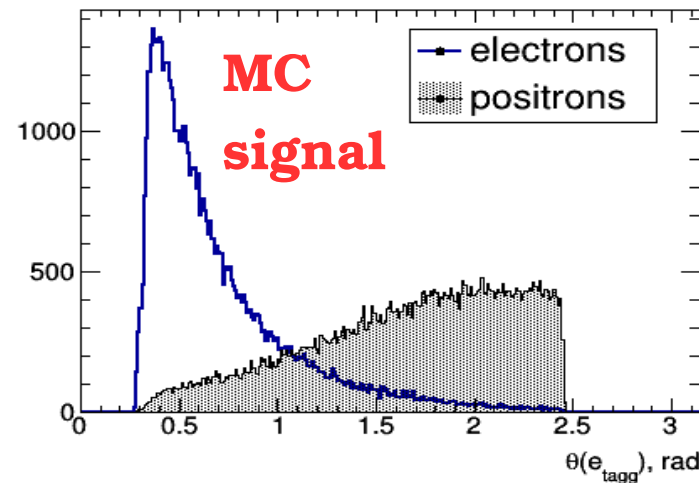
46^{+8}_{-7} signal events

- Большой набор систематических неопределенностей был изучен в предыдущей работе.

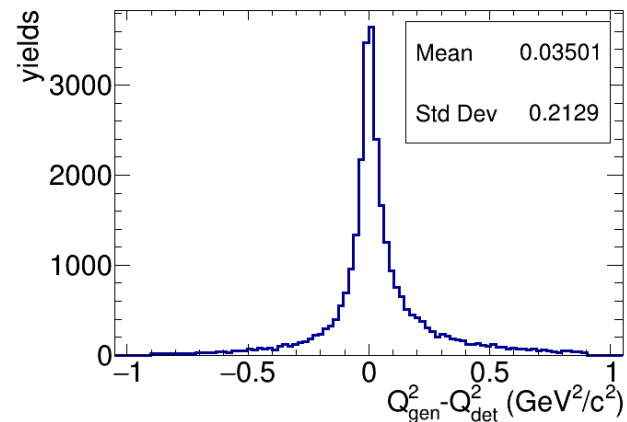
МС МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Используется генератор GGRESRC [1]
- ISR, FSR и эффект вакуумной поляризации учтены в моделировании (с точностью $\sim 1\%$)
- Моделирование произведено с постоянным значением ПФФ
- Максимальная энергия ISR излучения = $0.05 \sqrt{s}$.

Отклик детектора на реконструкцию значений виртуальности фотонов



Полярный угол таггированных электронов



ИЗМЕРЕНИЕ ПФФ η' -МЕЗОНА

$$dN/dQ^2 \longrightarrow d\sigma/dQ^2 \longrightarrow |F(Q^2)|$$

- Идентифицируются моды распада

$$\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\eta \rightarrow \pi^+\pi^-2\gamma$$

- В событии как минимум два электрона и два пиона

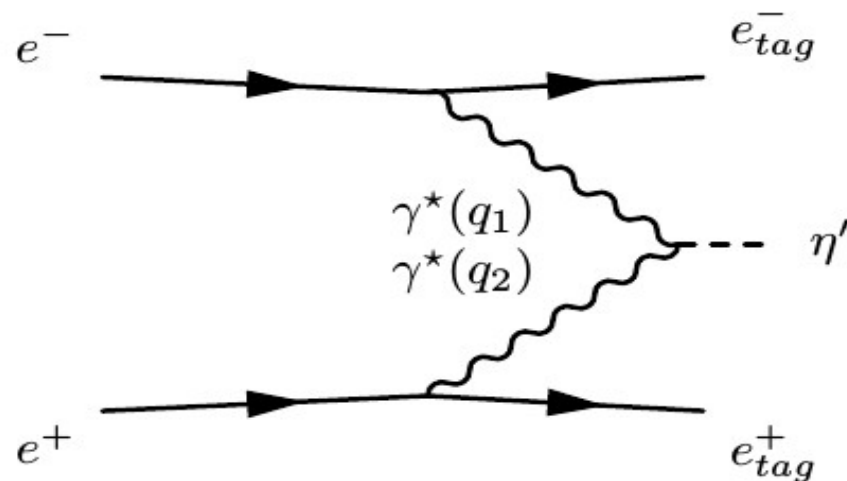
- В событии как минимум два фотона

$$-\varepsilon_\gamma > 30 \text{ MeV}$$

$$-0.45 < m_{\gamma\gamma} < 0.65 \text{ GeV}/c^2$$

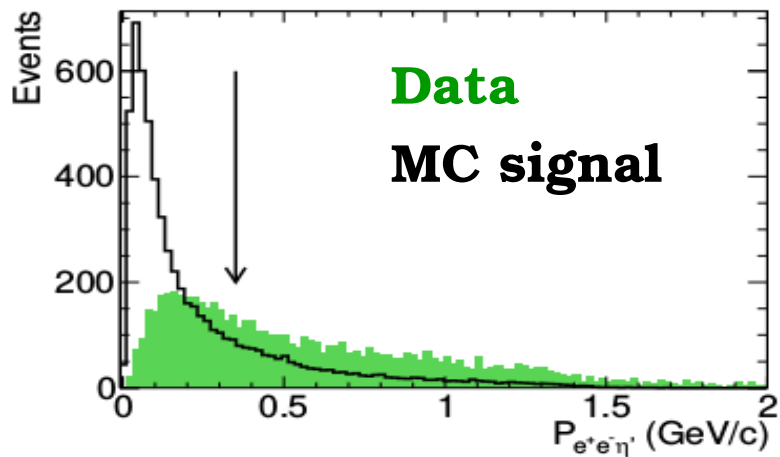
- Кинематическая реконструкция с массовыми констрейнами

- Из всех комбинаций кандидатов выбирается вариант с минимальным полным импульсом в с.ц.м.

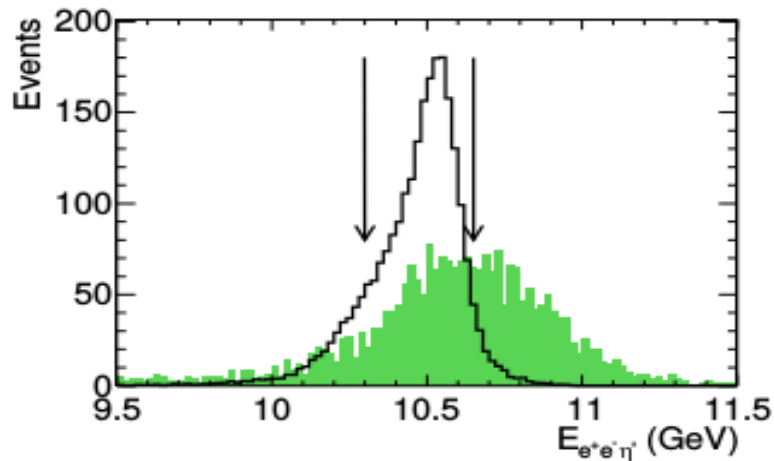


ОТБОР СОБЫТИЙ $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta'$ (958)

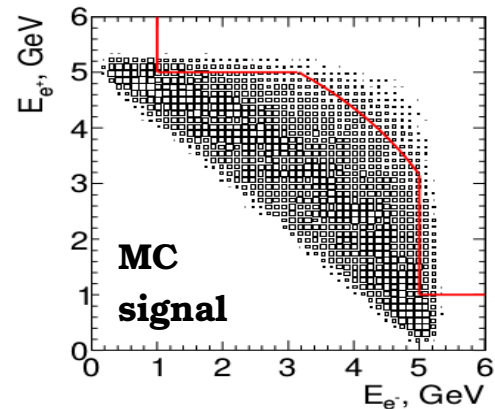
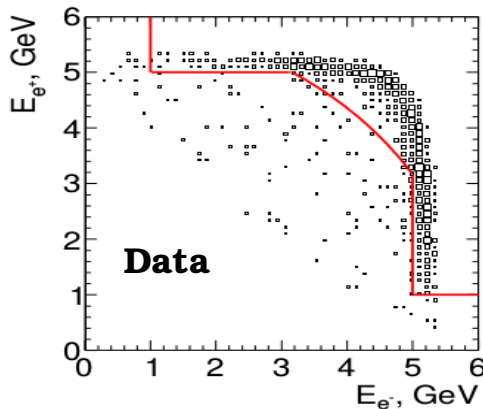
• $P_{c.m.}(e^+e^-\pi^+\pi^-\eta) < 0.35 \text{ ГэВ/с}$



• $10.3 < E_{c.m.}(e^+e^-\pi^+\pi^-\eta) < 10.7 \text{ ГэВ}$

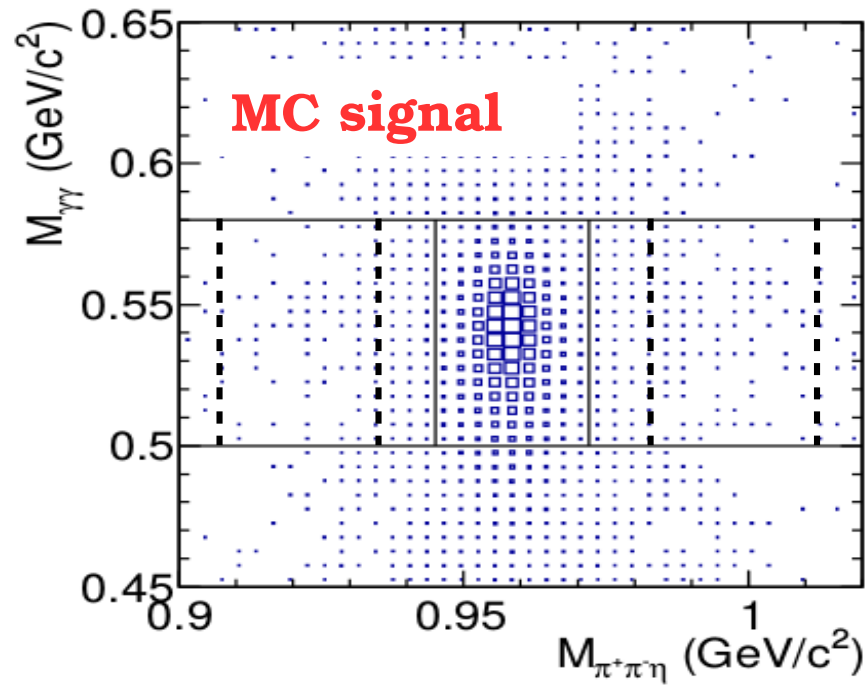
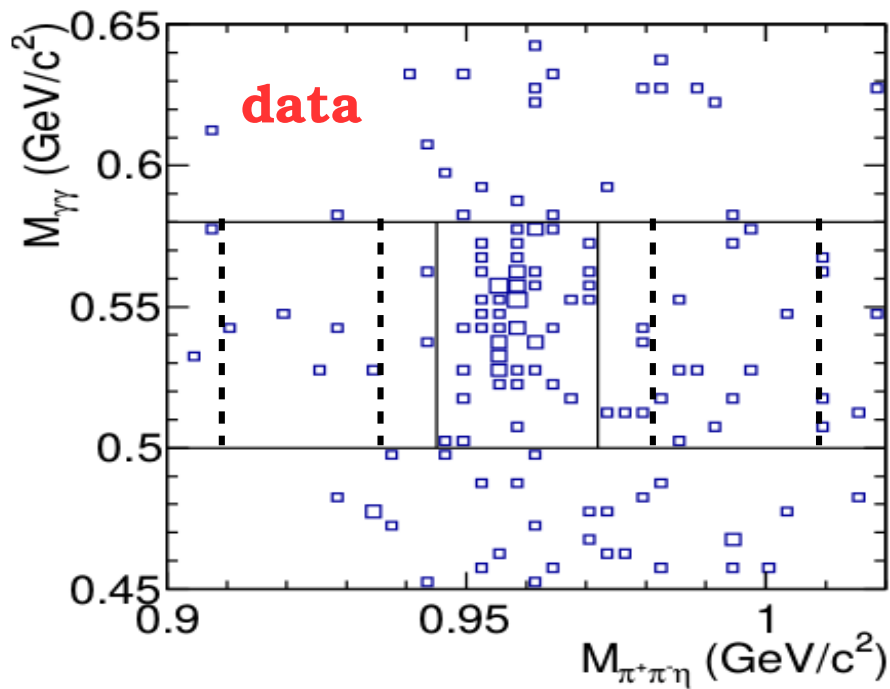


• Подавление фоновых событий Vhabha



Энергия электронов vs энергия позитронов в с.ц.м. ¹⁶

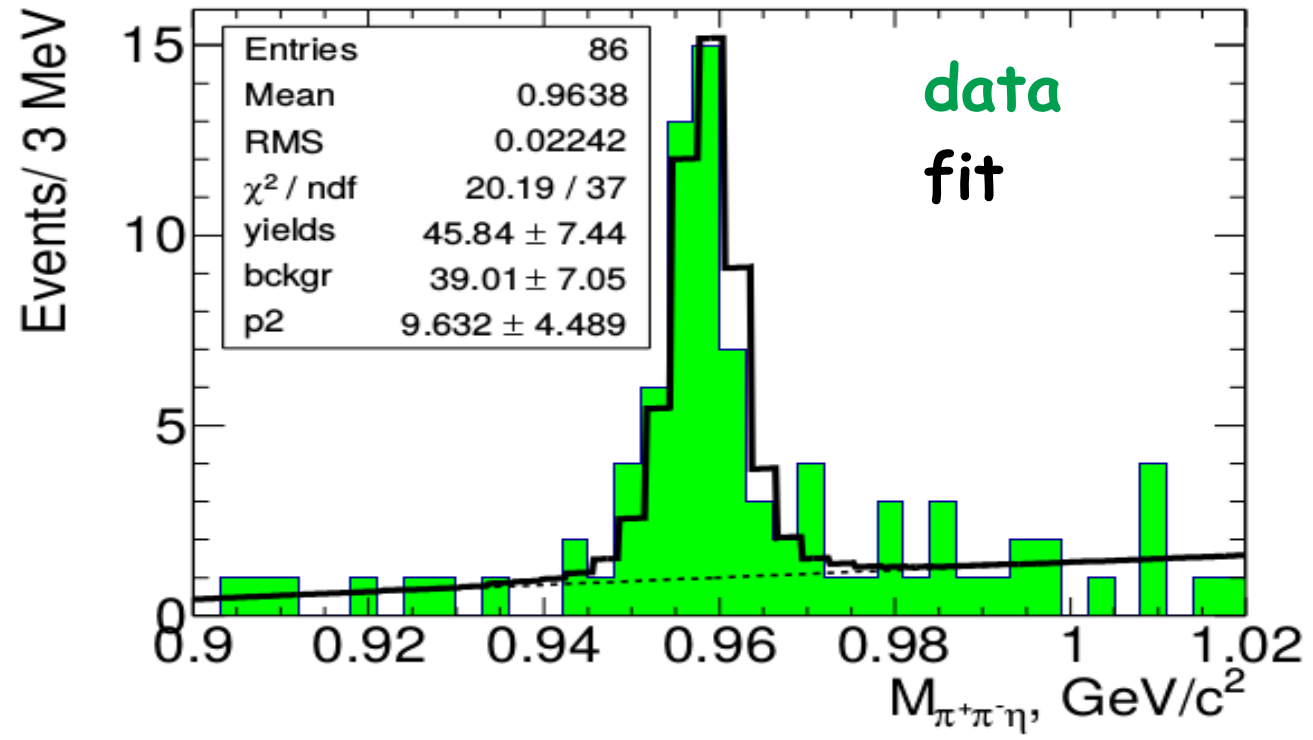
ОТБОР СОБЫТИЙ $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta'$ (958)



Спектр $m_{\gamma\gamma}$ vs. $m_{\pi^+\pi^-\eta}$

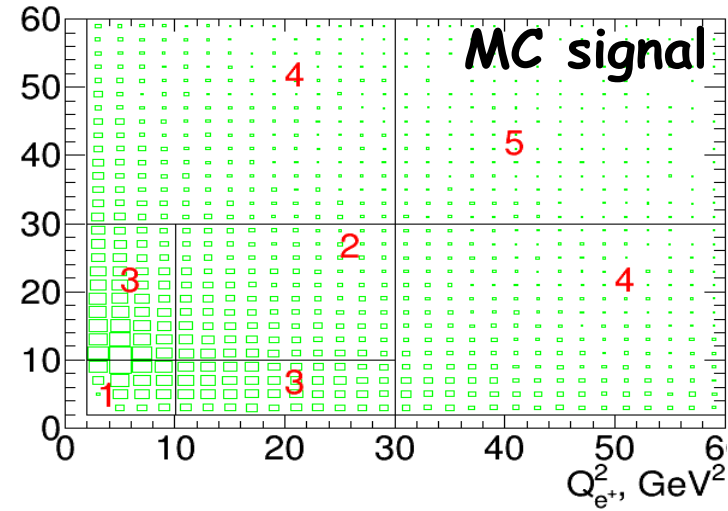
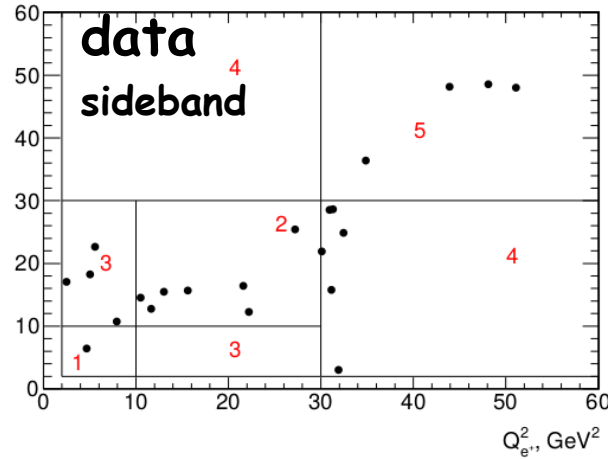
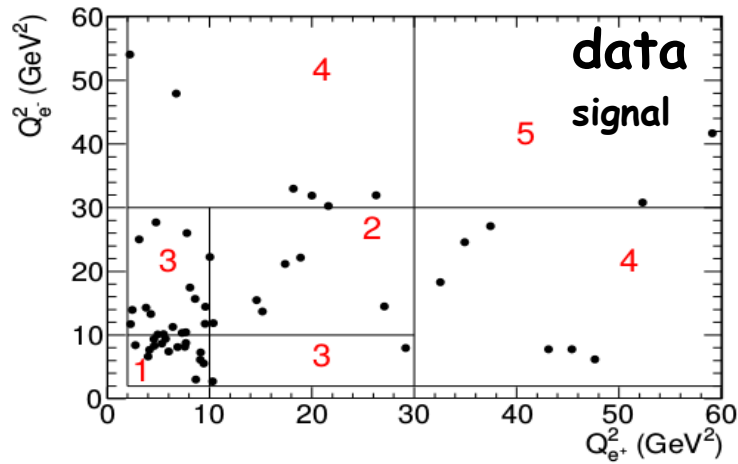
- Требуется $0.50 < m_{\gamma\gamma} < 0.58$ ГэВ/с²

ОТБОР СОБЫТИЙ $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta'$ (958)



Спектр масс системы $\pi^+\pi^-\eta$

ОТБОР СОБЫТИЙ $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta'$ (958)



Спектр $Q_{e^-}^2$ vs. $Q_{e^+}^2$ для событий $0.945 < m_{2\pi\eta} < 0.972$ ГэВ/c²

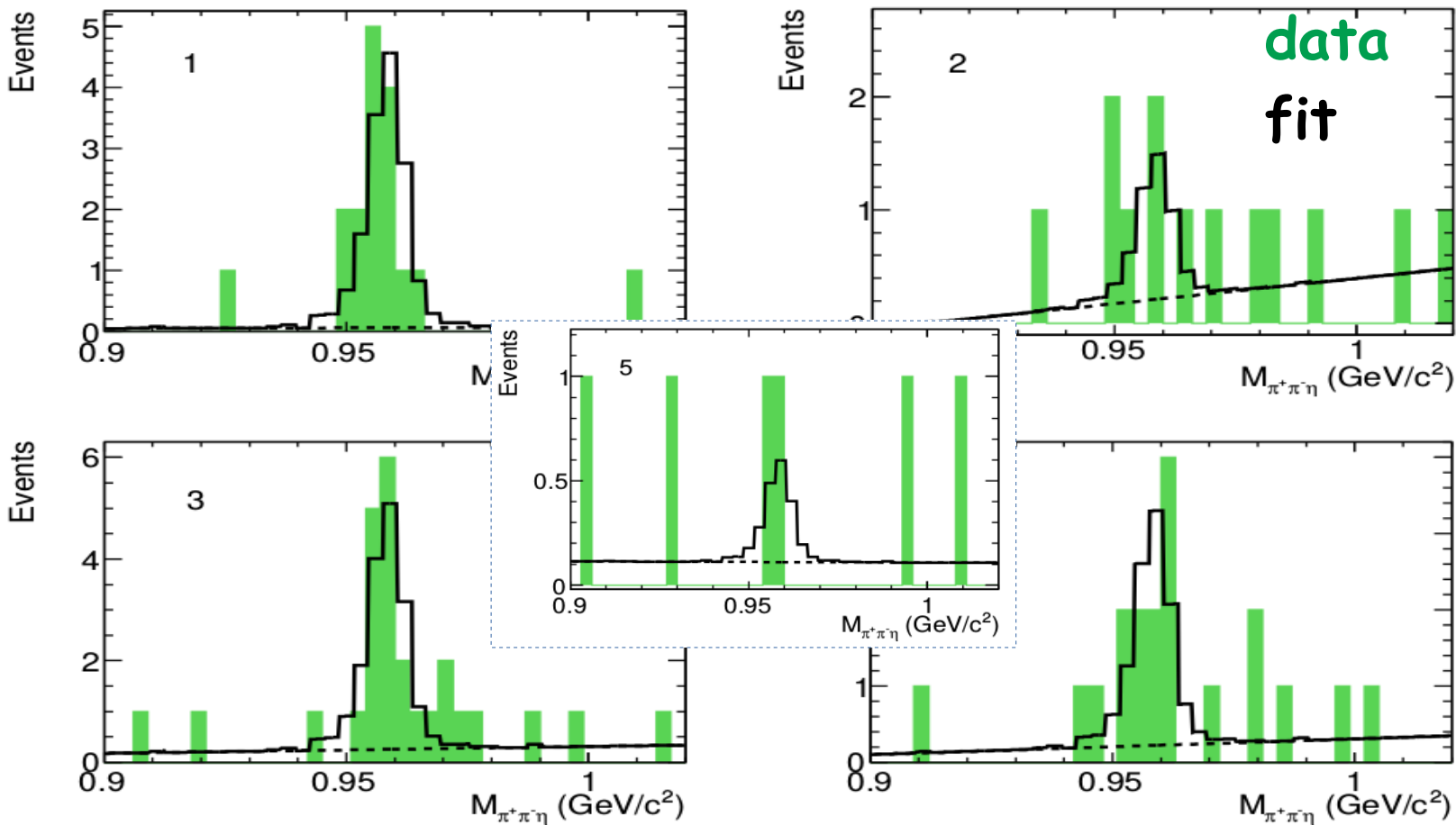
- $Q_1^2 = \max(Q_{e^+}^2, Q_{e^-}^2)$, $Q_2^2 = \min(Q_{e^+}^2, Q_{e^-}^2)$

- Средние значения виртуальностей в каждой области

$$\overline{Q_{1,2}^2} = \frac{\sum_i Q_{1,2}^2(i) / \varepsilon(Q_1^2, Q_2^2)}{\sum_i 1 / \varepsilon(Q_1^2, Q_2^2)}$$

ОТБОР СОБЫТИЙ

- Полное число сигнальных событий $N_{\text{signal}}^{\text{fit}} = 46.2^{+8.3}_{-7.0}$



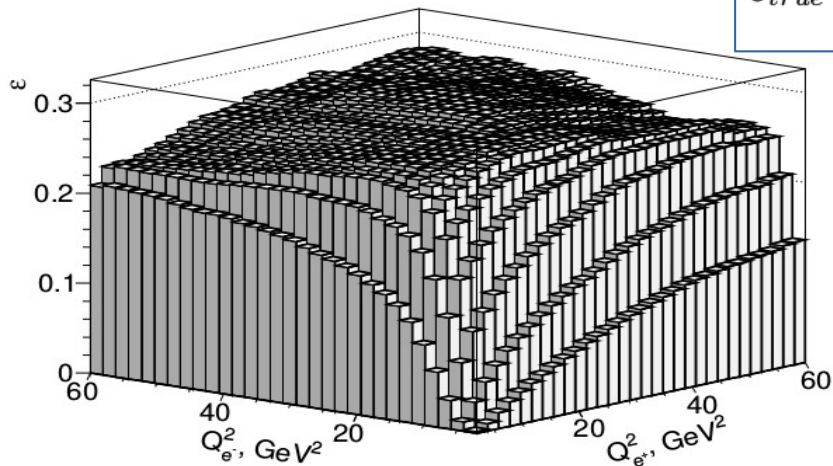
Спектр масс $\pi^+\pi^-\eta$

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ

• Геометрия детектора ограничивает регистрацию электронов при малых Q^2 .

Минимальное $Q^2 = 2 \text{ ГэВ}^2$.

$$\epsilon_{true} = \frac{\int \epsilon(Q_1^2, Q_2^2) F_{\eta'}^2(Q_1^2, Q_2^2) dQ_1^2 dQ_2^2}{\int F_{\eta'}^2(Q_1^2, Q_2^2) dQ_1^2 dQ_2^2} \quad (F_{\eta'} \text{ из мастер-формулы \#7})$$

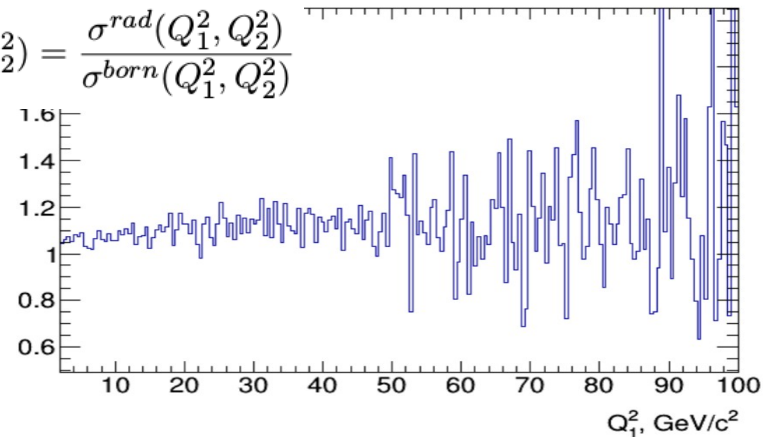


Зависимость эффективности регистрации от Q^2 .

• Эффективность регистрации асимметрична

• Радиационная поправка $\sim 10 \%$.

$$R(Q_1^2, Q_2^2) = \frac{\sigma^{rad}(Q_1^2, Q_2^2)}{\sigma^{born}(Q_1^2, Q_2^2)}$$



Отношение спектров Q^2 в моделировании с ISR и без

СЕЧЕНИЕ И ФОРМ-ФАКТОР

$$\frac{d^2\sigma}{dQ_1^2 dQ_2^2} = \frac{1}{\epsilon_{\text{true}} R L B} \frac{d^2 N}{dQ_1^2 dQ_2^2}$$

$$F^2(\overline{Q_1^2}, \overline{Q_2^2}) = \frac{(d^2\sigma/(dQ_1^2 dQ_2^2))_{\text{data}}}{(d^2\sigma/(dQ_1^2 dQ_2^2))_{\text{MC}}} F_{\eta'}^2(\overline{Q_1^2}, \overline{Q_2^2})$$

- $B = B(\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta) \times B(\eta \rightarrow 2\gamma) = 0.169 \pm 0.003$

- $\sigma_{e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta'} (2 < Q_1^2, Q_2^2 < 60 \text{ GeV}^2) = (11.4^{+2.8}_{-2.4}) \text{ fb}$

$\overline{Q_1^2}, \overline{Q_2^2}, \text{ GeV}^2$	ϵ_{true}	R	N_{events}	$d^2\sigma/(dQ_1^2 dQ_2^2) \times 10^4, \text{ fb/GeV}^4$	$F(\overline{Q_1^2}, \overline{Q_2^2}) \times 10^3, \text{ GeV}^{-1}$
6.48, 6.48	0.019	1.03	$14.7^{+4.3}_{-3.6}$	$1471.8^{+430.1}_{-362.9}$	$14.32^{+1.95}_{-1.89} \pm 0.83 \pm 0.14$
16.85, 16.85	0.282	1.10	$4.1^{+2.7}_{-2.7}$	$4.2^{+2.8}_{-2.8}$	$5.35^{+1.54}_{-1.54} \pm 0.31 \pm 0.42$
14.83, 4.27	0.145	1.07	$15.8^{+4.8}_{-4.0}$	$39.7^{+12.0}_{-10.2}$	$8.24^{+1.16}_{-1.13} \pm 0.48 \pm 0.65$
38.11, 14.95	0.226	1.11	$10.0^{+3.9}_{-3.2}$	$3.0^{+1.2}_{-1.0}$	$6.07^{+1.09}_{-1.07} \pm 0.35 \pm 1.21$
45.63, 45.63	0.293	1.22	$1.6^{+1.8}_{-1.1}$	$0.6^{+0.7}_{-0.6}$	$8.71^{+3.96}_{-8.71} \pm 0.50 \pm 1.04$

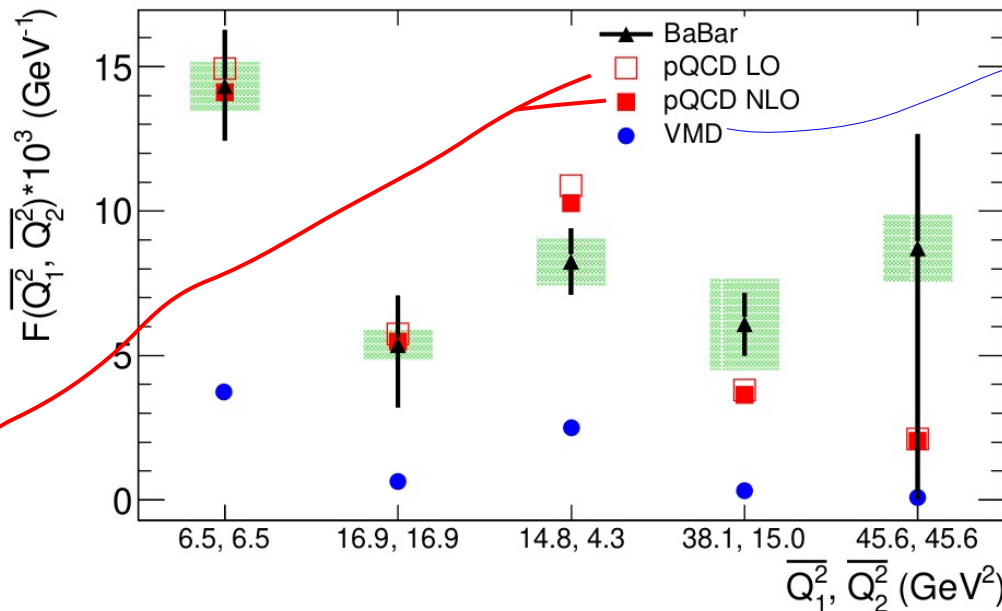
Statistical

Systematic

Model

• Статистические ошибки доминируют

СРАВНЕНИЕ ПФФ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ ПРЕДСКАЗАНИЯМИ



$$F_{\eta'}(Q_1^2, Q_2^2) = \frac{F_{\eta'}(0, 0)}{(1 + Q_1^2/\Lambda_P^2)(1 + Q_2^2/\Lambda_P^2)}$$

Параметр Λ_P фиксирован при 849 МэВ/с² из аппроксимации $F_{\eta'}(Q^2, 0)$ [Phys. Rev. D 85, 057501 (2012)].

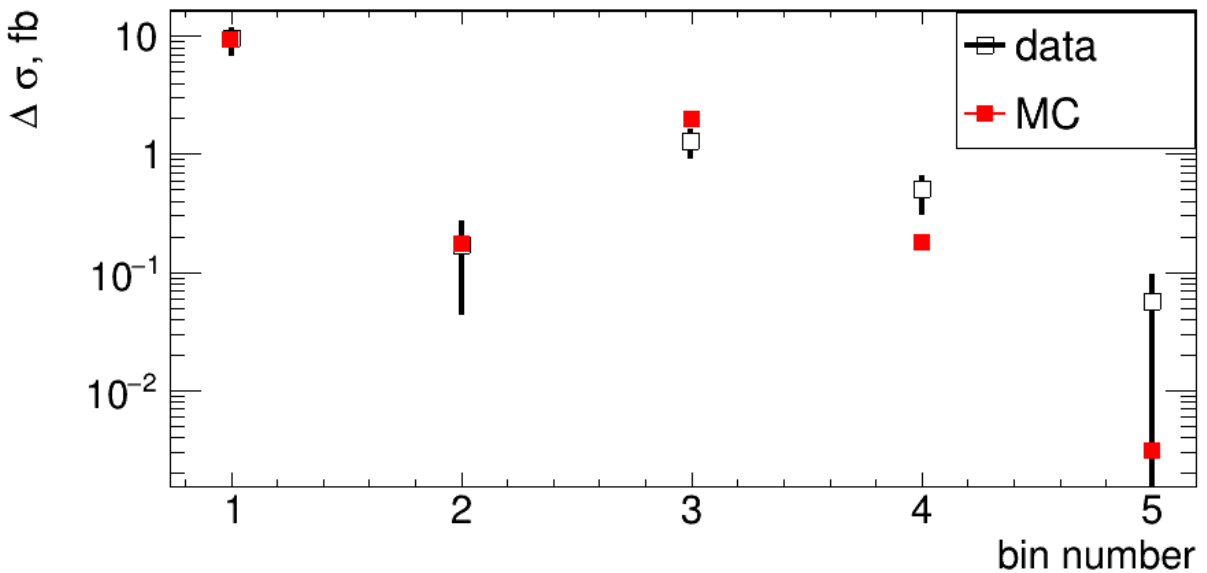
Сравнение ПФФ с теорией. Закрашенные области — квадратичная сумма систематической и модельной ошибок.

$$F_{\eta'}(Q_1^2, Q_2^2) = \left(\frac{5\sqrt{2}}{9} f_n \sin \phi + \frac{2}{9} f_s \cos \phi \right) \int_0^1 dx \frac{1}{2} \frac{6x(1-x)}{xQ_1^2 + (1-x)Q_2^2} \left(1 + C_F \frac{\alpha_s(\mu^2)}{2\pi} \cdot t(x, Q_1^2, Q_2^2) \right) + (x \rightarrow 1-x).$$

NLO

- пКХД согласуется с данными ($\chi^2/n.d.f. = 6.2/5$, Prob = 28%)
- МВД противоречит эксперименту

СРАВНЕНИЕ СЕЧЕНИЯ С КХД ПРЕДСКАЗАНИЕМ

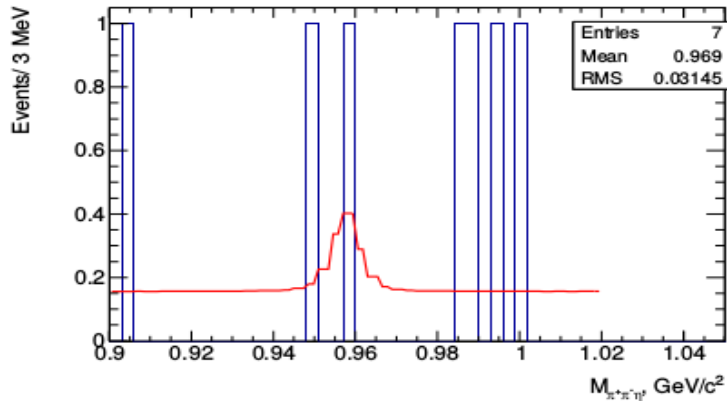


Сравнение измеренного и предсказанного значений сечения процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta'$ (958)

- Сумма сечений во всех интервалах: $\sigma (2 < Q_1^2, Q_2^2 < 60) \text{ ГэВ}^2 = (11.4^{+2.8}_{-2.4 \text{ stat}} \pm 1.4_{\text{ syst}} \pm 6.5_{\text{ model}}) \text{ фб}$
- Сечение во всем диапазоне виртуальностей $0 < Q_1^2, Q_2^2 < \infty$ составляет $(0.78 \pm 0.01) \text{ нб}$

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ

• $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta'\pi^0 \rightarrow e^+e^-\pi^-\pi^+\eta\pi^0$ — фон, кинематически близкий к сигнальным событиям. Для определения эффективности произведено моделирование $e^+e^- \rightarrow e^+e^-a_0(1450) \rightarrow e^+e^-\eta'\pi^0$.



Спектр масс $\pi^+\pi^-\eta$

$$N_{\eta'\pi^0}^{signal} < 1.45 \text{ at } 90\% \text{ C.L.}$$

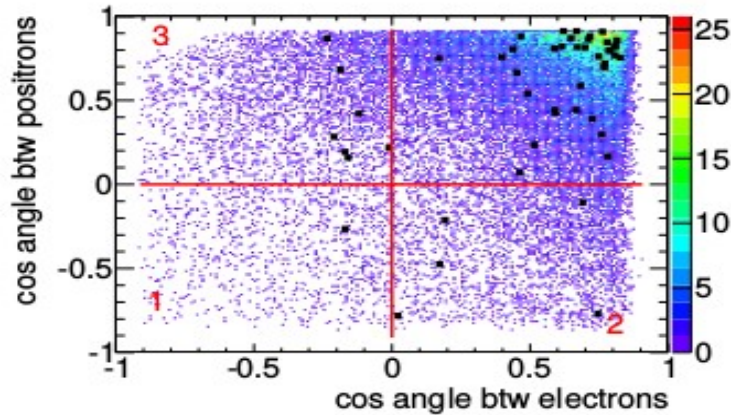
Эффективность регистрации $e^+e^-\eta'\pi^0$ в гипотезе $e^+e^-\eta'$

$$N_{bkg} = \frac{N_{\eta'\pi^0}^{signal} \epsilon_{\eta'\pi^0}^{(2)}}{\epsilon_{\eta'\pi^0}^{(1)}} < 0.16 \text{ at } 90\% \text{ C.L.}$$

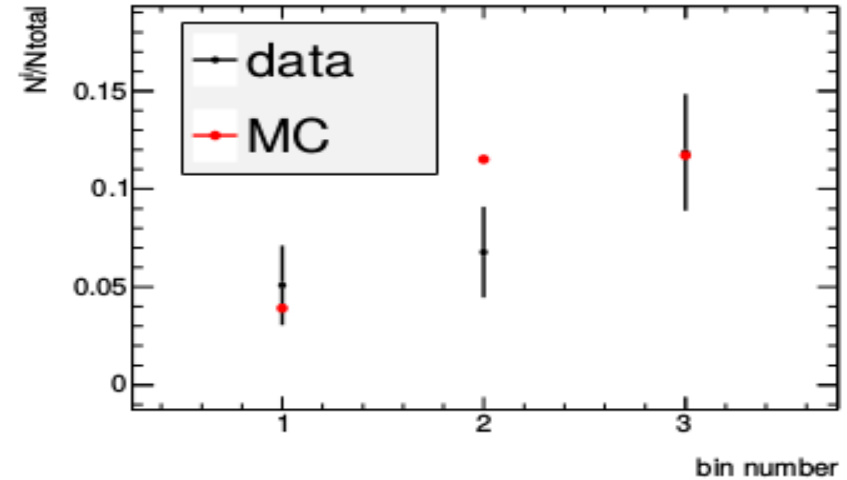
Эффективность регистрации $e^+e^-\eta'\pi^0$ в гипотезе $e^+e^-\eta'\pi^0$

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ

- Вклад $e^+e^- \rightarrow e^+e^- J/\psi(\phi) \rightarrow e^+e^- \eta' \gamma$ пренебрежим [PRD 84, 052001].
- $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow X$:



Спектр косинусов углов между начальными и рассеянными электронами



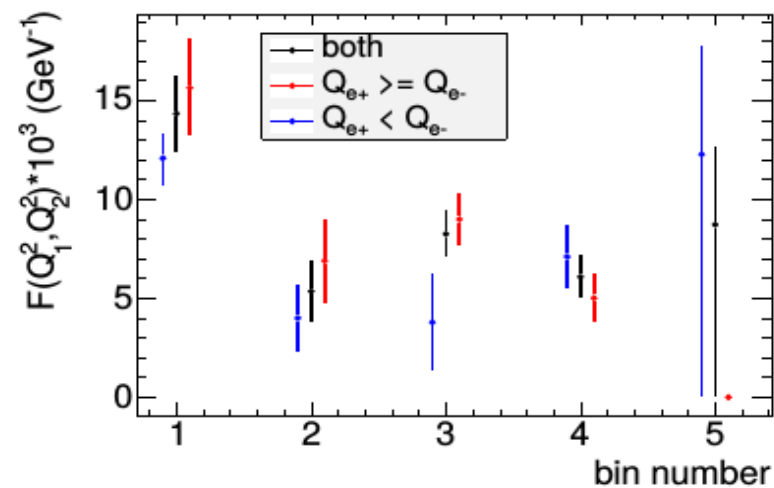
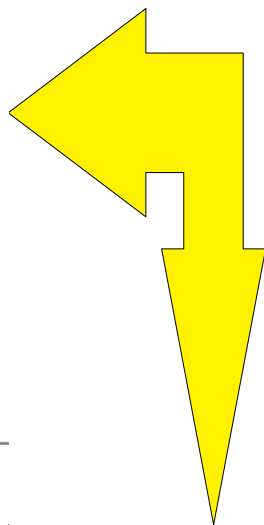
Доля событий в каждой области

Для событий аннигиляции спектр косинусов должен быть симметричным относительно нуля.

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ

Источник Ошибка (%) [PRD 84, 052001]

Идентификация π^\pm	1.0
Идентификация e^\pm	1.0
Другие условия отбора	11.0
Реконструкция треков	0.9
Реконструкция $\eta \rightarrow 2\gamma$	2.0
Триггеры, фильтры	1.3
Вычитание фона	3.7
Радиационная поправка	1.0
Светимость	1.0
Сумма	12%



Сравнение ПФФ в областях

$$Q_{e^+}^2 < Q_{e^-}^2, Q_{e^+}^2 \geq Q_{e^-}^2$$

отбор	$N_{signal}/\epsilon_{true}$	отклонение от номинальных условий (%)
номинальные условия отбора	985 ± 197	
$P_{e^+e^-\eta'} < 1$ ГэВ/с вместо 0.35 ГэВ/с	1052 ± 273	6.8
$10.20 < E_{e^+e^-\eta'} < 10.75$ ГэВ вместо $10.3 < E_{e^+e^-\eta'} < 10.65$ ГэВ	942 ± 235	-4.3
без требований на E_{e^+} и E_{e^-}	1061 ± 280	7.7
$0.48 < m_{2\gamma} < 0.60$ ГэВ/с ² вместо $0.50 < m_{2\gamma} < 0.58$ ГэВ/с ²	958 ± 181	-2.7
квадратичная сумма		11

МОДЕЛЬНАЯ ОШИБКА

- $(d^2\sigma/(dQ_1^2 dQ_2^2))_{MC}$ и ϵ_{true} зависят от модели в моделировании

Модельная неопределенность в сечении — около 60% (из-за большой зависимости ϵ_{true} от Q_1^2 и Q_2^2).

Сечение $\frac{d^2\sigma}{dQ_1^2 dQ_2^2}$ (фб/ГэВ⁴) с разными моделями ПФФ

модель ПФФ	1	2	3	4	5
пКХД	1471.8 ^{+430.136} _{-362.91}	4.17 ^{+2.75} _{2.75}	39.72 ^{+11.98} _{-10.18}	2.98 ^{+1.17} _{-0.96}	0.62 ^{+0.69} _{-0.62}
const	637.10 ^{+186.19} _{-157.09}	4.15 ^{+2.74} _{2.74}	33.30 ^{+10.05} _{-8.54}	2.76 ^{+1.08} _{-0.89}	0.62 ^{+0.69} _{-0.62}
отклонение, %	60	0.6	15	7	1

Значения ПФФ при разных моделях ПФФ

модель ПФФ	1	2	3	4	5
пКХД	14.32 ^{+1.95} _{-1.89}	5.35 ^{+1.54} _{-1.54}	8.24 ^{+1.16} _{-1.13}	6.07 ^{+1.09} _{-1.07}	8.71 ^{+3.96} _{-8.71}
const	14.61 ^{+1.99} _{-1.92}	5.62 ^{+1.62} _{-1.62}	7.24 ^{+1.02} _{-0.99}	7.24 ^{+1.30} _{-1.28}	10.02 ^{+4.55} _{-10.02}
отклонение, %	1	8	8	20	12

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Выделено около 50 событий двухфотонного процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \eta'$, где конечные фермионы рассеяны на большой угол и зарегистрированы. Впервые измерен переходной формфактор псевдоскалярного мезона в дважды виртуальной области $2 < Q_1^2, Q_2^2 < 60 \text{ ГэВ}^2$.
2. Показано, что предсказания на основе факторизационной теоремы в теории возмущений КХД согласуются с полученными экспериментальными значениями, в то время как модель векторной доминантности недооценивает величину формфактора.
3. Выполнено измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \eta'$:
 $\sigma(2 < Q_1^2, Q_2^2 < 60) \text{ ГэВ}^2 = (11.4^{+2.8}_{-2.4 \text{ stat}} \pm 1.4_{\text{ syst}} \pm 6.5_{\text{ model}}) \text{ фб}$.
4. Измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ в диапазоне энергий $E_{\text{c.m.}} = 1.15\text{-}3.5 \text{ ГэВ}$. В диапазоне энергии $1.5\text{-}2.4 \text{ ГэВ}$ на фоне спада сечения наблюдается интерференция вкладов нескольких промежуточных резонансов. В области энергий $E_{\text{c.m.}} = 3.0\text{-}3.5 \text{ ГэВ}$ сечение измерено впервые.
5. Зависимость сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ от энергии в диапазоне $E_{\text{c.m.}} = 1.2\text{-}2.2 \text{ ГэВ}$ аппроксимирована в рамках МВД четырьмя изовекторным резонансами. Получены параметры этих резонансов.
6. Получено значение CVC предсказания $B(\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \eta \nu_\tau) = (0.162 \pm 0.009) \%$.
7. Измерена величина $\Gamma(J/\psi \rightarrow e^+e^-) B(J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta) = (2.34 \pm 0.46) \text{ эВ}$. Определена вероятность распада $B(J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta) = (0.042 \pm 0.008) \%$.

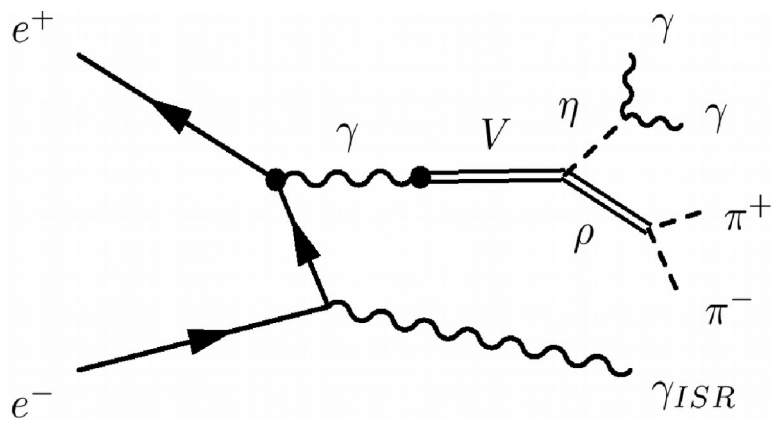
ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta(\gamma)$. ПРИНЦИП ISR ИЗМЕРЕНИЙ.

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons} + \gamma$ может быть представлено в факторизованной форме:

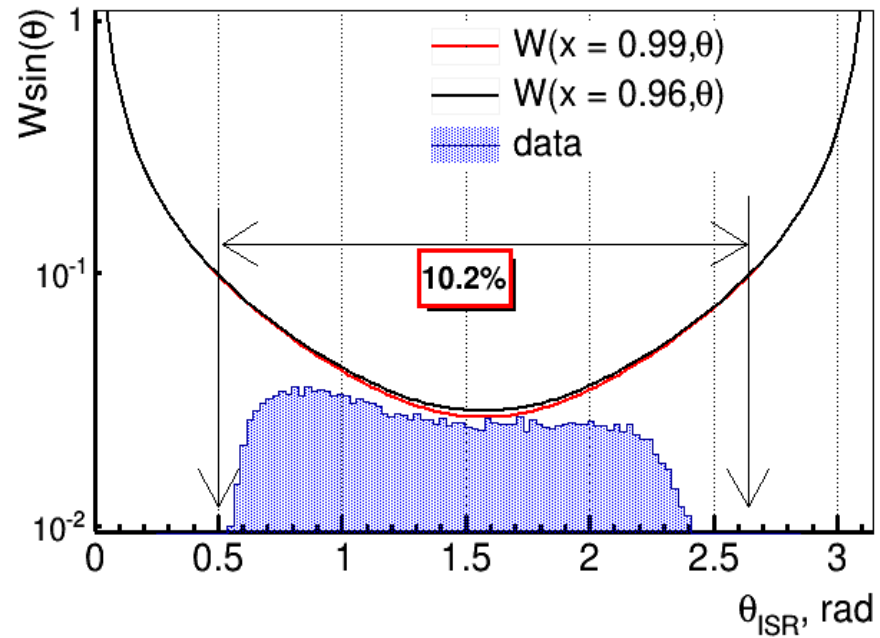
$$\frac{d\sigma_{e^+e^- \rightarrow \eta\pi^-\pi^+\gamma}(x, \theta_\gamma)}{dx d\cos\theta_\gamma} = W(s_0, x, \theta_\gamma) \cdot \sigma_{e^+e^- \rightarrow \eta\pi^-\pi^+}(\sqrt{s_0(1-x)})$$

$$E_{\text{c.m.}} \equiv \sqrt{s_0(1-x)} \equiv \sqrt{s} \equiv m_{2\pi\eta}$$

$$\sqrt{s_0} \approx 10.58 \text{ ГэВ}$$



В С.Ц.М.



$$N_{e^+e^- \rightarrow \eta\pi^-\pi^+(\gamma)} = \int L \epsilon_{\text{reg}}(x) \cdot R \cdot W(s, x) \cdot \sigma(\sqrt{s(1-x)}) dx, \quad x = \frac{2E_\gamma}{\sqrt{s}}$$

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta(\gamma)$

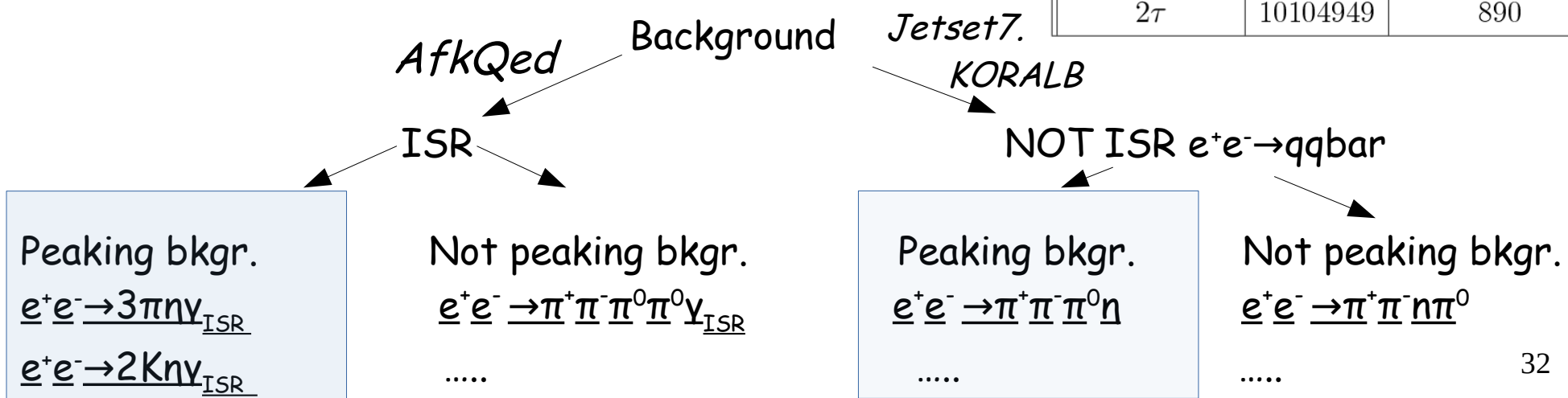
Сводные данные истории исследований процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$.

	ссылка	год	\sqrt{s} , ГэВ	мода распада η	N событий
[3]	DM1 at DCI	1982	1.4 ÷ 2.18	$\eta \rightarrow all$	~200
[4]	ND at VEPP-2M	1986	1.05 ÷ 1.4	$\eta \rightarrow 2\gamma$	~15
[5]	DM2 at DCI	1988	1.35 ÷ 2.4	$\eta \rightarrow 2\gamma, 3\pi, 2\pi\gamma$	228
[6]	CMD-2 at VEPP-2M	2000	1.28 ÷ 1.38	$\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$	~100
[7]	<i>BABAR</i> at PEP-II	2007	1 ÷ 3	$\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$	~ 1900
[9]	SND at VEPP-2M	2010	1.08 ÷ 1.38	$\eta \rightarrow 2\gamma$	~1600
[10]	SND at VEPP-2000	2015	1.225 ÷ 2	$\eta \rightarrow 2\gamma$	~5000
[1]	<i>BABAR</i> at PEP-II	2018	1.15 ÷ 3.5	$\eta \rightarrow 2\gamma$	~8000
[11]	SND at VEPP-2000	2018	1.075 ÷ 2	$\eta \rightarrow 3\pi^0$	~2500
[8]	<i>BABAR</i> at PEP-II	2018	1.075 ÷ 3.025	$\eta \rightarrow 3\pi^0$	2102
[14]	CMD-3 at VEPP-2000	2019	1.1 ÷ 2	$\eta \rightarrow 2\gamma$	13426

МС МОДЕЛИРОВАНИЕ

- ISR LO на угол 20-160° в с.ц.м.
- $m(\gamma+\text{hadrons}) > 8 \text{ ГэВ}$
- ISR NLO методом структурных функций в направлении начальных электрона и позитрона
- FSR с помощью пакета PHOTOS

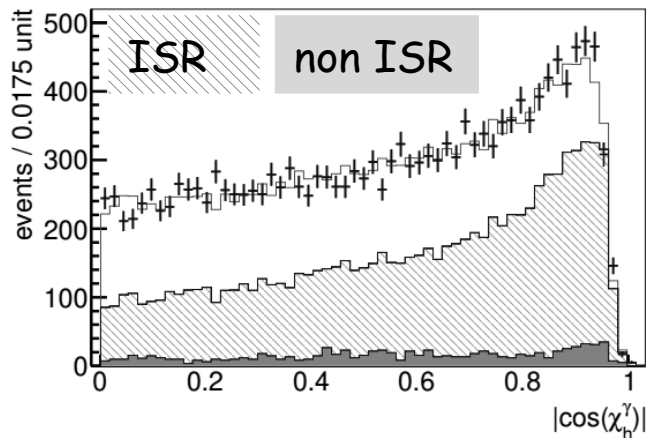
процесс	N_{gen}	σ , pb
$2\pi\eta(\gamma)$	855973	$0.172 \pm 0.015_{stat}$
$\pi^+\pi^-2\pi^0(\gamma)$	4279929	4.2 ± 0.5
$3\pi\eta(\gamma)$	426993	0.20 ± 0.02
$K^+K^-\eta(\gamma)$	426992	0.08 ± 0.01
$3\pi(\gamma)$	899996	2.6 ± 0.5
$\pi^+\pi^-(\gamma)$	1844824	21.4
$\omega 2\pi^0(\gamma)$	672357	
$K^+K^-(\gamma)$	1332161	
$K^+K^-\pi^0(\gamma)$	1310662	
$q\bar{q}$	1282347	2090
2τ	10104949	890



ОТБОР СОБЫТИЙ $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta(\gamma)$

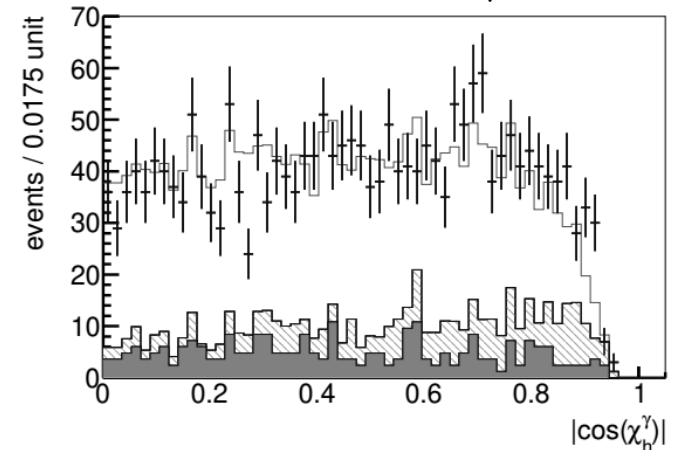
- фотон с энергией > 3 ГэВ в с.ц.м.
 - наличие как минимум двух фотонов с $E > 100$ МэВ и массой $0.4-0.65$ ГэВ
 - наличие как минимум двух центральных треков
 - вето на одновременную идентификацию треков как мюоны или каоны
 - $\chi_{4C} < 60$
 - $m_{\pi\gamma\text{ISR}} > 2$ ГэВ
 - $m_{2\pi} > 0.4$ ГэВ
- Число сигнальных событий определяется аппроксимацией спектров двухфотонной массы

Область I: $1.15 < m_{\pi+\pi-\eta} < 2$ ГэВ

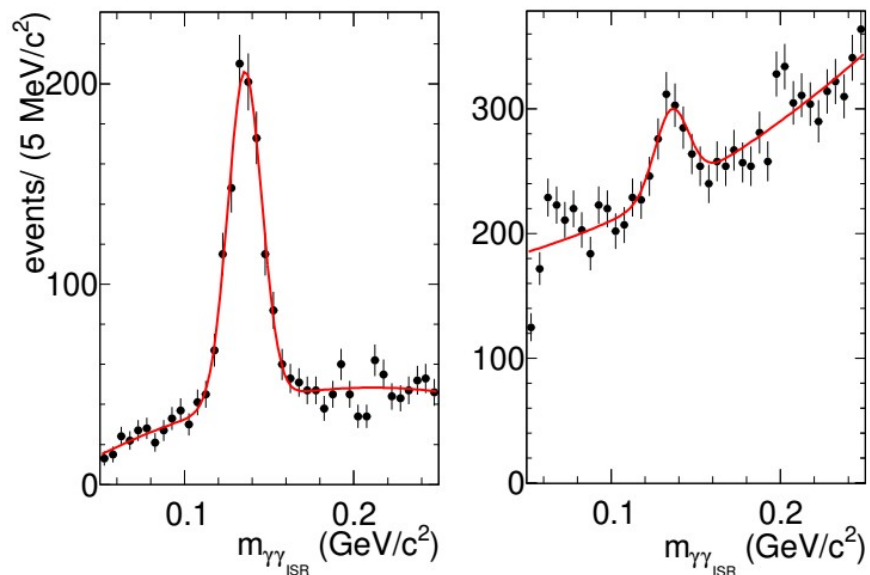


*Helicity фотонов
из кандидатов
в η -мезон*

Область II: $2 < m_{\pi+\pi-\eta} < 3.5$ ГэВ

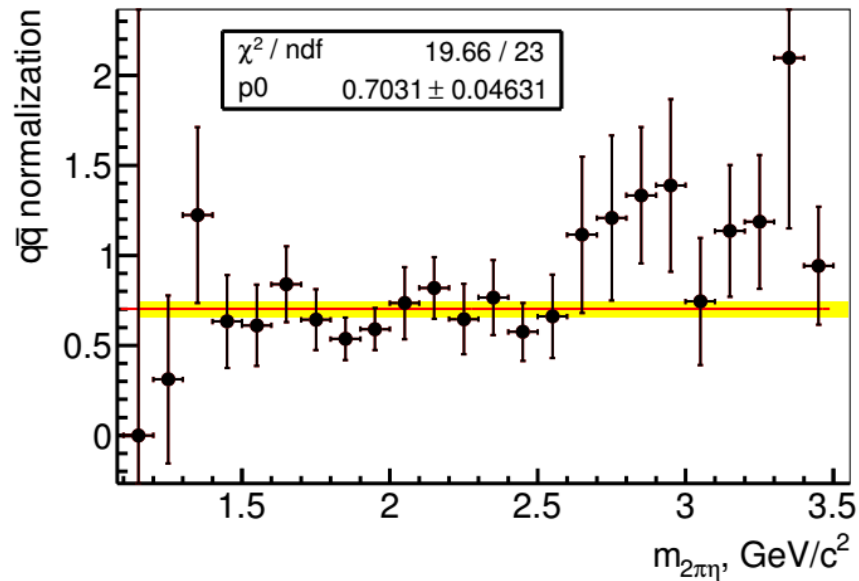


НОРМИРОВКА ФОНА $e^+e^- \rightarrow qq\bar{v}$

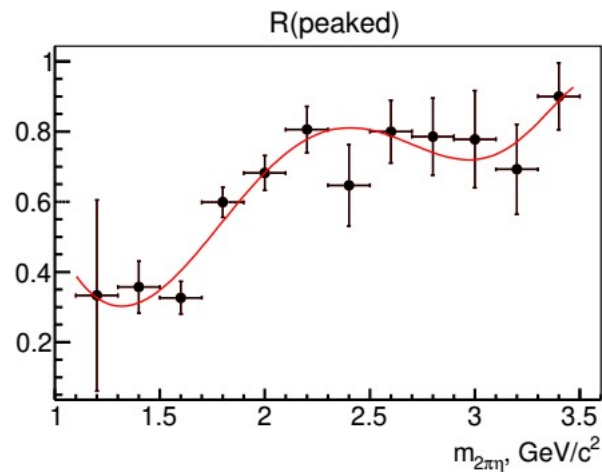


Инвариантная масса *ISR* фотона
с другими фотонами в событии

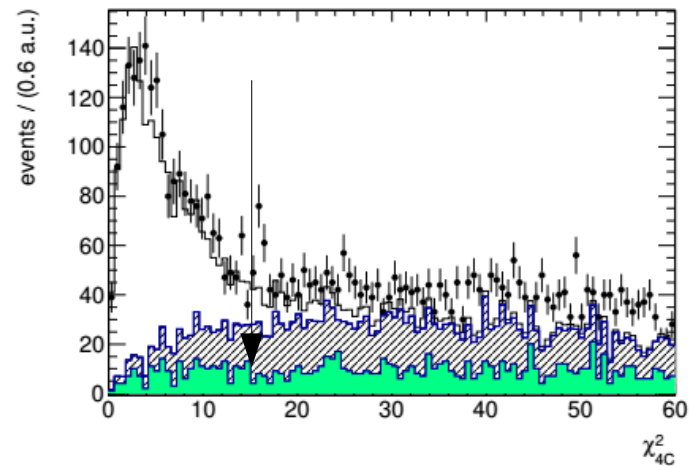
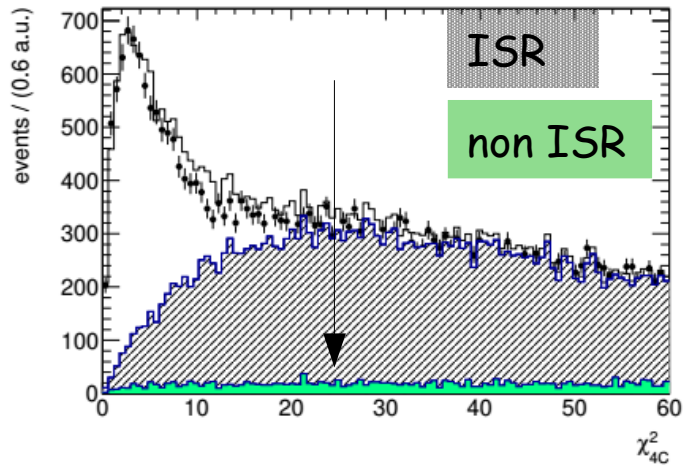
Вклад пикованного в событиях $e^+e^- \rightarrow qq\bar{v}$



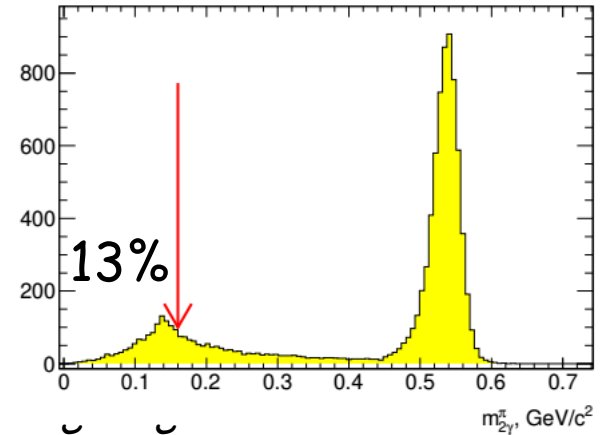
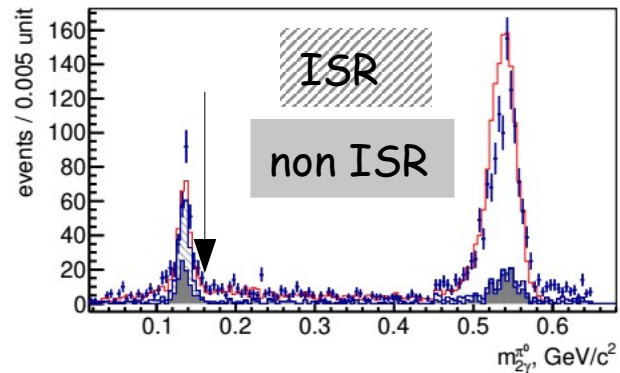
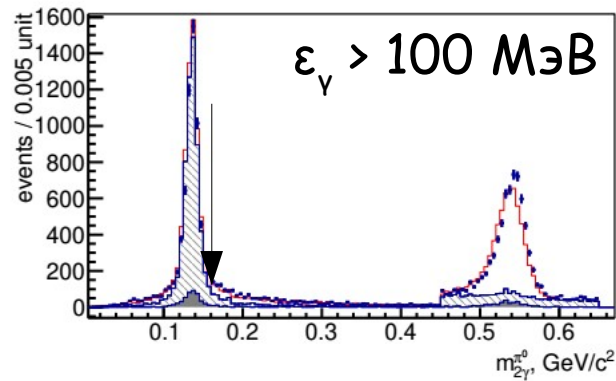
Нормировочный фактор от энергии



ОТБОР СОБЫТИЙ $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta(\gamma)$

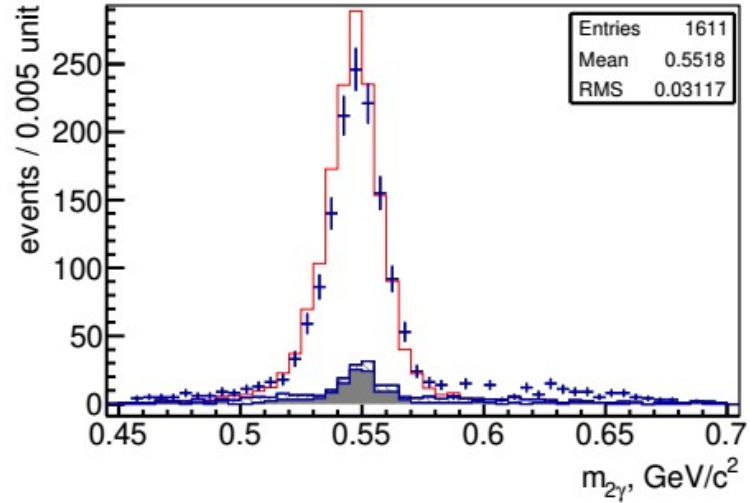
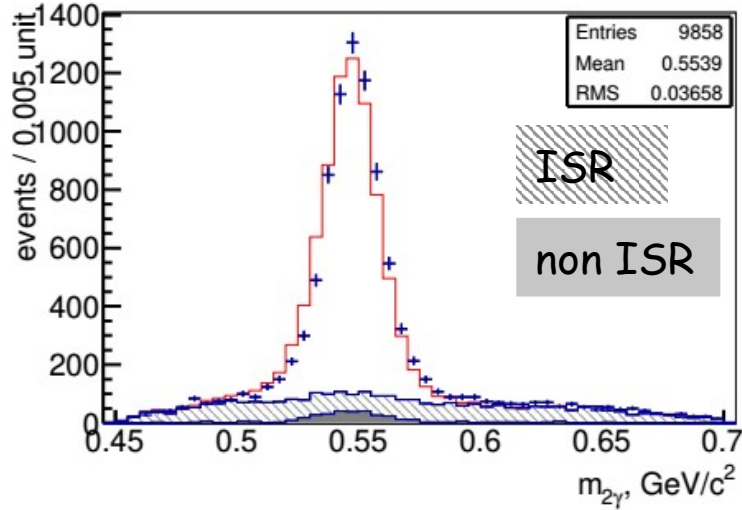


Распределение по χ_{4C}



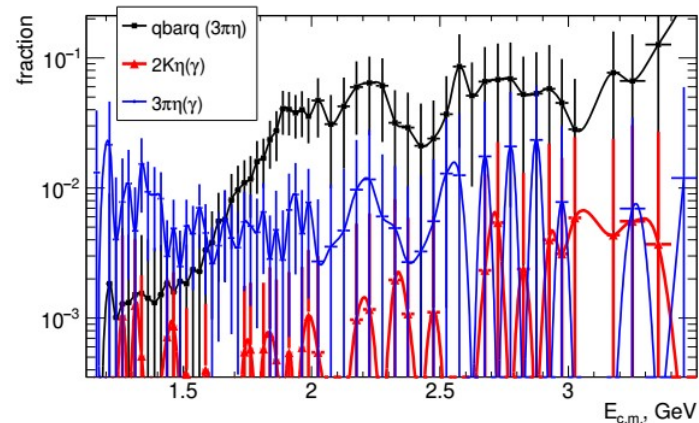
Распределение инвариантной массы ближайшей к m_{π^0}

ОТБОР СОБЫТИЙ $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta(\gamma)$

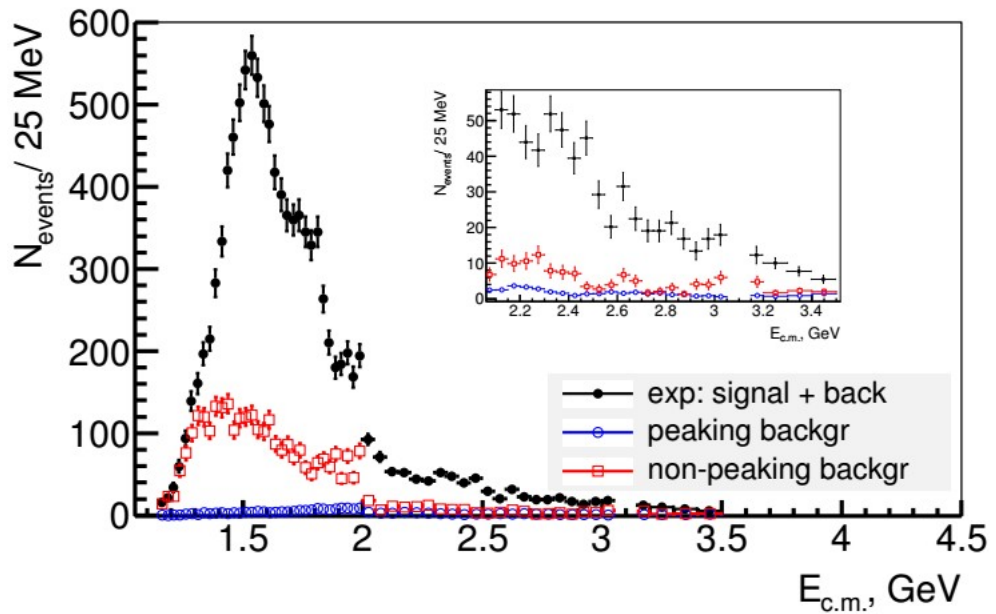
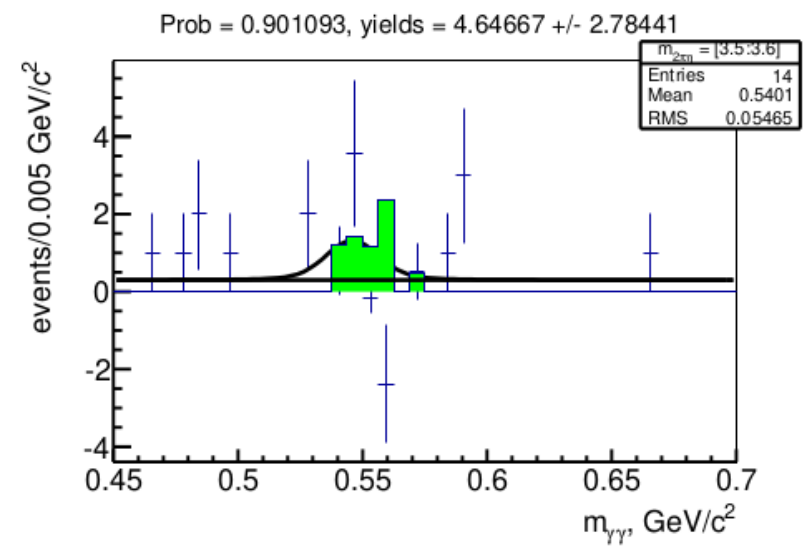
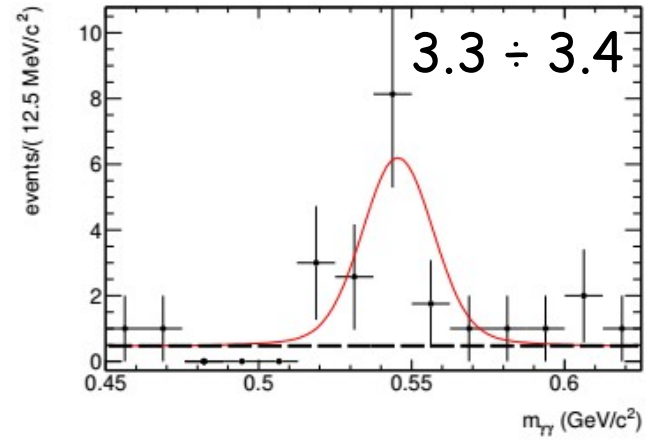
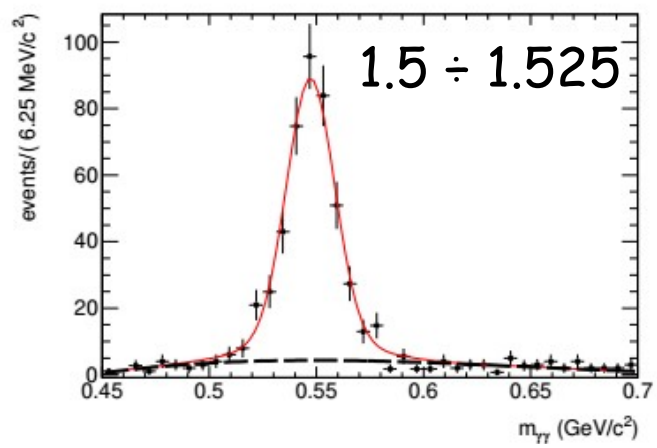
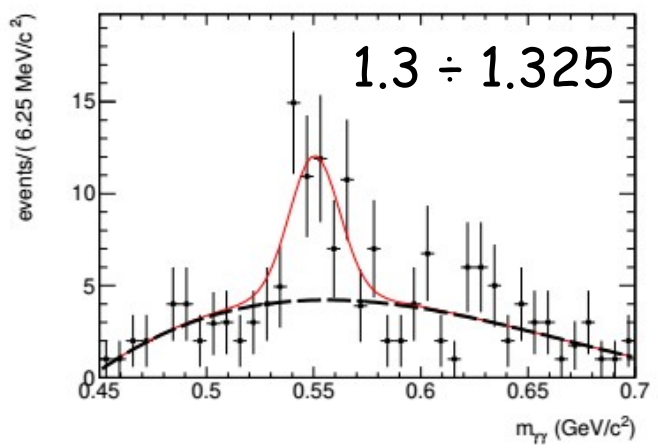


Спектр массы пары фотонов — кандидатов в η -мезон

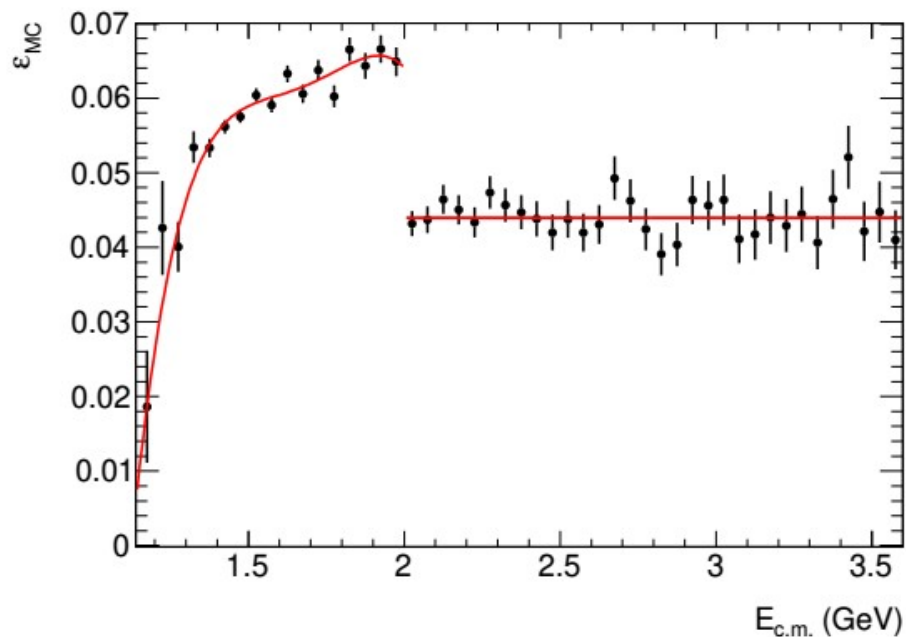
*Уровень пикованного фона
относительно числа кандидатов*



АППРОКСИМАЦИЯ ДВУХФОТОННОЙ ИНВАРИАНТНОЙ МАССЫ

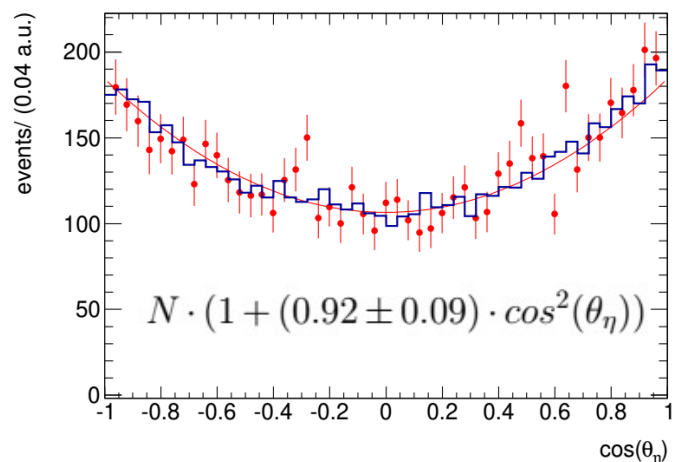


ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ

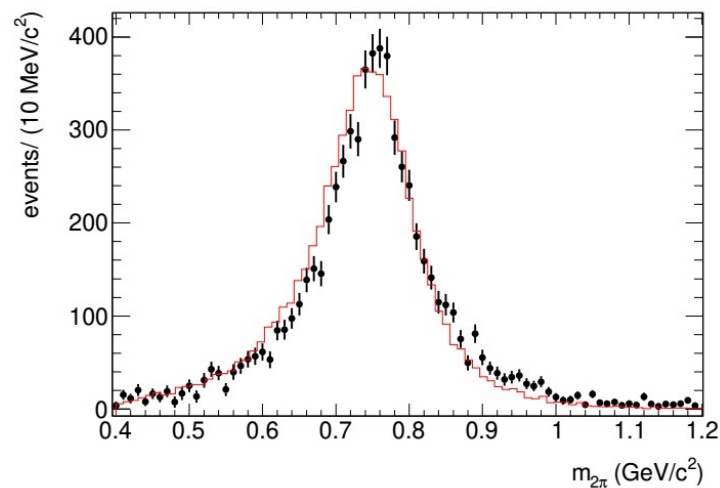


Скачок в эффективности связан с разными условиями отбора

Спектр $m_{2\pi}$ в диапазоне $1.4 < \sqrt{s} < 2$ ГэВ

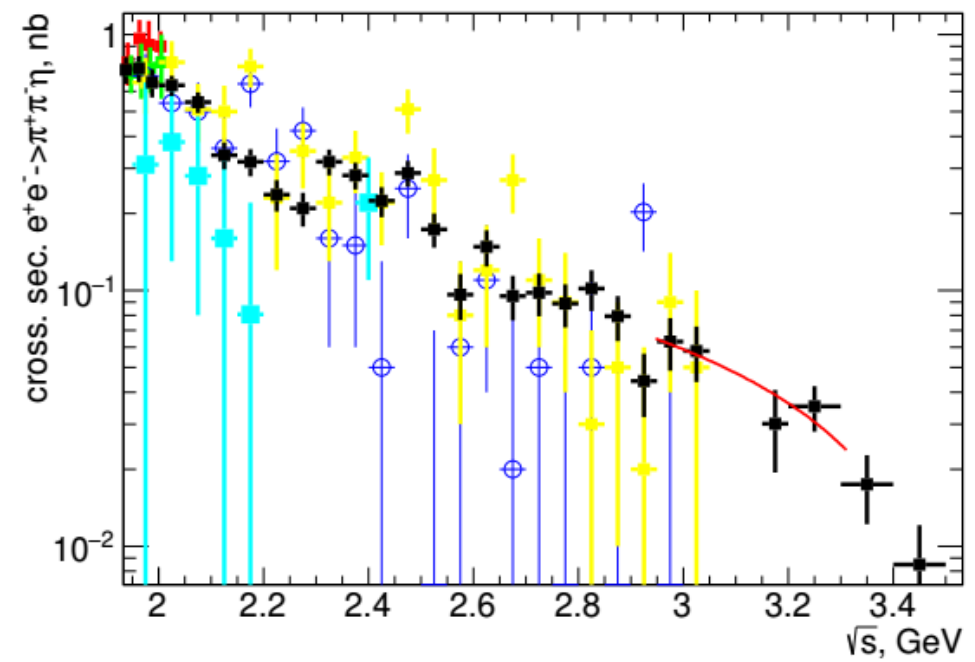
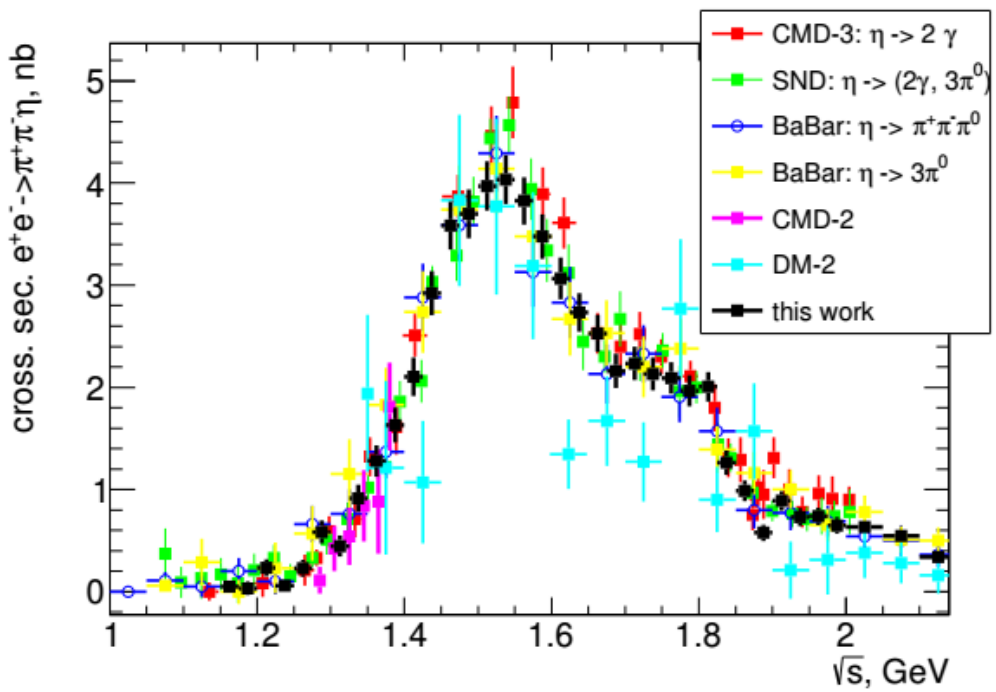


Спектр $\cos(\theta_\eta)$ в диапазоне $1.4 < \sqrt{s} < 2$ ГэВ

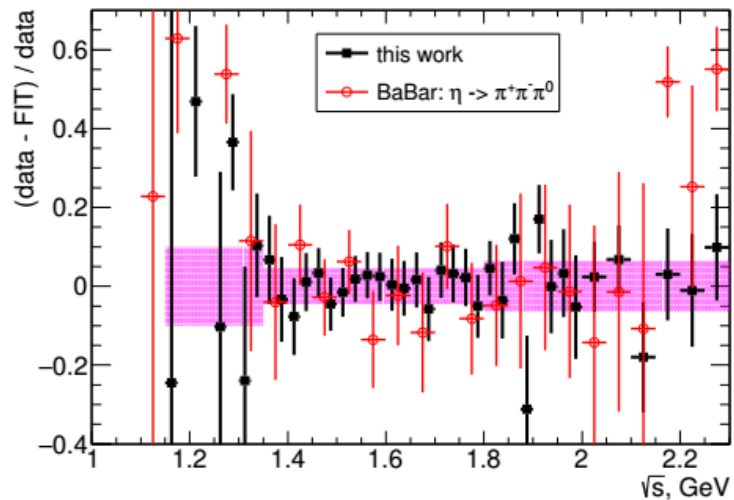
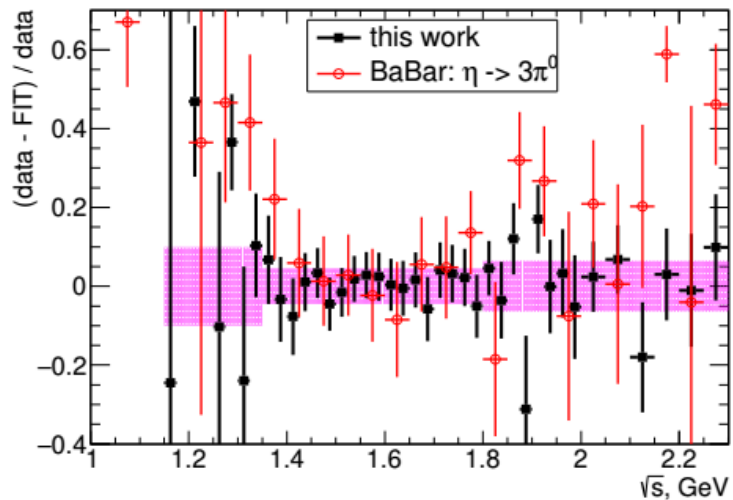
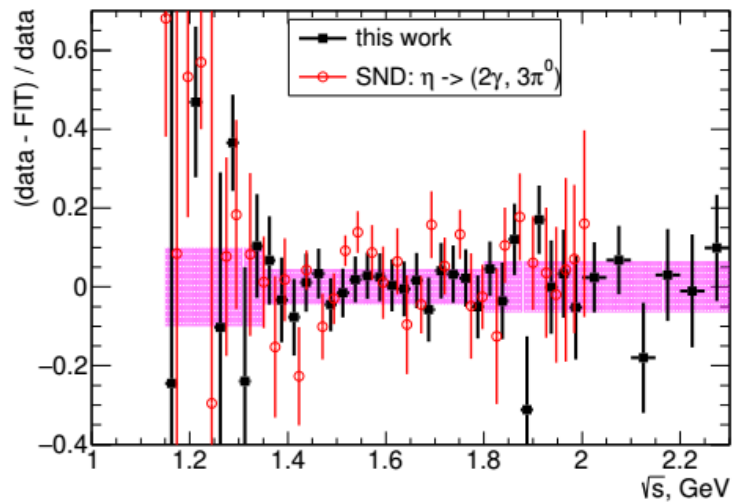
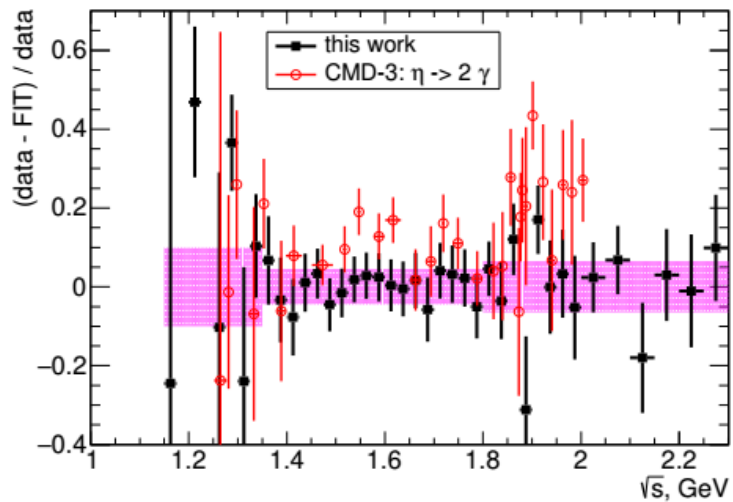


СЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$

$$\sigma_{\pi^+\pi^-\eta}(m) = \frac{(dN/dm)_{corr}}{dL/dm \cdot \varepsilon(m) \cdot R}$$



СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

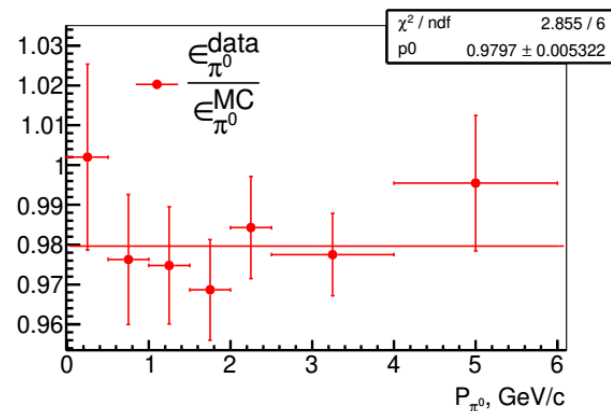


ПОПРАВКИ К ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ И СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ

Источник	Поправка, %	Систематическая ошибка, %
Условие отбора		2.5
Вычитание фона		
$m_{\pi^+\pi^-\eta} < 1.35$	9	
$1.35 < m_{\pi^+\pi^-\eta} < 1.80$	2	
$1.80 < m_{\pi^+\pi^-\eta} < 2.50$	5	
$2.50 < m_{\pi^+\pi^-\eta} < 3.10$	10.5	
$3.10 < m_{\pi^+\pi^-\eta} < 3.50$	11	
реконструкция η -мезона	-2	1.0
реконструкция треков	-1.1	1.0
реконструкция ISR фотона	-1.1	1.0
триггеры и фильтры	-1.5	1.6
радиационная поправка		1.0
светимость		1.0
Итого		
$m_{\pi^+\pi^-\eta} < 1.35$	-5.7	10
$1.35 < m_{\pi^+\pi^-\eta} < 1.80$	-5.7	4.5
$1.80 < m_{\pi^+\pi^-\eta} < 2.50$	-5.7	6.5
$2.50 < m_{\pi^+\pi^-\eta} < 3.10$	-5.7	11
$3.10 < m_{\pi^+\pi^-\eta} < 3.50$	-5.7	12

Условие отбора	систем. ошибка, %
$\chi_{4C}^2 < 25(15)$	1.5
radbhabha == 0	0.6
kaon and muon veto	0.4
Энергия фотонов из распада η -мезона $> 0.1(0.2)$ ГэВ	0.6
$m_{2\gamma}^{\pi^0} > 0.16$ ГэВ/ c^2	1.5
Квадратичная сумма	2.5

$$\epsilon_{reg} = \epsilon_{MC} \prod_i (1 + \delta_i)$$

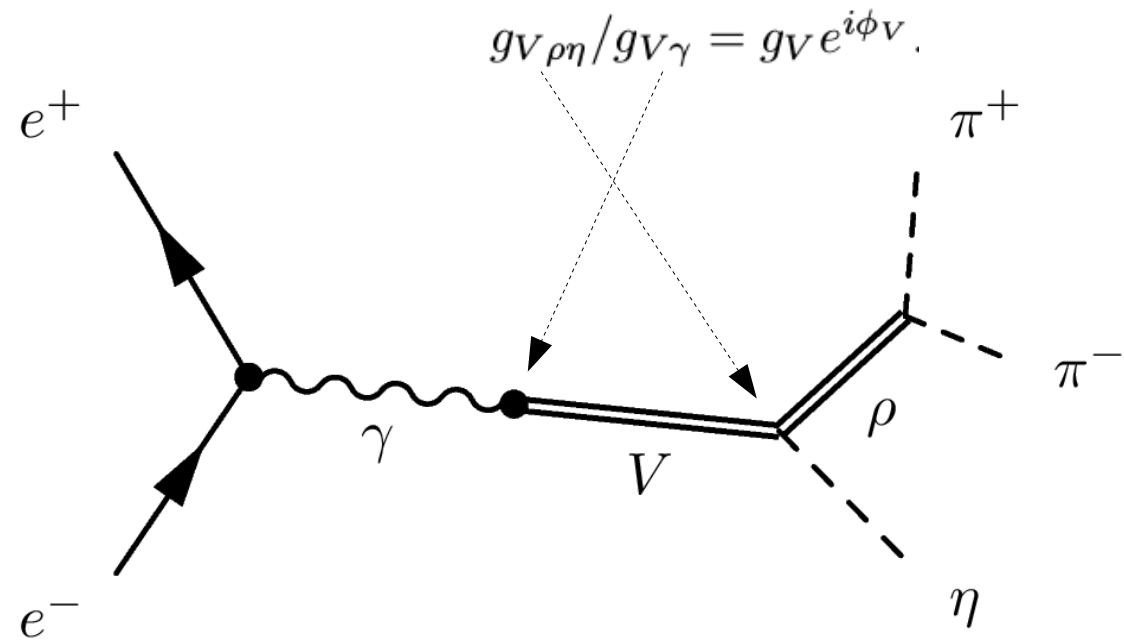


Поправка к реконструкции π^0

АППРОКСИМАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГИИ

$$\sigma^{model}(s) = \frac{4\alpha^2}{3} \frac{1}{s\sqrt{s}} |F(s)|^2 G(s), \quad G(s) = \int_{4m_\pi^2}^{(\sqrt{s}-m_\eta)^2} dq^2 \frac{\sqrt{q^2} \Gamma_\rho(q^2) p_\eta^3(s, q^2)}{(q^2 - m_\rho^2)^2 + (\sqrt{q^2} \Gamma_\rho(q^2))^2},$$

$$p_\eta^2 = \frac{(s - m_\eta^2 - q^2)^2 - 4m_\eta^2 q^2}{4s}, \quad \Gamma_\rho(q^2) = \Gamma_\rho(m_\rho^2) \frac{m_\rho^2}{q^2} \left(\frac{p_\pi^2(q^2)}{p_\pi^2(m_\rho^2)} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad p_\pi^2(q^2) = q^2/4 - m_\pi^2$$



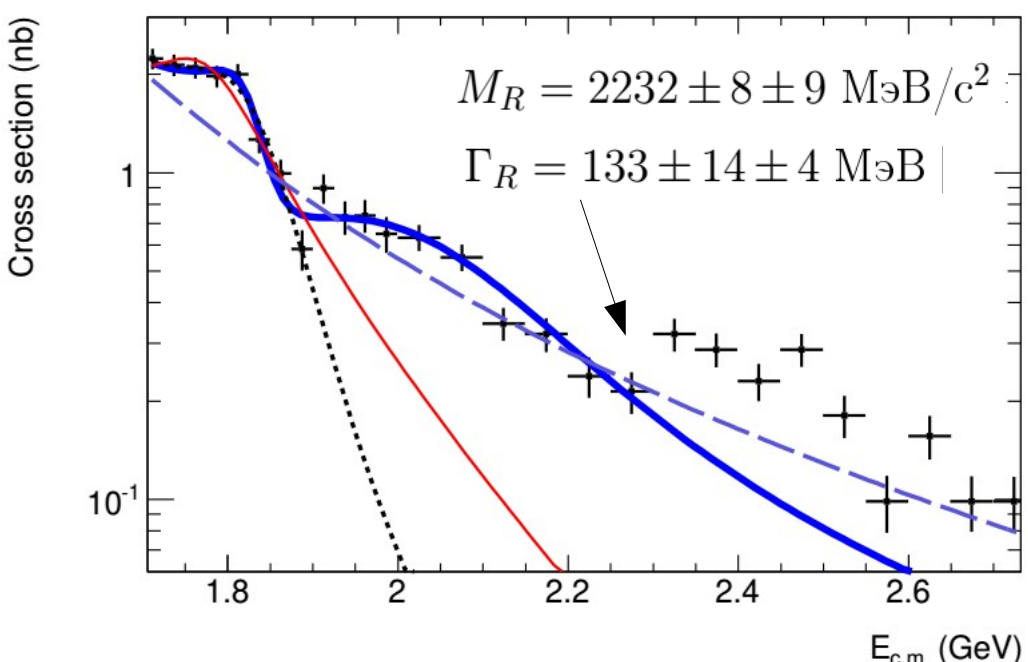
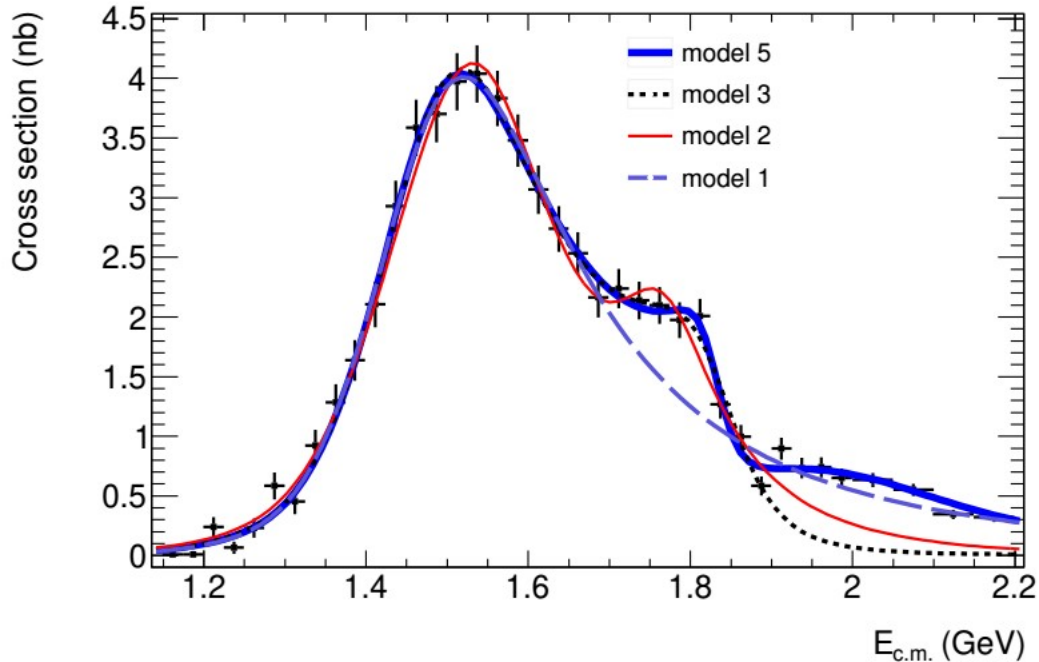
$$F(s) = \sum_V \frac{m_V^2 g_V e^{i\phi_V}}{s - m_V^2 + i\sqrt{s}\Gamma_V(s)}$$

M_V, Γ_V, g_V -
свободные параметры

АППРОКСИМАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГИИ

Параметр	Модели №1	Модели №2	Модели №3	Модели №4	Модели №5	Модели №6
$g_{\rho(770)}, \text{ GeV}^{-1}$	1.1 ± 0.3	2.3 ± 0.3	1.8 ± 0.3	1.4 ± 0.3	1.7 ± 0.3	1.8 ± 0.3
$g_{\rho(1450)}, \text{ GeV}^{-1}$	0.49 ± 0.02	0.36 ± 0.05	0.44 ± 0.02	0.44 ± 0.02	0.46 ± 0.03	0.47 ± 0.03
$g_{\rho(1700)}, \text{ GeV}^{-1}$	–	0.044 ± 0.019	0.080 ± 0.012	0.025 ± 0.017	0.016 ± 0.007	0.016 ± 0.007
$g_{\rho'''}, \text{ GeV}^{-1}$	–	–	–	–	0.094 ± 0.016	0.10 ± 0.02
$m_{\rho(1450)}, \text{ ГэВ}/c^2$	1.487 ± 0.016	1.54 ± 0.01	1.50 ± 0.01	1.49 ± 0.01	1.49 ± 0.01	1.49 ± 0.01
$m_{\rho(1700)}, \text{ ГэВ}/c^2$	–	1.76 ± 0.01	1.83 ± 0.01	1.82 ± 0.01	1.83 ± 0.01	1.827 ± 0.006
$m_{\rho'''}, \text{ ГэВ}/c^2$	–	–	–	–	2.03 ± 0.04	2.00 ± 0.04
$\Gamma_{\rho(1450)}, \text{ GeV}$	0.33 ± 0.02	0.31 ± 0.03	0.28 ± 0.02	0.31 ± 0.02	0.29 ± 0.02	0.29 ± 0.02
$\Gamma_{\rho(1700)}, \text{ GeV}$	–	0.16 ± 0.04	0.17 ± 0.02	0.12 ± 0.04	0.08 ± 0.02	0.08 ± 0.02
$\Gamma_{\rho'''}, \text{ GeV}$	–	–	–	–	0.42 ± 0.09	0.45 ± 0.10
ϕ_V	0, π	0, π , π	0, π , 0	0, π , (-1.1 ± 0.4)	0, π , 0, 0	0, π , 0, 0
χ^2/ndf	14/16	35/21	19/21	18/20	28/26	48/50

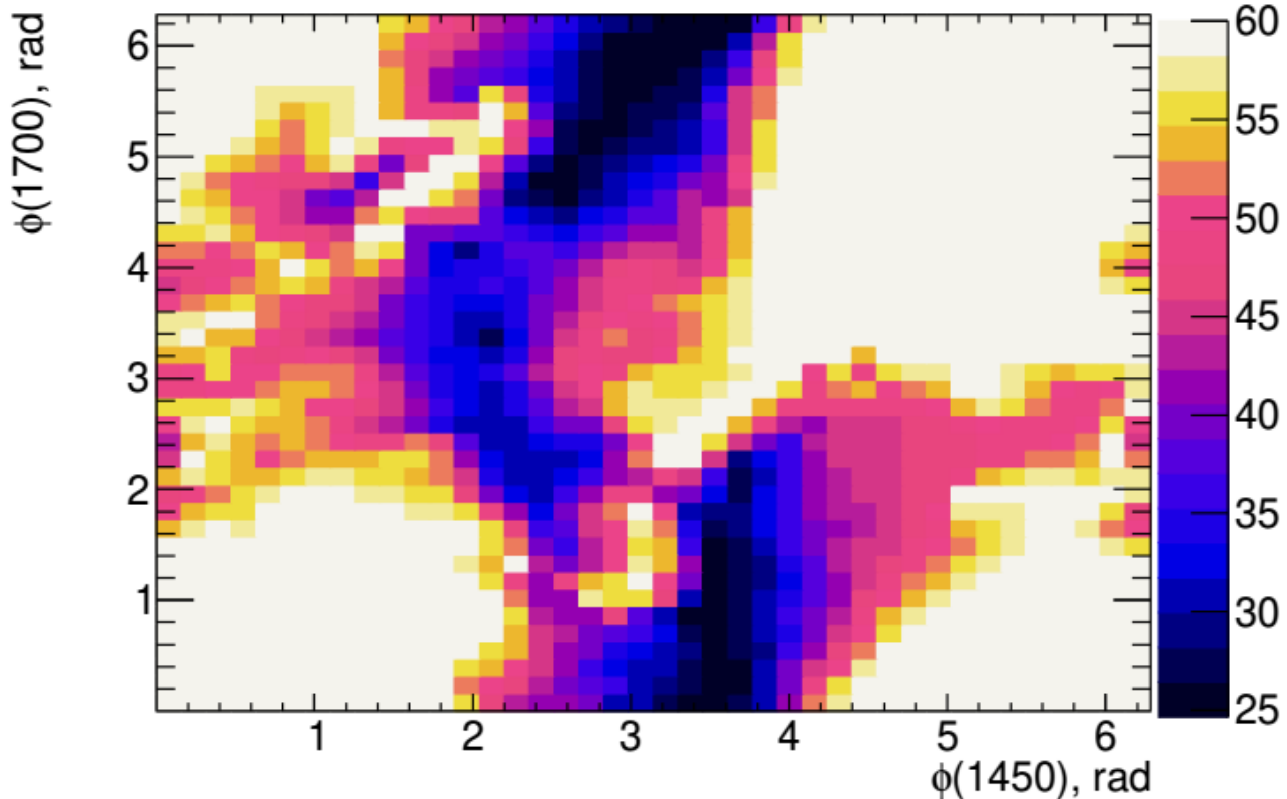
АППРОКСИМАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГИИ



$$\Gamma(\rho(1450) \rightarrow e^+e^-) \mathcal{B}(\rho(1450) \rightarrow \eta\pi^+\pi^-) = 210 \pm 24_{stat} \pm 10_{syst} \text{ eV}$$

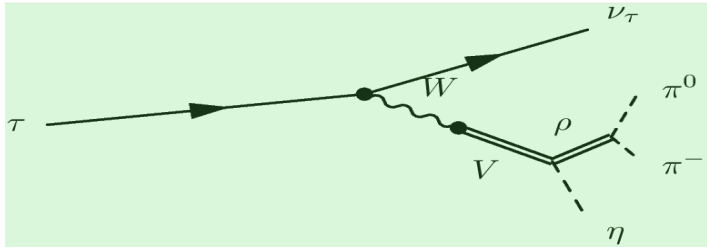
$$\Gamma(\rho(1700) \rightarrow e^+e^-) \mathcal{B}(\rho(1700) \rightarrow \eta\pi^+\pi^-) = 84 \pm 26_{stat} \pm 4_{syst} \text{ eV}$$

АППРОКСИМАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГИИ

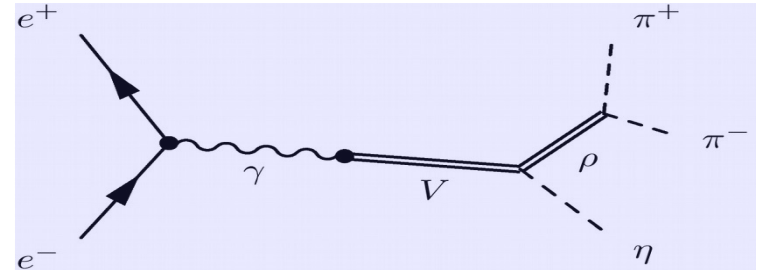


Значения χ^2 как функция фиксированных фаз $\phi_{\rho(1450)}$ и $\phi_{\rho(1700)}$ для модели №5

CVC TEST



$$M_{\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \eta \nu_\tau} \sim \langle \rho^- | \bar{d} \gamma_\mu u | 0 \rangle$$



$$M_{e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta} \sim \langle \rho^0 | \frac{\bar{u} \gamma_\mu u - \bar{d} \gamma_\mu d}{\sqrt{2}} | 0 \rangle$$

$$\frac{B(\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \eta \nu_\tau)}{B(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)} = \int_{(2m_\pi + m_\eta)^2}^{m_\tau^2} dq^2 \sigma_{e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta}^{I=1}(q^2) \frac{3|V_{ud}|^2 S_{EW}}{2\pi\alpha^2} \frac{q^2}{m_\tau^2} \left(1 - \frac{q^2}{m_\tau^2}\right)^2 \left(1 + 2\frac{q^2}{m_\tau^2}\right)$$

$$\delta\left(\frac{B(\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \eta \nu_\tau)}{B(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)}\right)_{stat} = \sqrt{\sum_i^{q < m_\tau} [\delta q_i^2 \delta\sigma(q_i) p(q_i)]^2}$$

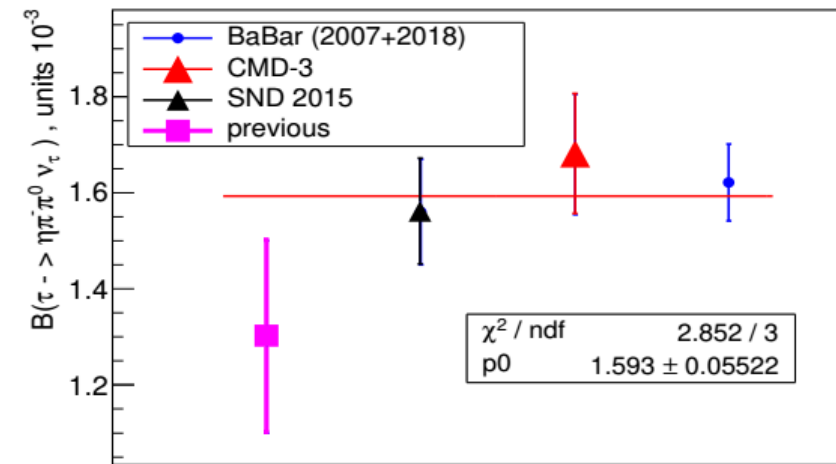
$$\mathbf{B^{direct Belle 2009}(\tau \rightarrow \pi \pi \eta \nu_\tau) = 0.135 \pm 0.003 \pm 0.007 \%}$$

$$\mathbf{B^{CVC}(\tau \rightarrow \pi \pi \eta \nu_\tau) = 0.1661 \pm 0.0035_{stat} \pm 0.0115_{syst} \pm 0.0024_{model} \% = \underline{0.166 \pm 0.012 \%}}$$

► Частично разница может быть объяснена вкладом вакуумной поляризации в фотонный пропагатор $|1 + \Pi|^2 \sim 1.035$.

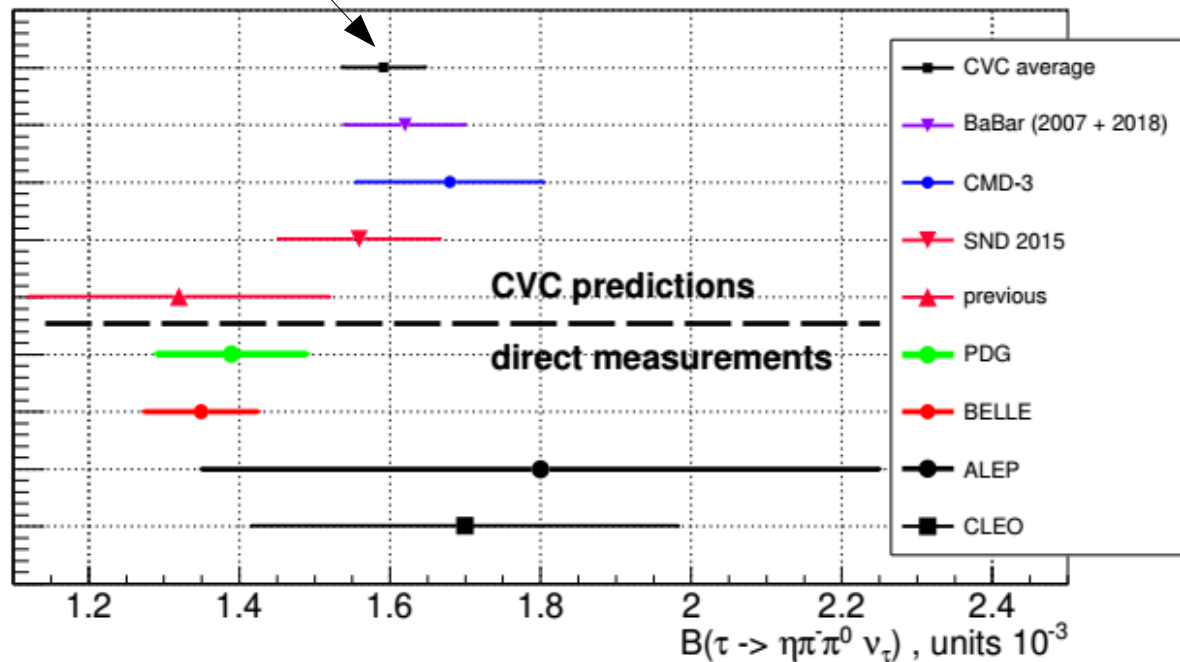
► Для надежного наблюдения нарушения изоспиновой симметрии нужно уменьшать систематические ошибки, которые доминируют.

CVC ТЕСТ



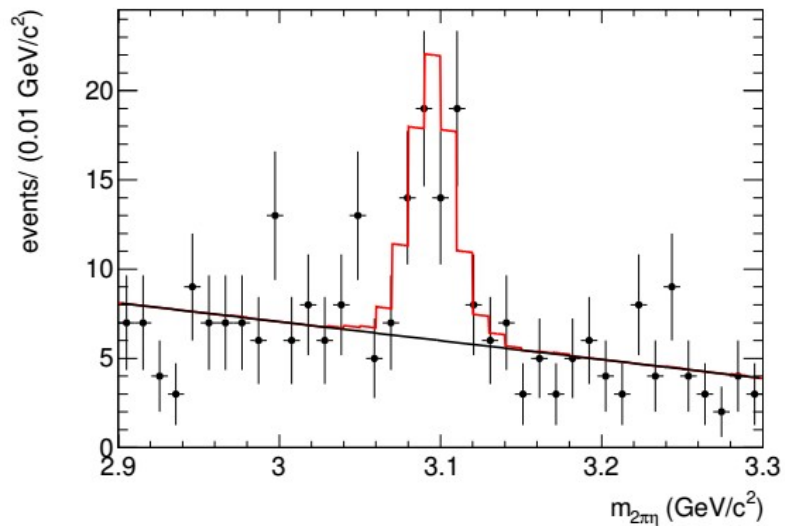
Сравнение различных CVC предсказаний

На 2.7σ больше измерения BELLE



CVC vs прямые измерения

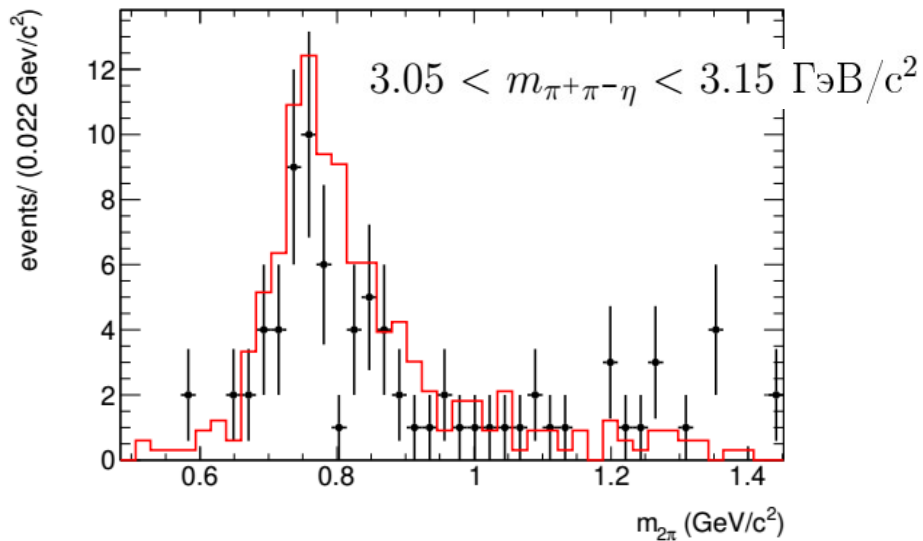
$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta(\gamma)$. ОБЛАСТЬ J/ψ .



$$N_{\text{signal}} = 49 \pm 9$$

$$\Gamma_{J/\psi \rightarrow e^+e^-} \mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta} = \frac{N_{J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta} \cdot m_{J/\psi}^2}{6\pi^2 \cdot dL/dE \cdot \varepsilon(m_{J/\psi})} = (2.34 \pm 0.43_{\text{stat}} \pm 0.16_{\text{syst}}) \text{ eV.}$$

$$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta} = (0.042 \pm 0.008)\%$$



PDG:

$$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \rho\eta} = (0.019 \pm 0.002)\%$$

$$\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \omega\eta} = (0.174 \pm 0.020)\%$$

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Выделено около 50 событий двухфотонного процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \eta'$, где конечные фермионы рассеяны на большой угол и зарегистрированы. Впервые измерен переходной формфактор псевдоскалярного мезона в дважды виртуальной области $2 < Q_1^2, Q_2^2 < 60 \text{ ГэВ}^2$.
2. Показано, что предсказания на основе факторизационной теоремы в теории возмущений КХД согласуются с полученными экспериментальными значениями, в то время как модель векторной доминантности недооценивает величину формфактора.
3. Выполнено измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \eta'$:
 $\sigma(2 < Q_1^2, Q_2^2 < 60) \text{ ГэВ}^2 = (11.4^{+2.8}_{-2.4 \text{ stat}} \pm 1.4_{\text{ syst}} \pm 6.5_{\text{ model}}) \text{ фб}$.
4. Измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ в диапазоне энергий $E_{\text{c.m.}} = 1.15\text{-}3.5 \text{ ГэВ}$. В диапазоне энергии $1.5\text{-}2.4 \text{ ГэВ}$ на фоне спада сечения наблюдается интерференция вкладов нескольких промежуточных резонансов. В области энергий $E_{\text{c.m.}} = 3.0\text{-}3.5 \text{ ГэВ}$ сечение измерено впервые.
5. Зависимость сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ от энергии в диапазоне $E_{\text{c.m.}} = 1.2\text{-}2.2 \text{ ГэВ}$ аппроксимирована в рамках МВД четырьмя изовекторным резонансами. Получены параметры этих резонансов.
6. Получено значение CVC предсказания $B(\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \eta \nu_\tau) = (0.162 \pm 0.009) \%$.
7. Измерена величина $\Gamma(J/\psi \rightarrow e^+e^-) B(J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta) = (2.34 \pm 0.46) \text{ эВ}$. Определена вероятность распада $B(J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta) = (0.042 \pm 0.008) \%$.

Публикации по теме диссертации:

1. J.P. Lees ..., E.A.Kozyrev et al. (BABAR Collaboration) Study of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ using initial state radiation // Phys. Rev. D **97** , 052007 (2018).
2. J.P. Lees ..., E.A.Kozyrev et al. (BABAR Collaboration) Measurement of the $\gamma^*\gamma^* \rightarrow \eta'$ transition formfactor // Phys. Rev. D **98** , 112002 (2018).

Конференционные труды по теме диссертации:

E. Kozyrev et al. (BABAR Collaboration) Recent BaBar results in light hadron spectroscopy // EPJ Web Conf. **212**, 04006 (2019).

(The 12th International Workshop on e+e- Collisions from Phi to Psi (PhiPsi 2019), Novosibirsk)

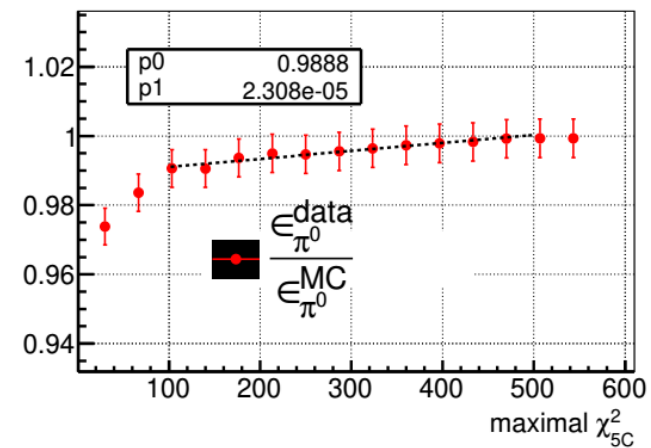
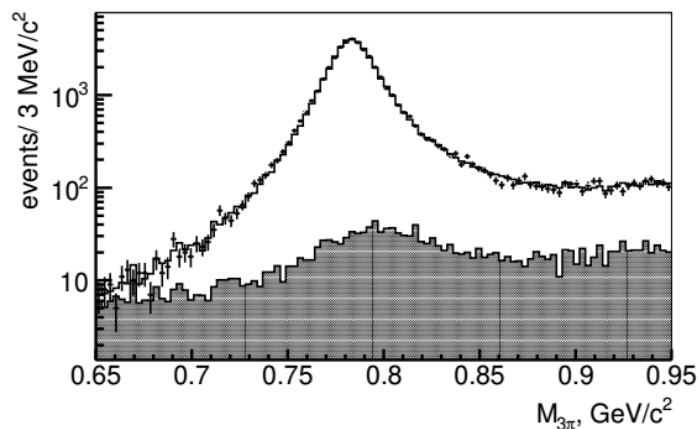
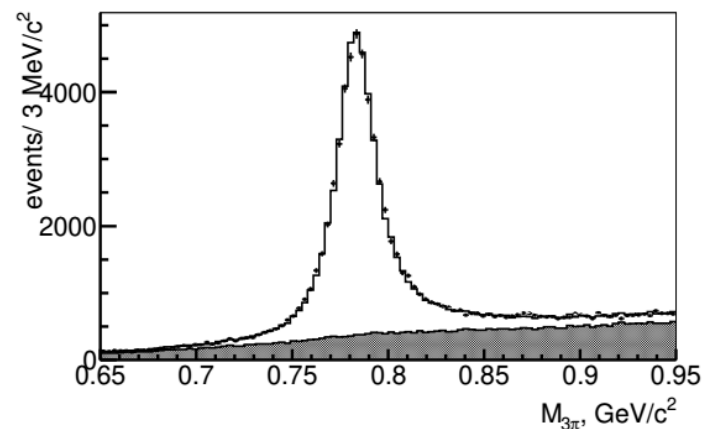
E. Kozyrev et al. (BABAR Collaboration) Study of $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta'$ in the double-tag mode at BABAR // PoS ICHEP2018 **340**, 552 (2019).

(The 39th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2018), Seoul, Korea)

Спасибо за внимание

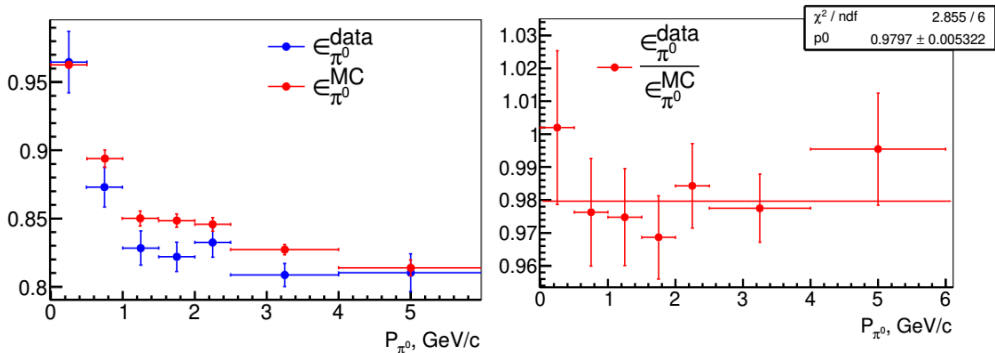
Дополнительные слайды

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВКИ К РЕКОНСТРУКЦИИ π^0

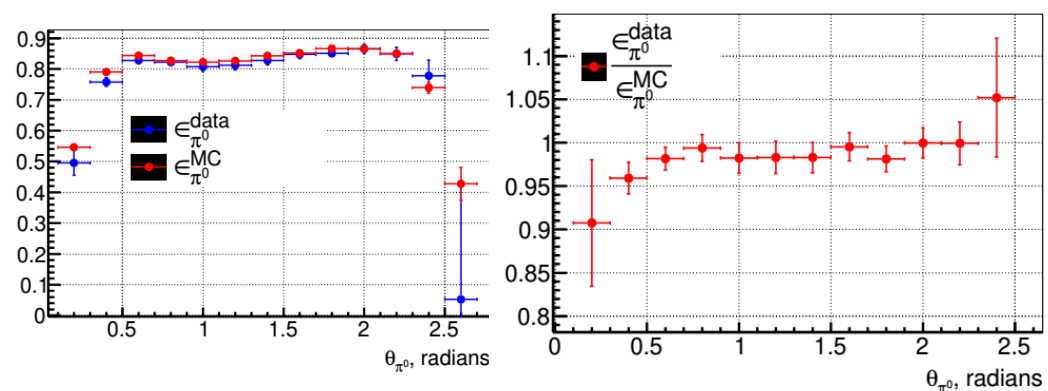


Спектр трехпионной инвариантной массы

Поправка vs χ^2_{5C}



Поправка в зависимости от импульса



Поправка в зависимости от полярного угла

<http://inspirehep.net/record/1691222/?ln=ru>

Информация

Ссылки (30)

Цитирования: (18)

Файлы

Графики

[Measurement of the \$\gamma^* \gamma^* \rightarrow \eta'\$ transition form factor](#) - BaBar Collaboration (Lees, J.P. *et al.*)

Phys.Rev. D98 (2018) no.11, 112002 arXiv:1808.08038 [hep-ex] BABAR-PUB-18/006, SLAC-PUB-17318

Ссылаются на: 18 записи

(17) [\$\gamma^* \gamma \rightarrow \eta, \eta'\$ transition form factors](#) - Ding, Minghui *et al.* Phys.Rev. D99 (2019) no.1, 014014 arXiv:1810.12313 [nucl-th]

(13) [The hadronic light-by-light contribution to the muon's anomalous magnetic moment](#) - Danilkin, Igor *et al.*

Prog.Part.Nucl.Phys. 107 (2019) 20-68 arXiv:1901.10346 [hep-ph]

(12) [Lattice calculation of the pion transition form factor with \$N_f = 2 + 1\$ Wilson quarks](#) - Gérardin, Antoine *et al.* Phys.Rev. D100 (2019) no.3, 034520 arXiv:1903.09471 [hep-lat] MITP-19-014

(7) [Short-distance constraints on hadronic light-by-light scattering in the anomalous magnetic moment of the muon](#) - Colangelo, Gilberto *et al.* arXiv:1910.11881 [hep-ph] INT-PUB-19-050

(6) [Longitudinal short-distance constraints for the hadronic light-by-light contribution to \$\(g - 2\)_\mu\$ with large- \$N_c\$ Regge models](#) - Colangelo, Gilberto *et al.* arXiv:1910.13432 [hep-ph] INT-PUB-19-051

[ещё](#)

..из которых самоцитирование: 2 записей

[Информация](#)

[Ссылки \(41\)](#)

[Цитирования: \(13\)](#)

[Файлы](#)

[Графики](#)

[Study of the process \$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta\$ using initial state radiation](#) - BaBar Collaboration (Lees, J.P. *et al.*) Phys.Rev. D97 (2018) 052007 arXiv:1801.02960 [hep-ex] BABAR-PUB-17-003, SLAC-PUB-17204

Ссылаются на: 13 записи

(195) [Muon \$g - 2\$ and \$\alpha\(M_Z^2\)\$: a new data-based analysis](#) - Keshavarzi, Alexander *et al.* Phys.Rev. D97 (2018) no.11, 114025 arXiv:1802.02995 [hep-ph] LTH 1153, KEK-TH-2035, LTH-1153, YITP-18-09, LTH 1153; KEK-TH-2035; YITP-18-09

(21) [A new evaluation of the hadronic vacuum polarisation contributions to the muon anomalous magnetic moment and to \$\alpha\(m_Z^2\)\$](#) - Davier, M. *et al.* arXiv:1908.00921 [hep-ph]

(9) [Study of the reactions \$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\pi^0\gamma\$ and \$\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta\gamma\$ at center-of-mass energies from threshold to 4.35 GeV using initial-state radiation](#) - BaBar Collaboration (Lees, J.P. *et al.*) Phys.Rev. D98 (2018) no.11, 112015 arXiv:1810.11962 [hep-ex] SLAC-PUB-17344

(2) [Common explanation of the behavior of some \$e^+e^-\$ annihilation processes around \$\sqrt{s} = 1.9\$ GeV](#) - Lichard, Peter Phys.Rev. D98 (2018) no.11, 113011 arXiv:1810.07788 [hep-ph]

(2) [Measurement of the \$e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-\$ cross section with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 collider](#) - Griбанов, S.S. *et al.* arXiv:1907.08002 [hep-ex]

[ещё](#)

..из которых самоцитирование: 6 записей

2019 Review of Particle Physics.

M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018) and 2019 update.

$J/\psi(1S) \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$

INSPIRE search

$\Gamma(J/\psi(1S) \rightarrow \eta\pi^+\pi^-) \times \Gamma(J/\psi(1S) \rightarrow e^+e^-) / \Gamma_{\text{total}}$

$\Gamma_{104}\Gamma_5/\Gamma$

VALUE (eV)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
2.3 ± 0.4	OUR AVERAGE			
2.34 ±0.43 ±0.16	49	LEES	2018	BABR $e^+ e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^- \gamma$
2.23 ±0.97 ±0.03	9	¹ AUBERT	2007AU	BABR 10.6 $e^+ e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^- \gamma$

¹ AUBERT 2007AU reports $[\Gamma(J/\psi(1S) \rightarrow \eta\pi^+\pi^-) \times \Gamma(J/\psi(1S) \rightarrow e^+e^-) / \Gamma_{\text{total}}] \times [B(\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)] = 0.51 \pm 0.22 \pm 0.03$ eV which we divide by our best value $B(\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = 0.2292 \pm 0.0028$. Our first error is their experiment's error and our second error is the systematic error from using our best value.

References:

LEES 2018 PR D97 052007 Study of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ using initial state radiation

AUBERT 2007AU PR D76 092005 The $e^+ e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-)\pi^0, 2(\pi^+\pi^-)\eta, K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^0$ and $K^+K^-\pi^+\pi^-\eta$ Cross Sections Measured with Initial-State Radiation

2019 Review of Particle Physics.

M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018) and 2019 update.

$J/\psi(1S) \rightarrow \eta\rho$

INSPIRE search

▼ $\Gamma(J/\psi(1S) \rightarrow \eta\rho) / \Gamma_{\text{total}}$

Γ_{105} / Γ

VALUE (10^{-3})	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT	
0.193 ± 0.023	OUR AVERAGE				
0.194 ± 0.017 ± 0.029	299	JOUSSET	1990	DM2	$J/\psi \rightarrow \text{hadrons}$
0.193 ± 0.013 ± 0.029		COFFMAN	1988	MRK3	$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$

References:

JOUSSET	1990	PR D41 1389	The $J/\psi \rightarrow \text{vector} + \text{pseudoscalar}$ Decays and the η, η' Quark Content
COFFMAN	1988	PR D38 2695	Measurement of J/ψ Decays into a Vector and a Pseudoscalar Meson

2019 Review of Particle Physics.

M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018) and 2019 update.

$J/\psi(1S) \rightarrow \omega\eta$

INSPIRE search

▼ $\Gamma(J/\psi(1S) \rightarrow \omega\eta)/\Gamma_{\text{total}}$

Γ_{70}/Γ

VALUE (10^{-3})	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
1.74 ± 0.20	OUR AVERAGE	Error includes scale factor of 1.6.		
2.352 ± 0.273	5k	¹ ABLIKIM	2006F	BES2 $J/\psi \rightarrow \omega\eta$
1.44 ± 0.40 ± 0.14	13	² AUBERT	2006D	BABR $10.6 e^+ e^- \rightarrow \omega\eta\gamma$
1.43 ± 0.10 ± 0.21	378	JOUSSET	1990	DM2 $J/\psi \rightarrow \text{hadrons}$
1.71 ± 0.08 ± 0.20		COFFMAN	1988	MRK3 $e^+ e^- \rightarrow 3 \pi\eta$

¹ Using $B(\eta \rightarrow 2\gamma) = (39.43 \pm 0.26)\%$, $B(\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = 22.6 \pm 0.4\%$, $B(\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma) = 4.68 \pm 0.11\%$, and $B(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = (89.1 \pm 0.7)\%$.

² Using $\Gamma(J/\psi \rightarrow e^+e^-) = 5.52 \pm 0.14 \pm 0.04$ keV.

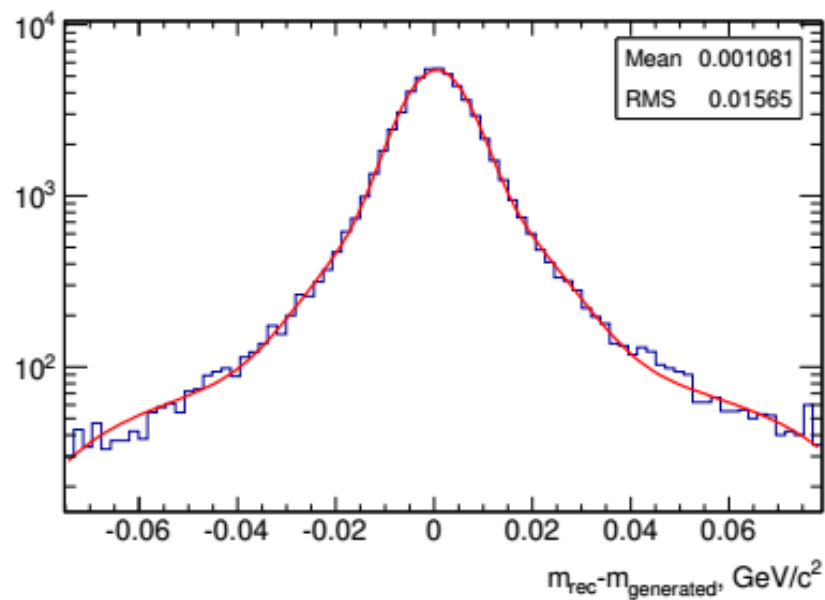


Рис. 2.37 — Спектр разницы между реконструированными и сгенерированными значениями инвариантной массы $\pi^+\pi^-\eta$ в моделировании для событий в Области I.

$$: dN(i) = \sum A(i,j) \cdot dN_{corr}(j),$$

$$A = \begin{pmatrix} 0.825 & 0.083 & 0.003 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots \\ 0.083 & 0.825 & 0.083 & 0.003 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots \\ 0.003 & 0.083 & 0.825 & 0.083 & 0.003 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots \\ 0 & 0.003 & 0.083 & 0.825 & 0.083 & 0.003 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots \\ 0 & 0 & 0.003 & 0.083 & 0.825 & 0.083 & 0.003 & 0 & 0 & 0 \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0.003 & 0.083 & 0.825 & 0.083 & 0.003 & 0 & 0 \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.003 & 0.083 & 0.825 & 0.083 & 0.003 & 0 \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.003 & 0.083 & 0.825 & 0.083 & 0.003 \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.003 & 0.083 & 0.825 & 0.083 \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.003 & 0.083 & 0.825 \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

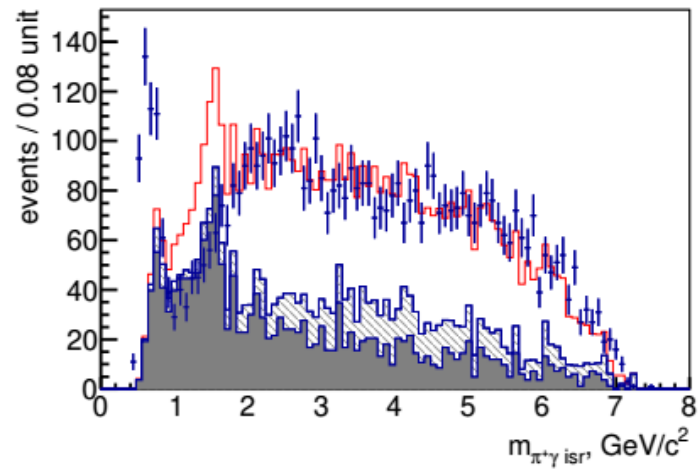
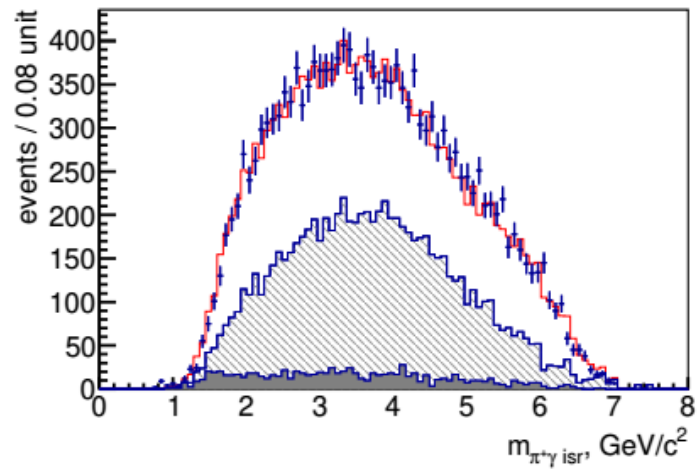
Используя метод Gauss-Jordan поиска обратных матриц [44], реализованный в ROOT, был найден вид A^{-1} как:

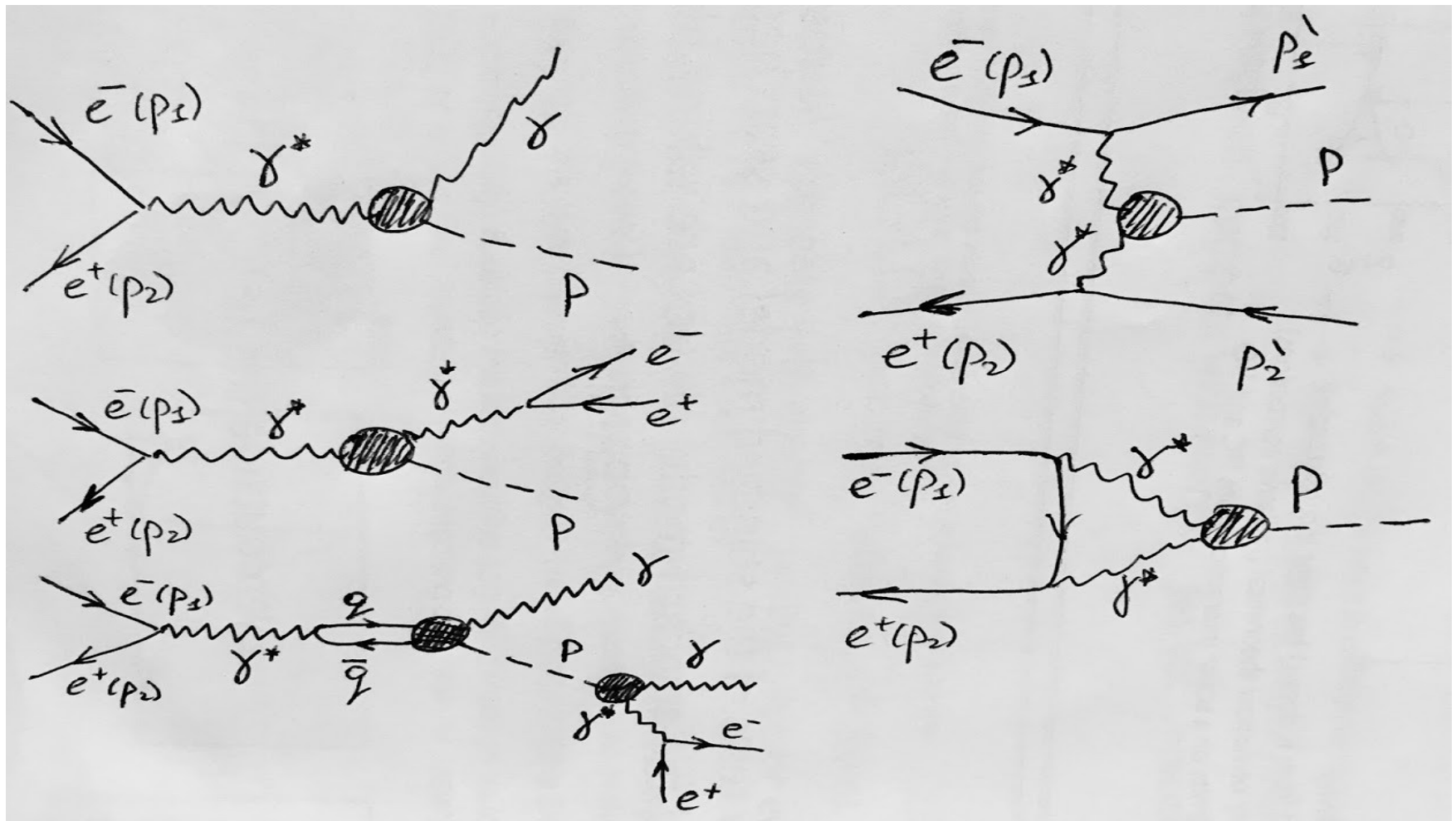
$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 1.223 & -0.124 & 0.007 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots \\ -0.124 & 1.236 & -0.125 & 0.007 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots \\ 0.007 & -0.125 & 1.236 & -0.125 & 0.007 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots \\ 0 & 0.007 & -0.125 & 1.236 & -0.125 & 0.007 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots \\ 0 & 0 & 0.007 & -0.125 & 1.236 & -0.125 & 0.007 & 0 & 0 & 0 \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0.007 & -0.125 & 1.236 & -0.125 & 0.007 & 0 & 0 \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.007 & -0.125 & 1.236 & -0.125 & 0.007 & 0 \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.007 & -0.125 & 1.236 & -0.125 & 0.007 \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.007 & -0.125 & 1.236 & -0.125 \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.007 & -0.125 & 1.236 \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

Обратная матрица может быть использована для определения истинного числа сигнальных событий как:

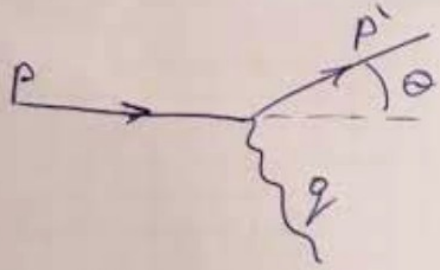
$$dN_{corr}(i) = \sum A^{-1}(i,j) \cdot dN(j) \quad (2.8)$$

\sqrt{s} , Γ_{B}	dN	dN_{corr}
1.2 - 1.225	7.8978 \pm 4.38387	9.66185 \pm 3.47885
1.225 - 1.25	4.53053 \pm 5.30536	2.98849 \pm 2.69964
1.25 - 1.275	14.8622 \pm 6.79058	13.5715 \pm 4.83424
1.275 - 1.3	36.2814 \pm 8.71999	38.9448 \pm 7.50258
1.3 - 1.325	36.651 \pm 9.19583	32.5989 \pm 7.59965
1.325 - 1.35	72.1239 \pm 11.1078	72.3387 \pm 10.6097
1.35 - 1.375	108.049 \pm 12.7077	107.91 \pm 12.9867
1.375 - 1.4	146.01 \pm 14.6023	144.614 \pm 15.1029
1.4 - 1.425	198.56 \pm 16.6054	195.313 \pm 17.6166
1.425 - 1.45	280.682 \pm 19.1505	281.718 \pm 20.9253
1.45 - 1.475	352.526 \pm 20.5847	357.284 \pm 23.4407
1.475 - 1.5	381.287 \pm 21.5836	380.06 \pm 24.3956
1.5 - 1.525	417.16 \pm 22.5415	419.147 \pm 25.5091
1.525 - 1.55	433.908 \pm 22.9518	436.768 \pm 26.0136
1.55 - 1.575	422.52 \pm 22.6286	424.203 \pm 25.673
1.575 - 1.6	393.642 \pm 21.6575	394.462 \pm 24.7828
1.6 - 1.625	356.661 \pm 21.0982	355.979 \pm 23.5946
1.625 - 1.65	326.003 \pm 19.8504	324.77 \pm 22.5595
1.65 - 1.675	305.957 \pm 19.1473	307.642 \pm 21.847
1.675 - 1.7	274.048 \pm 18.5332	269.271 \pm 20.6963
1.7 - 1.725	283.435 \pm 18.5898	285.238 \pm 21.0266
1.725 - 1.75	279.514 \pm 18.5731	278.887 \pm 20.8872
1.75 - 1.775	279.714 \pm 18.1042	280.701 \pm 20.8901
1.775 - 1.8	272.06 \pm 18.0145	270.437 \pm 20.6084
1.8 - 1.825	272.843 \pm 18.2127	282.765 \pm 20.6018
1.825 - 1.85	187.573 \pm 15.4288	182.233 \pm 17.1286
1.85 - 1.875	144.286 \pm 13.6053	145.73 \pm 15.0035





Варианты схем измерения $\Pi\Phi\Phi$ псевдоскалярных мезонов

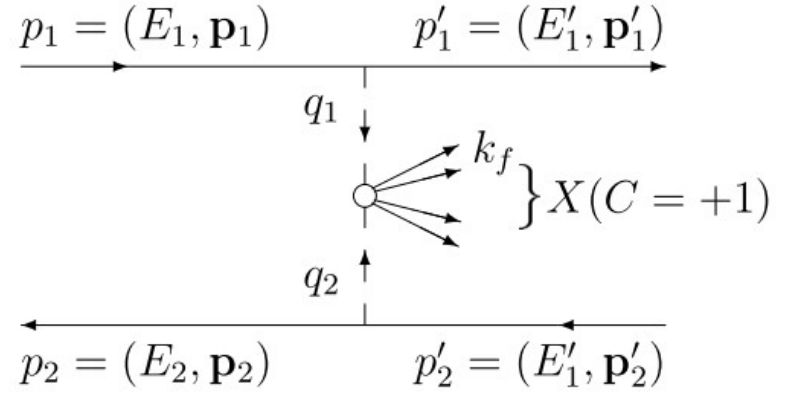


$$q = p - p'$$

$$q^2 = (p - p')^2 = p^2 + p'^2 - 2pp' = 2m_e^2 - 2 \cdot$$

$$\cdot (\varepsilon\varepsilon' - \vec{p} \cdot \vec{p}') \approx -2\varepsilon\varepsilon' \underbrace{(1 - \cos\theta)}_{2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}$$

$$Q^2 \equiv -q^2 = 4\varepsilon\varepsilon' \sin^2 \frac{\theta}{2}$$



$$W^2 = (q_1 + q_2)^2 = k^2, \quad k = \sum_f k_f$$

$$d\sigma_{ee} = \frac{(4\pi\alpha)^2}{(q_1^2 q_2^2)^2} d\Sigma \frac{I}{I_{ee}} \frac{d^3 p'_1 d^3 p'_2}{2E'_1 2E'_2 (2\pi)^6},$$

$$I_{ee} = \sqrt{(p_1 p_2)^2 - m_e^4}, \quad I = \sqrt{(q_1 q_2)^2 - q_1^2 q_2^2}$$

$$d\Sigma = \sum_{abcd} M_{cd}^* M_{ab} J_1^{ac} J_2^{bd} \frac{d\Gamma_X}{4I},$$

$$dn_\gamma(x, \mathbf{q}_\perp) = \frac{\alpha}{\pi^2} \left[1 - x + \frac{1}{2}x^2 - \frac{x^2(1-x)m_e^2}{\mathbf{q}_\perp^2 + m_e^2 x^2} \right] \frac{dx}{x} \frac{d^2 q_\perp}{\mathbf{q}_\perp^2 + m_e^2 x^2}$$

$$\frac{1}{2} Q \frac{\partial}{\partial Q} \phi(x, Q) = \int_0^1 dy V(x, y, Q) \phi(y, Q)$$

$$V(x, y, Q) = C_F \frac{\alpha_s(Q)}{2\pi} [V_0(x, y) + \frac{\alpha_s}{2\pi} V_1(x, y) + \dots] . \quad (2.4)$$