

Исследование состояний с отрицательной C-чётностью в реакциях перезарядки в эксперименте ВЕС

Ю.А. Хохлов от группы ВЕС

Вступление

- Частый механизм в t-канальных ChEx – реакциях -- пионный обмен
 - Измерение ОПО -- сечения резонанса R в изучаемом канале даёт
$$\text{Br}(R \rightarrow \pi\pi) \cdot \text{Br}(R \rightarrow \text{канал})$$

- В e+e- аннигиляции часто измеряется

$$\text{Br}(R \rightarrow \text{канал}) / \text{Br}(R \rightarrow \pi\pi)$$

R -- преимущественно векторные

(но не только, например $J/\psi \rightarrow \gamma R$)

- **Комбинация измерений даёт абсолютные Br , отсюда**

$$\Gamma(V \rightarrow e+e-) \propto |\psi(0)|^2 \quad \text{-- ключ к структуре } V$$

Модернизированная установка ВЕС

Триггерные решения:

На пучковую частицу до мишени

$$BEAM = S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot \overline{(A10 + A11)}$$

На выбывание пучковой частицы после мишени -- взаимодействие

$$MWG = BEAM \cdot \overline{(BK1 + BK2)}$$

На отсутствие срабатываний вето – взаимодействие без фрагментации мишени

$$MAIN = MWG \cdot \overline{(VETO)}$$

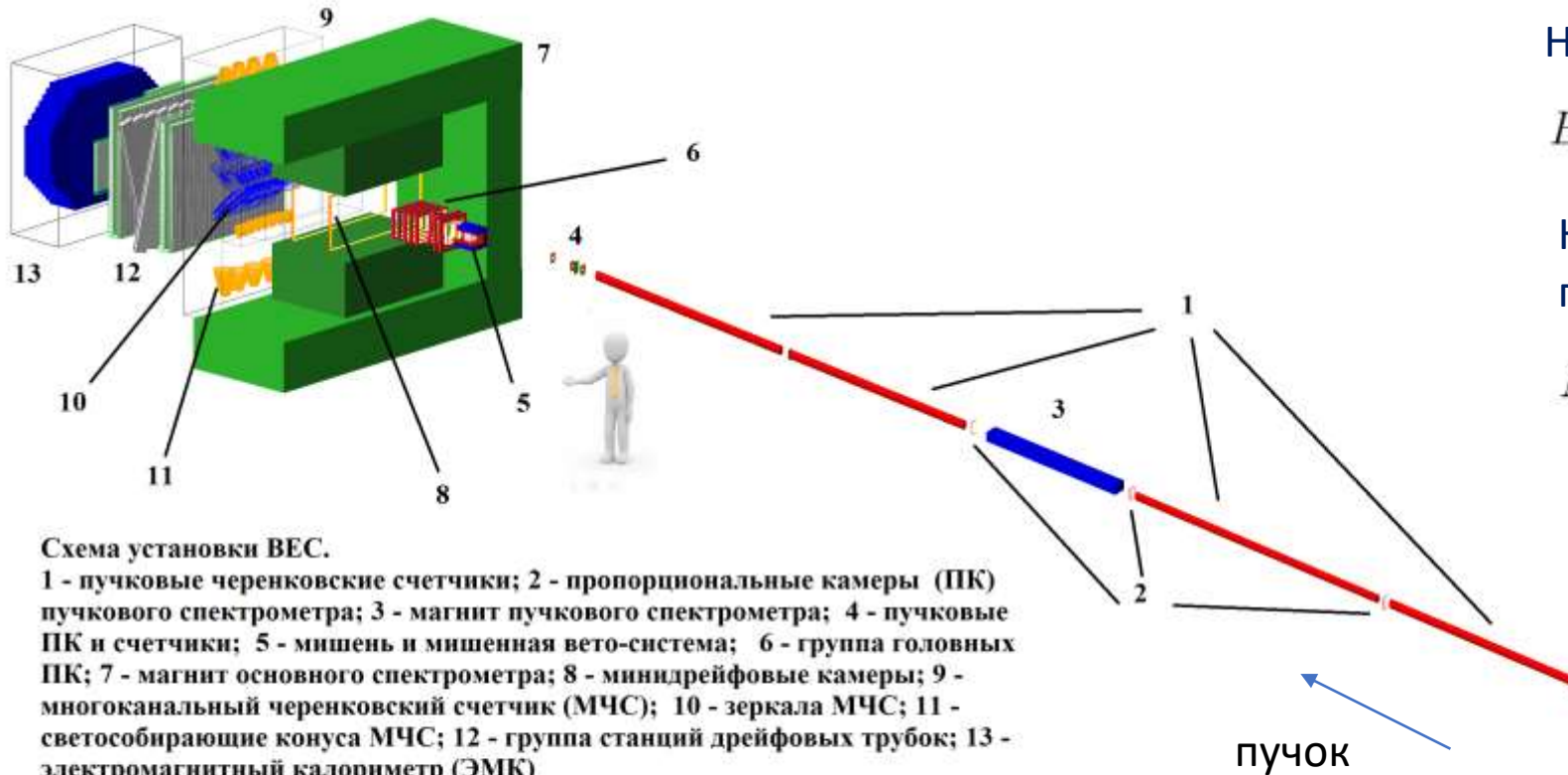
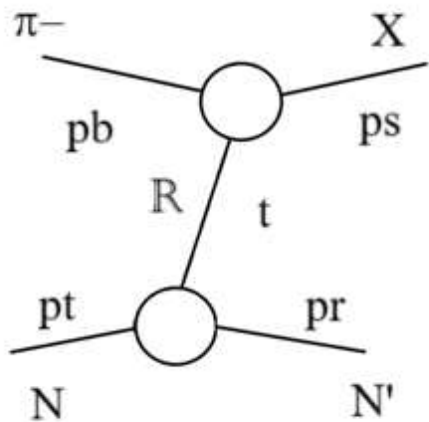


Схема установки ВЕС.

1 - пучковые черенковские счетчики; 2 - пропорциональные камеры (ПК) пучкового спектрометра; 3 - магнит пучкового спектрометра; 4 - пучковые ПК и счетчики; 5 - мишень и мишенная вето-система; 6 - группа головных ПК; 7 - магнит основного спектрометра; 8 - минидрейфовые камеры; 9 - многоканальный черенковский счетчик (МЧС); 10 - зеркала МЧС; 11 - светособирающие конуса МЧС; 12 - группа станций дрейфовых трубок; 13 - электромагнитный калориметр (ЭМК)

ChEx реакции $\pi^- \text{}^9\text{Be} \rightarrow A' X^0$ при $p=29$ ГэВ



X^0 = система мезонов в области *Beam Fragmentation*

Target = Be / N

Recoil = A + (N, N*, Δ) в области *Target Fragmentation*

(прямо не наблюдается)

$$mm^2 = (p_{beam} + p_{target} - p_{system})^2$$

$$t = (p_{beam} - p_{system})^2 = (p_{recoil} - p_{target})^2$$

$$t' = |t| - |t|_{min}$$

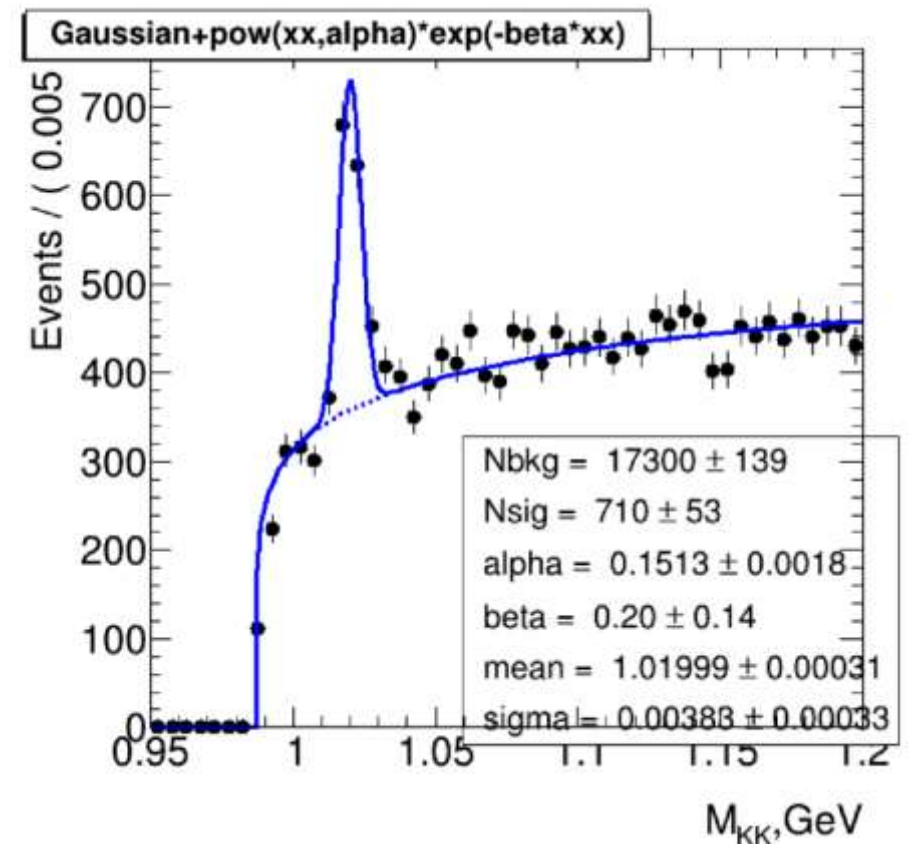
Две мезонные системы в ChEx на BES

- Изучение состояния $J^{PC}=1^{--}$ в $\phi(1020) \pi^0$
Предварительное измерение **сечения** реакции
- **Первое** наблюдение $\eta'(958) \pi^+ \pi^-$ в ChEx
Преимущественно с $C = -1$, J^P из серии $1^-, 3^- \dots$

I. Изучение системы $\phi\pi^0$

- BES 2024: Physics of Particles and Nuclei Letters v.22 (2025) 1, p.131–136
- Мода $\phi \rightarrow K^+ K^-$
- Вычитание фона не- ϕ по одномерным переменным Y ($M(KK\pi)$, t , $\cos \theta_{GJ}$, ...)

проверка -- побинная фильтрация
гауссовой подгонкой N_ϕ побинно по Y

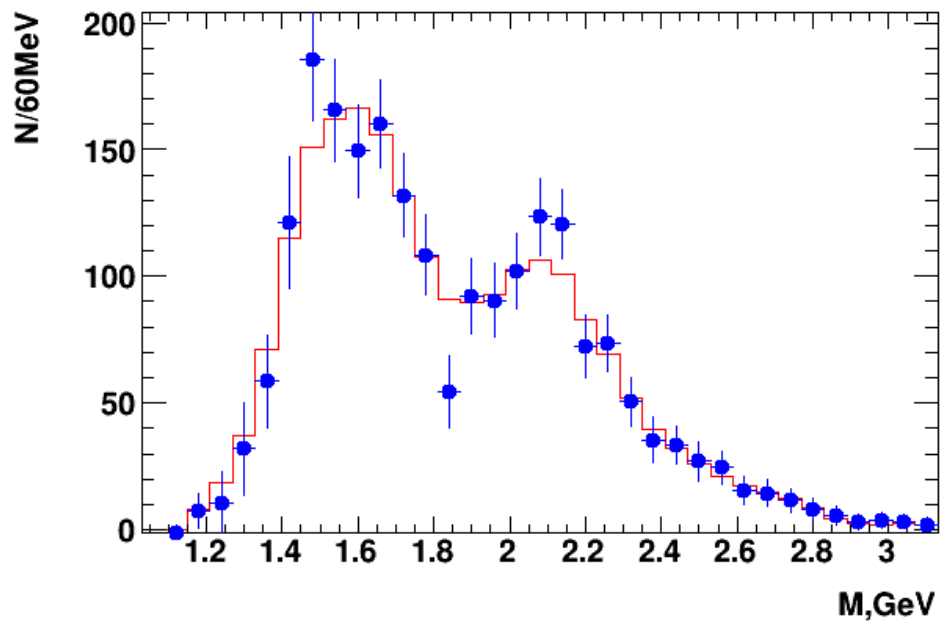


Система $\phi\pi^0$ (2)

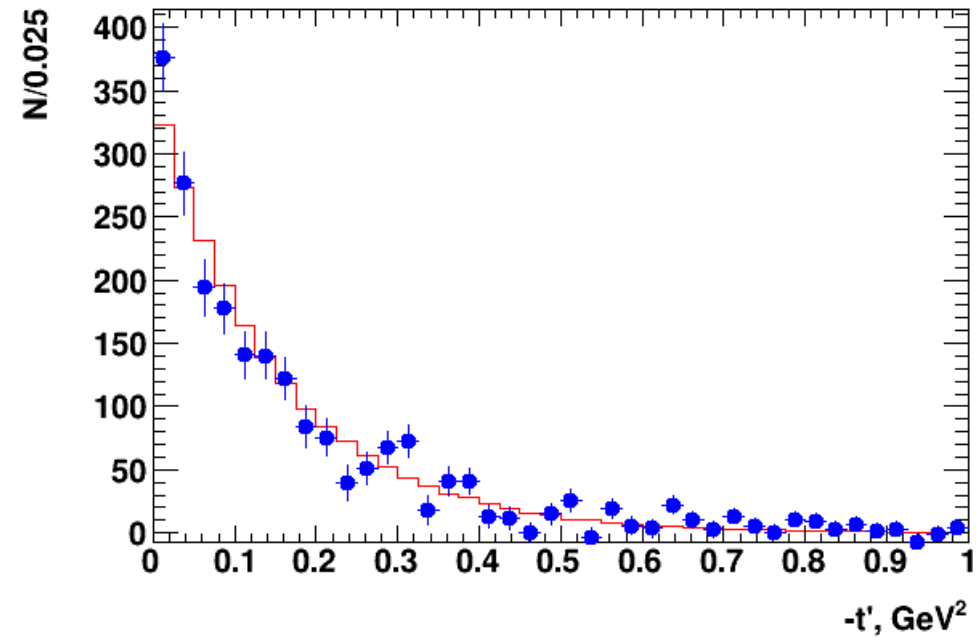
Ранее представленные результаты:

- Структурированный спектр масс
- Р-волновое состояние $J^P=1^-$
- Не противоречит ОПО
- Доминирует ассоциативное образование $\Delta(1232)$ в «нижней» вершине t-канала

Свойства системы $\phi\pi^0$



Спектр масс $\phi\pi$



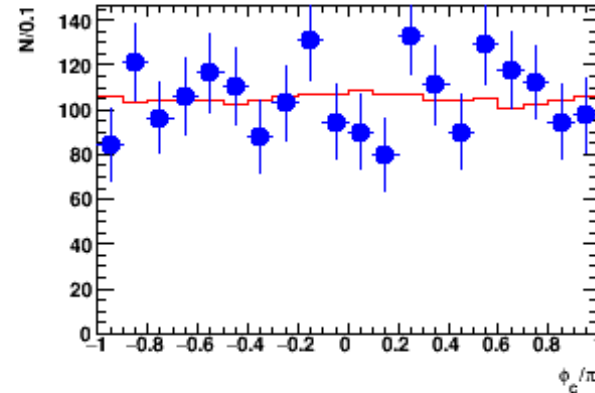
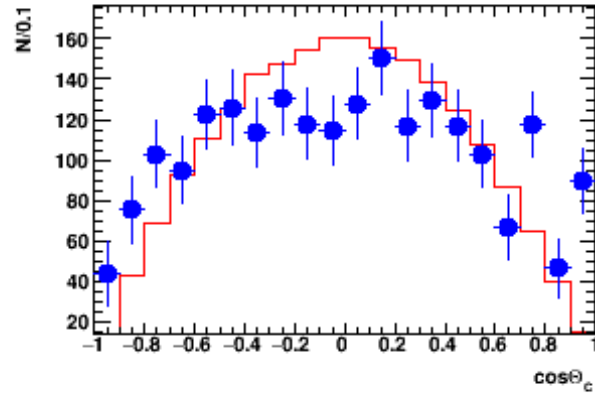
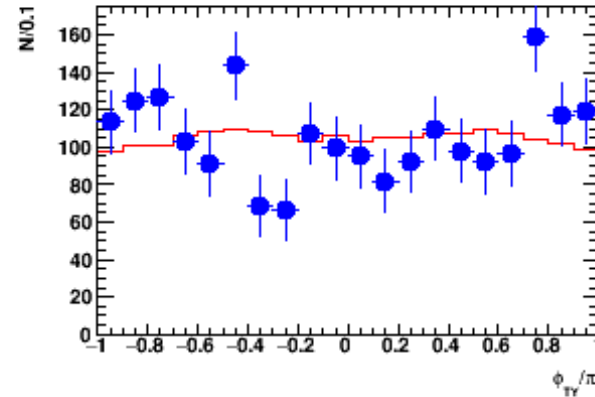
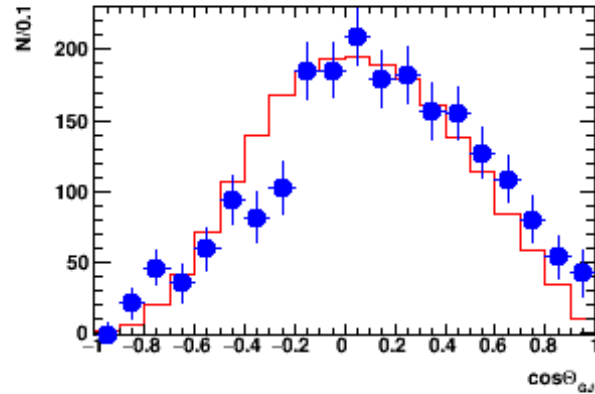
t' – распределение

Здесь и далее: точки с ошибками – экспериментальные данные;
красная линия -- моделирование

Свойства системы $\phi\pi^0$

В формализме Земаха распаду $J^P M^\eta = 1^- 0^- \rightarrow V P$ отвечает z-компонента векторного произведения

$$A = \vec{P}_{\pi^0} \times \vec{P}_{K^-} = P_{\pi^0} \cdot P_{K^-} \sin \Theta_{\pi^0} \sin \Theta_{CK^-} \sin(\phi_{CK^-} - \phi_{\pi^0})$$



a) $-\cos \Theta_{\pi^0}$, b) $-\phi_{\pi^0}/\pi$, c) $-\cos \Theta_{CK^-}$, d) $-\phi_{CK^-}/\pi$

Система $\phi\pi^0$: сечение

✓ Сечение в ОПО – доступ к $\text{Br}(R \rightarrow \pi\pi)$

➤ Сложности:

- **приведение** сечения от ядра к протону (вне данного доклада)
Известные параметризации типа $\sigma \propto Z^{2/3}$ -- для известных $\bar{q}q$ резонансов !
- **измерение** сечения с учётом $T(\text{arget})F(\text{ragmentation})$

Система $\phi\pi^0$: сечение (1)

- Основная часть пучковых экспозиций -- с мишенной вето-системой в антисовпадениях в триггере (TRIGGER = MAIN)
- Развитие триггерной системы и ССД => дополнительный
TRIGGER = M(ain)W(ithout)G(uard)
{ MAIN = MWG * !(Veto) }
- Недостающая масса «пучок + нуклон = $MM + \phi\pi^0$ » в MWG: преимущественно ассоциативное образование с $\Delta(1232)$ и более тяжёлыми возбуждениями в области TF

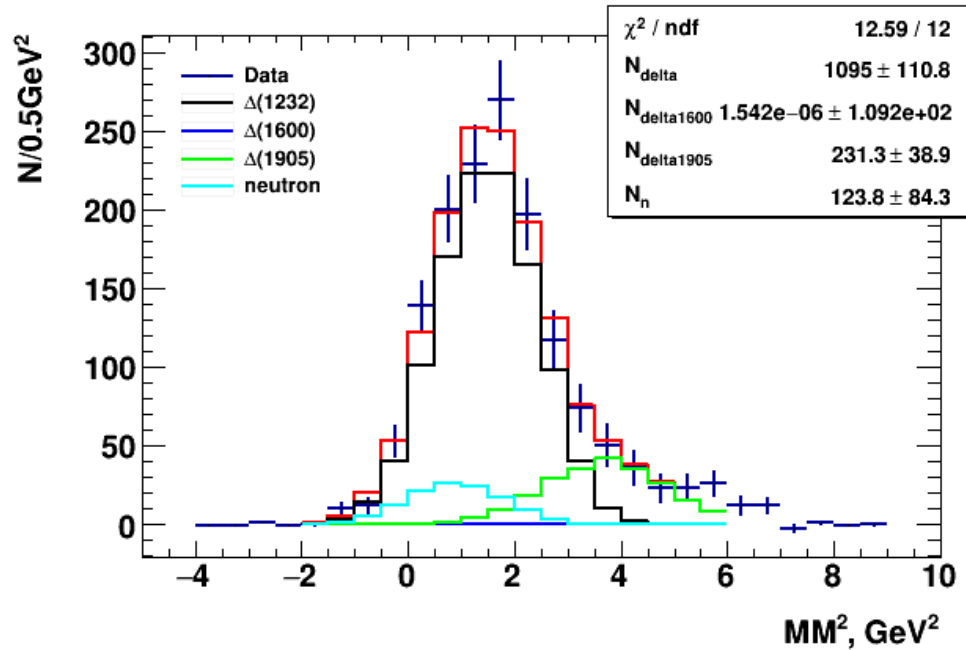
Система $\phi\pi^0$: сечение (2)

- Эффективность факторизуется по системам BF ($\phi\pi^0$) и TF (N, Δ)

$$\varepsilon_{tot}^{Trig} = \varepsilon_{BF}^{Trig} \times \varepsilon_{TF}^{Trig}$$

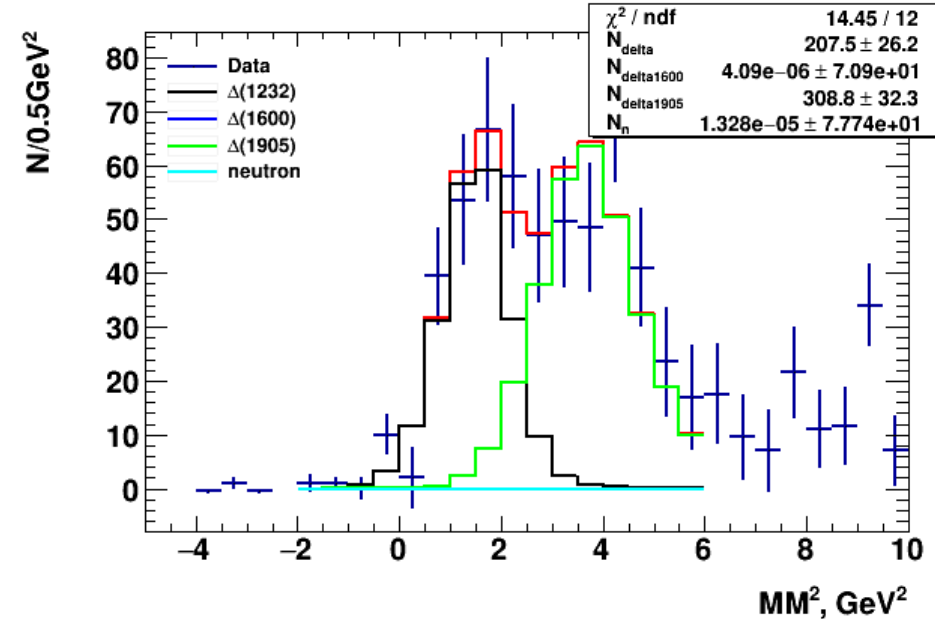
- в MWG ε_{TF} близко к 1, в MAIN для модели с Δ **кратно** меньше – регистрация $\phi\pi^0$ подавлена
- В области $MM^2 > M^2_{\Delta(1232)}$ -- эффективное описание без попытки интерпретации

Система $\phi\pi^0$: модель отдачи и фит MM2



Спектр MM2 и его подгонка.
MAIN (VETO в триггере)

Вклад нейтрона в отдаче не значим



Спектр MM2 и его подгонка.
MWG (нет VETO в триггере)

Вклады в наблюдаемом спектре $\Delta(1232): \Delta(1905) = 2:3$

Trig = MAIN

$$\sigma \{ \pi^- \ ^9\text{Be} \rightarrow A \ \Delta(1232) \ \varphi\pi^0 \ (1.2 < M < 2.5 \text{ ГэВ}) \} = 1.1 \pm 0.05 \text{ (стат.) мкБ}$$

$\sigma \{ \pi^- \ ^9\text{Be} \rightarrow A \ \Delta(1232) \ \varphi\pi^0 \ (M > 1.8 \text{ ГэВ}) \}$ около 40% от всего диапазона масс

Trig = MWG

$$\sigma \{ \pi^- \ ^9\text{Be} \rightarrow A \ [\Delta(1232) + \Delta(1905)] \ \varphi\pi^0 \ (1.2 < M < 2.5 \text{ ГэВ}) \} = 2.21 \pm 0.18 \text{ (стат.) мкБ}$$

$$\sigma \{ \pi^- \ ^9\text{Be} \rightarrow A \ \Delta(1232) \ \varphi\pi^0 \ (1.2 < M < 2.5 \text{ ГэВ}) \} = 0.65 \pm 0.05 \text{ (стат.) мкБ}$$

По двум измерениям

$$\sigma \{ \pi^- \ ^9\text{Be} \rightarrow A \ \Delta(1232) \ \varphi\pi^0 \ (1.2 < M < 2.5 \text{ ГэВ}) \} = 0.88 \pm 0.22 \text{ (сист.)} \pm 0.04 \text{ (стат) мкБ}$$

Основной источник систематической ошибки -- неопределённость модели отдачи

II. Изучение $\eta'(958) \pi^+ \pi^-$ в ChEx

- Особая роль η' в псевдоскалярном (P) нонете. Большая масса из треугольной аномалии
- Каковы его **радиальные** возбуждения? Могут ожидаться в канале $\eta' \pi^+ \pi^-$
- P-**глюбол** также имеет связь с $\eta' \pi^+ \pi^-$
- В системе доступен широкий набор квантовых чисел. Сравнение структуры $\eta' \pi \pi$ and $\eta \pi \pi$ интересно с точки зрения поиска гибрида
- В подсистеме $\eta' \pi$ возможно qq-экзотическое $J^{PC} = 1^{-+}$ состояние
- Эксперимент: немного из pp, большинство из $e^+ e^-$, в т.ч. $J/\psi \rightarrow \gamma (\eta' \pi \pi)$
- ChEx: другой механизм \rightarrow доступ к другим состояниям

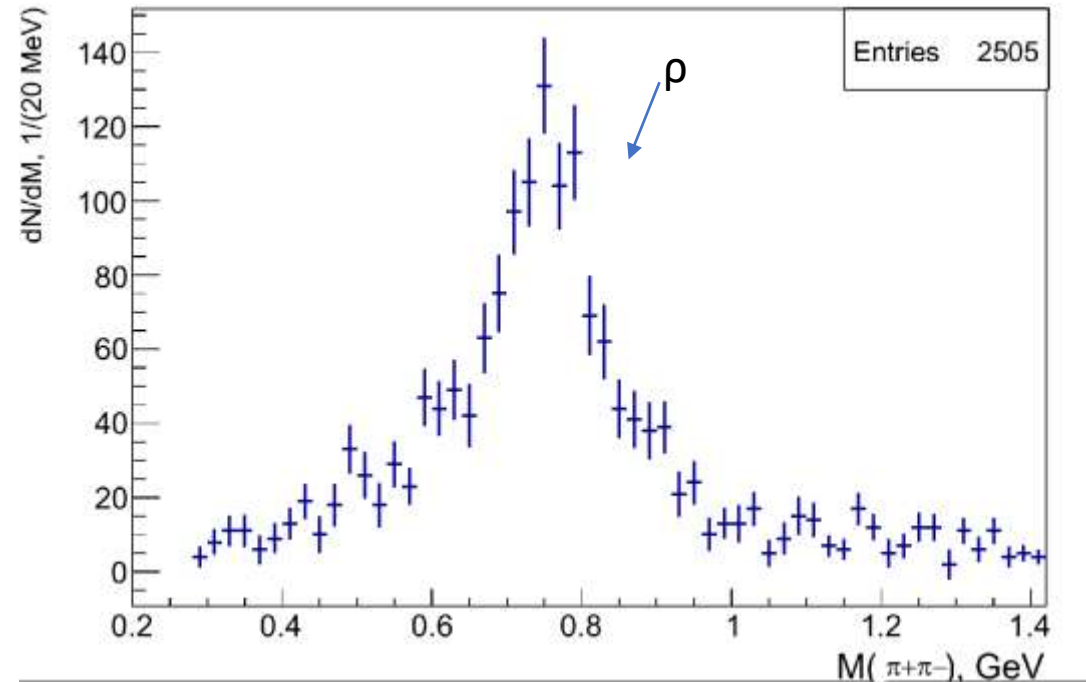
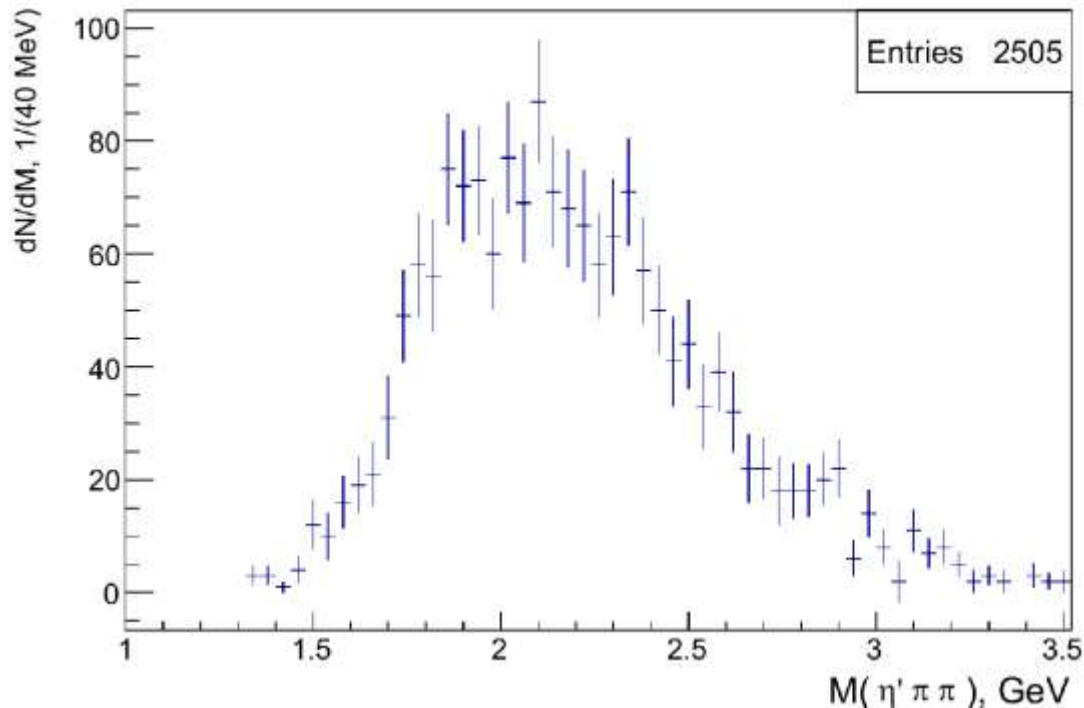
Характеристики событий $\eta' \pi^+ \pi^-$

Данные 7-и экспозиций 2013 - 2024 гг.

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

Спектр инвариантной массы $\eta' \pi \pi$
Trig = MAIN

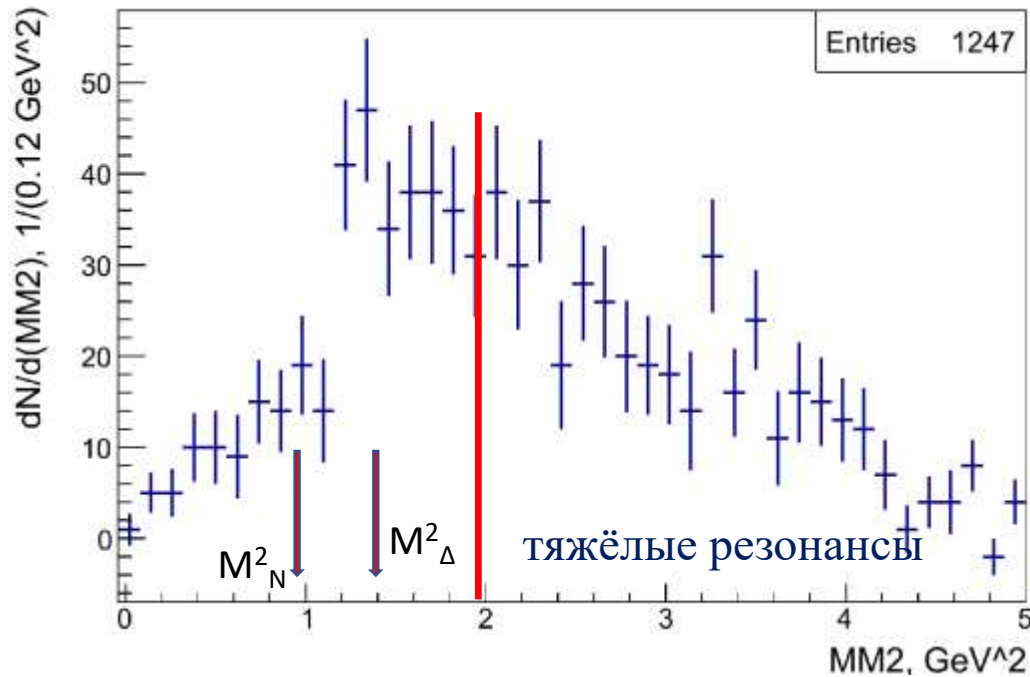
Спектр массы $\pi^+ \pi^-$
Trig = MAIN



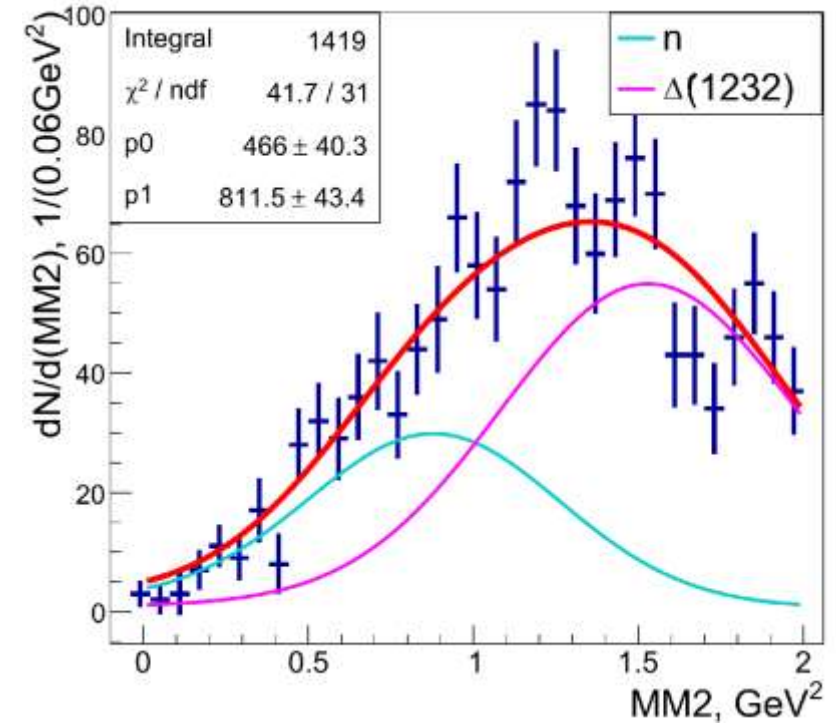
Состояние $I=1$ ($C=-1$) $\rho \eta'$ доминирует в $\eta' \pi \pi$

Характеристики событий (2). Спектры MM2

Trig= MWG (без вето)



MAIN (с вето)



- Фрагментация мишени **доминирует** над нуклонной отдачей
- **Подгонка** спектра модельной функцией из 3-х-компонет: $n + \Delta(1232) +$ (эффективное описание) тяжёлые резонансы
- Результирующее **отношение** двух компонент в исходной смеси $n : \Delta(1232) = 0.14$

Сечение

Предварительно

$\approx 2 * 10^3$ событий (Br=16.8%) в триггере MAIN

$$\sigma(\pi^- \text{ } ^9\text{Be} \rightarrow \Lambda \text{ n } \eta' \pi^+ \pi^-, t' < 0.2 \text{ GeV}^2, p = 29 \text{ GeV}) = 1.92 \pm 0.21 \text{ (стат.) мкБ}$$

Обсуждение

- $\eta' \pi^+ \pi^-$ в Ch-Ex образуется через $\rho \eta'$ с $I=1, C = -1$
- Совместимо с ОПО
- Доминирует ассоциативное образование $\Delta(1232)$, но вклад с n также значим
- Сечение на ядре $\sigma(\pi^- \text{}^9\text{Be} \rightarrow A n \eta' \pi^+ \pi^-, t < 0.2 \text{ GeV}^2) = 1.92 \pm 0.21$ (стат) мкБ
- К протонной мишени: $\sigma(\pi^- Z \rightarrow n X) = \sigma(\pi^- p \rightarrow n X, p) \cdot Z^{2/3} \rightarrow$
 $\sigma(\pi^- p \rightarrow n \eta' \pi^+ \pi^-, t' < 0.2 \text{ GeV}^2, P=29 \text{ GeV}) = \mathbf{0.77 \pm 0.08 \text{ мкБ (BES, 2025)}}$

Обсуждение (2)

- для $\pi\pi \rightarrow R$ -- состояния с натуральной J^P ($0^+, 1^-, \dots$)
 $\rho\eta'$ C=-1: $J^{PC} = 0^{+-}, 2^{+-}$ $\bar{q}q$ экзотика.

Остаются $1^{--}, 3^{--}, \dots$

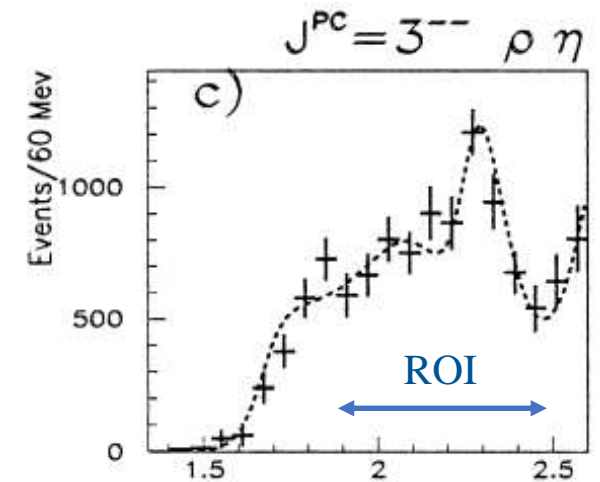
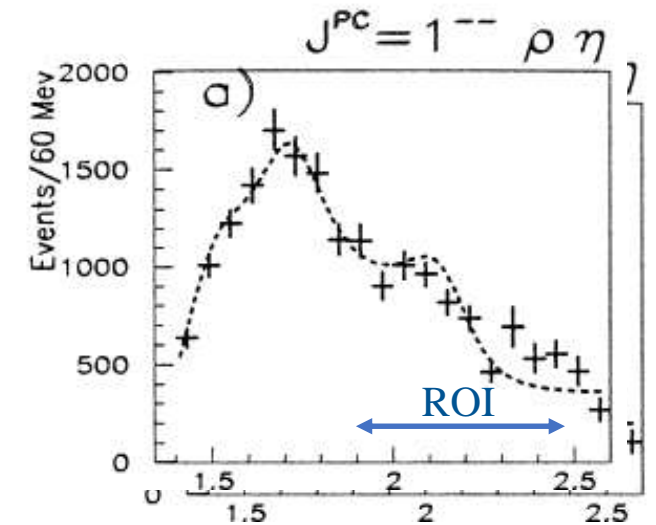
- ПВА похожей системы $\eta \pi^+\pi^-$ на BES (NP A 668 (2000) 83-96)
 Основные волны $1^-, 3^-$

- Оценка сечения в Region-Of-Interest по материалам BES 2000

$$\sigma(\pi^- p \rightarrow n \rho\eta \ 1^{--}; 1.9\text{--}2.3 \text{ GeV}; |t| < 0.2 \text{ GeV}^2; P=27 \text{ GeV}) \approx 0.6 \text{ мкБ}$$

$$\sigma(\pi^- p \rightarrow n \rho\eta \ {1^{--} + 3^{--}}; 1.9\text{--}2.5 \text{ GeV}) \approx 1.8 \text{ мкБ}$$

BES, 2000



Обсуждение (3)

Подходящий кандидат: $\rho(2150)$ из PDG (e + e- π -p $p\bar{p}$)

$\rho(2150)$

$$I^G(J^{PC}) = 1^+(1^{--})$$

OMITTED FROM SUMMARY TABLE

This entry was previously called $T_1(2190)$. See the review on "Spectroscopy of Light Meson Resonances."

$\rho(2150)$ MASS

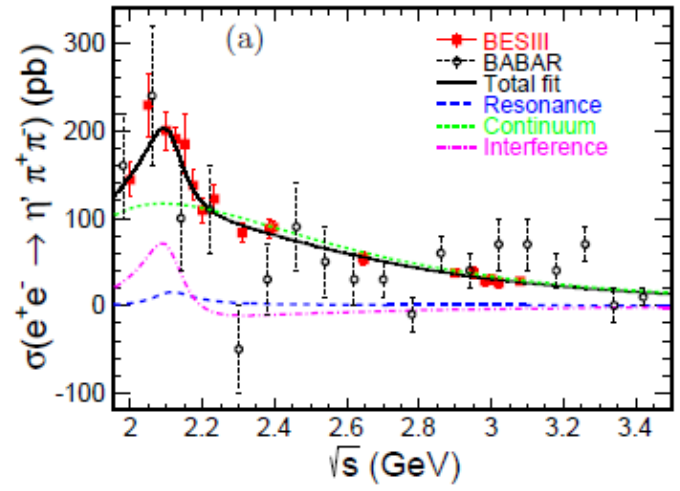
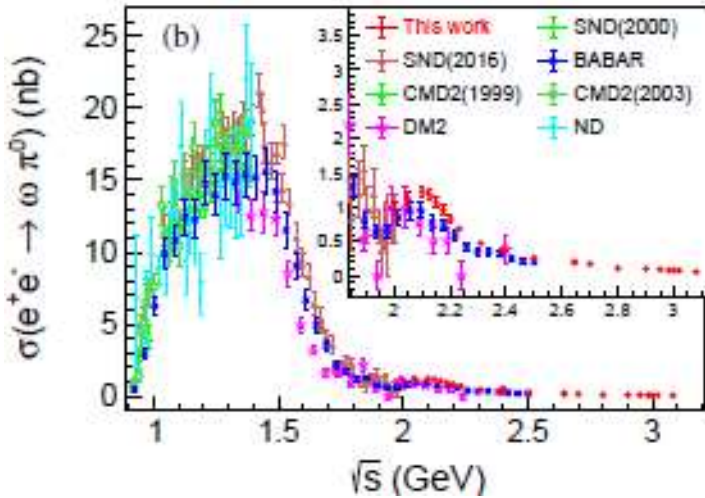
e+ e- PRODUCED

VALUE (MeV)	EVTs	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
● ● ● We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ● ● ●				
2034 ±13 ± 9		1 ABLIKIM	21A BES3	$e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$
2111 ±43 ±25		2 ABLIKIM	21X BES3	$e^+e^- \rightarrow \eta'\pi^+\pi^-$
2255 +17 +50 -18 -41	1.8k	3 ABLIKIM	20F BES3	$\psi(2S) \rightarrow K^+K^-\eta$
2201 ±19		4 LEES	20 BABR	$e^+e^- \rightarrow K^+K^-\gamma$
2227 ± 9 ± 9		5 LEES	20 RVUE	$e^+e^- \rightarrow K^+K^-$
2039 ± 8 +36 -18		6 ABLIKIM	19AQ BES	$J/\psi \rightarrow K^+K^-\pi^0$
2239.2 ± 7.1 ±11.3		7 ABLIKIM	19L BES3	$e^+e^- \rightarrow K^+K^-$
2254 ±22		8 LEES	12G BABR	$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$
2150 ±40 ±50		AUBERT	07AU BABR	10.6 $e^+e^- \rightarrow f_1(1285)\pi^+\pi^-\gamma$
1990 ±80		AUBERT	07AU BABR	10.6 $e^+e^- \rightarrow \eta'\pi^+\pi^-\gamma$
2153 ±37		BIAGINI	91 RVUE	$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-, K^+K^-$
2110 ±50		9 CLEGG	90 RVUE	$e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-), 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$

$\rho(2150)$ DECAY MODES

Mode	Fraction (Γ_i/Γ)
Γ_1 e^+e^-	
Γ_2 $\pi^+\pi^-$	seen
Γ_3 K^+K^-	seen
Γ_4 $3(\pi^+\pi^-)$	seen
Γ_5 $2(\pi^+\pi^-\pi^0)$	seen
Γ_6 $\eta'\pi^+\pi^-$	seen
Γ_7 $f_1(1285)\pi^+\pi^-$	seen
Γ_8 $\omega\pi^0$	seen
Γ_9 $\omega\pi^0\eta$	seen
Γ_{10} $p\bar{p}$	

Обсуждение (4). Сравнение вероятностей распадов для $\rho/X(2150)$



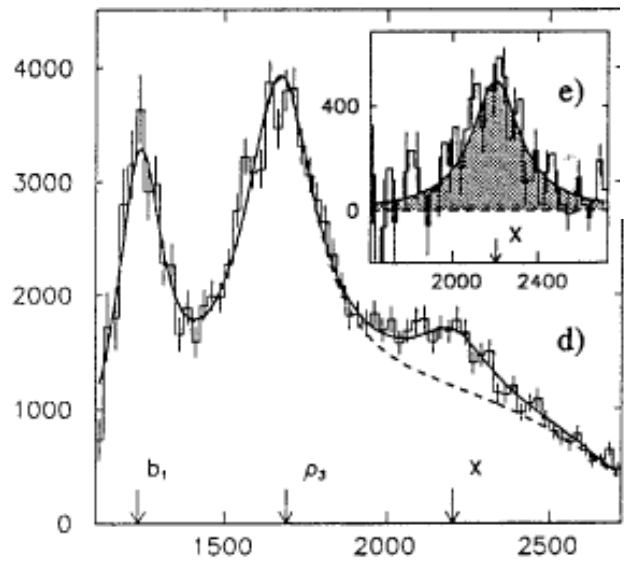
I. e^+e^-

BESIII: две модели фита

$$R_1 = \Gamma(\rho\eta') : \Gamma(\omega\pi) = 0.69 \pm 0.40$$

$$R_2 = \Gamma(\rho\eta') : \Gamma(\omega\pi) = 0.019 \pm 0.020$$

II. ChEx



$$\sigma(\pi^- p \rightarrow X n) \cdot BR(X \rightarrow \omega \pi^0) = \begin{cases} 120 \pm 25 \text{ nb} & \text{at } 38 \text{ GeV/c, ГАМС-ИФВЭ} \\ 20 \pm 6 \text{ nb} & \text{at } 100 \text{ GeV/c, GAMS-CERN} \end{cases}$$

$$\rightarrow \sigma(X, P=29 \text{ GeV}) \cdot BR(\omega\pi) \approx 0.24 \text{ мкБ}$$

БЕС, 2025:

$$\sigma(X) \cdot BR(\rho\eta') \approx 0.8 \text{ мкБ} \quad (\text{при доминировании } 1^-)$$

$$0.26 \text{ мкБ} \quad (\text{при соотношении } 1^- \text{ и } 3^- \text{ как в } \rho\eta)$$

$$\text{Тогда } R = Br(\rho\eta') : Br(\omega\pi) \approx 3.3 - 1.1$$

Заключение по $\eta'\pi\pi$

- ✓ Первое наблюдение $\eta'\pi\pi$ в ChEx
- ✓ Совместимо с ОПО
- ✓ $\sigma(\pi^- \ ^9\text{Be} \rightarrow \Lambda n \ \eta'\pi^+\pi^-, t' < 0.2 \text{ GeV}^2, P=29 \text{ GeV}) = 1.92 \pm 0.21$ (стат.) мкБ
- ✓ Спектр масс имеет максимум на @2.2 ГэВ, доминирует $\rho\eta'$
- ✓ Предполагая $\rho(2150) \rightarrow \rho\eta'$ и используя имеющиеся данные
 $R = \text{Br}(\rho(2150) \rightarrow \rho\eta') : \text{Br}(\rho(2150) \rightarrow \omega\pi) \approx 1.1 \text{ -- } 3.2$
не далеко от результата в одной модели фита BESIII и исключает другую
- ✓ Нужен ПВА $\eta'\pi\pi$ для выявления формы и определения квантовых чисел X(2150)

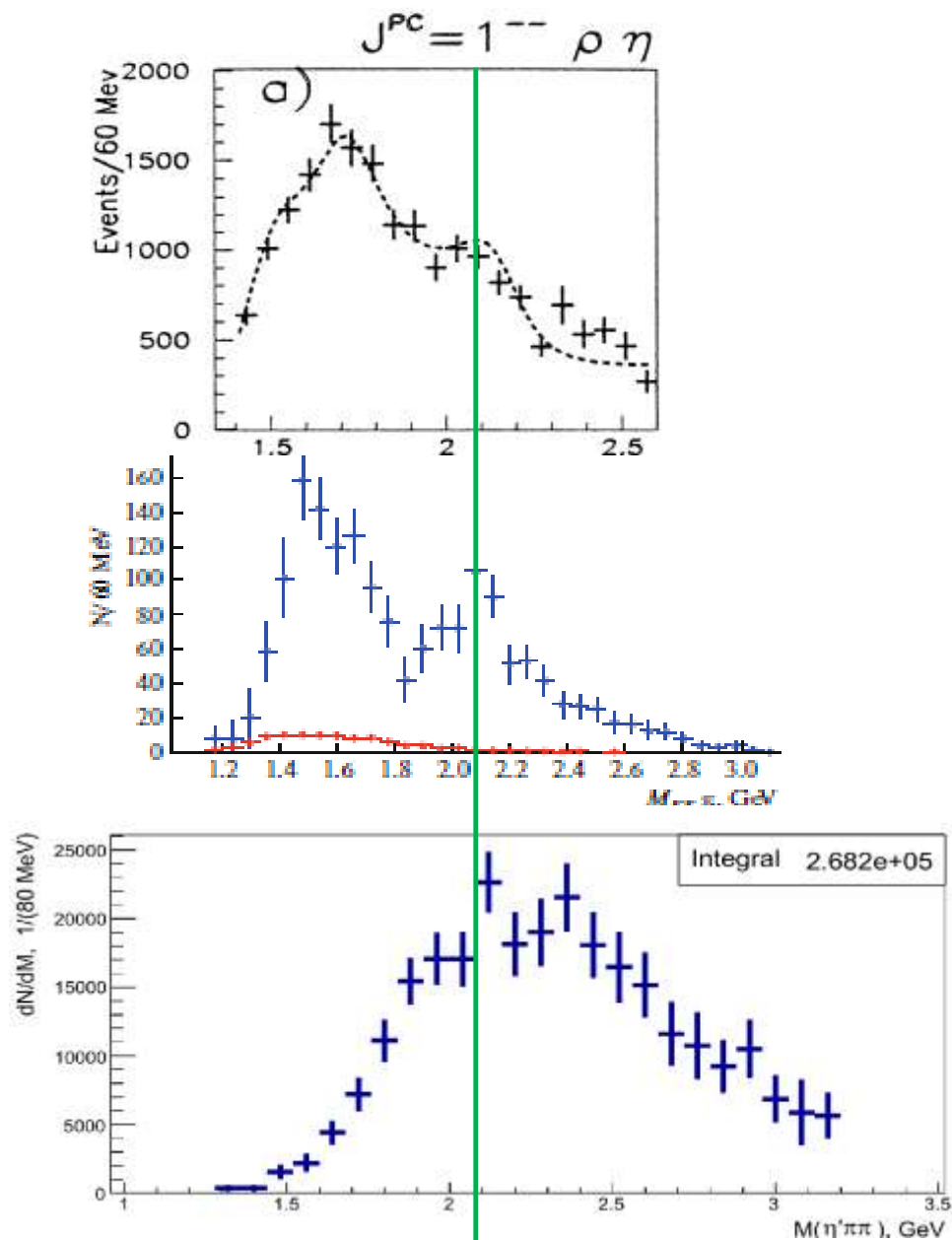
ВЕС: $\rho'(2150)$ в 3-х системах ?

ВЕС, 2000 1^- в $\eta\rho^0$

($\eta\rho^-$? доклад А.Шумакова, эта сессия)

ВЕС, 2024 1^- в $\phi\pi^0$

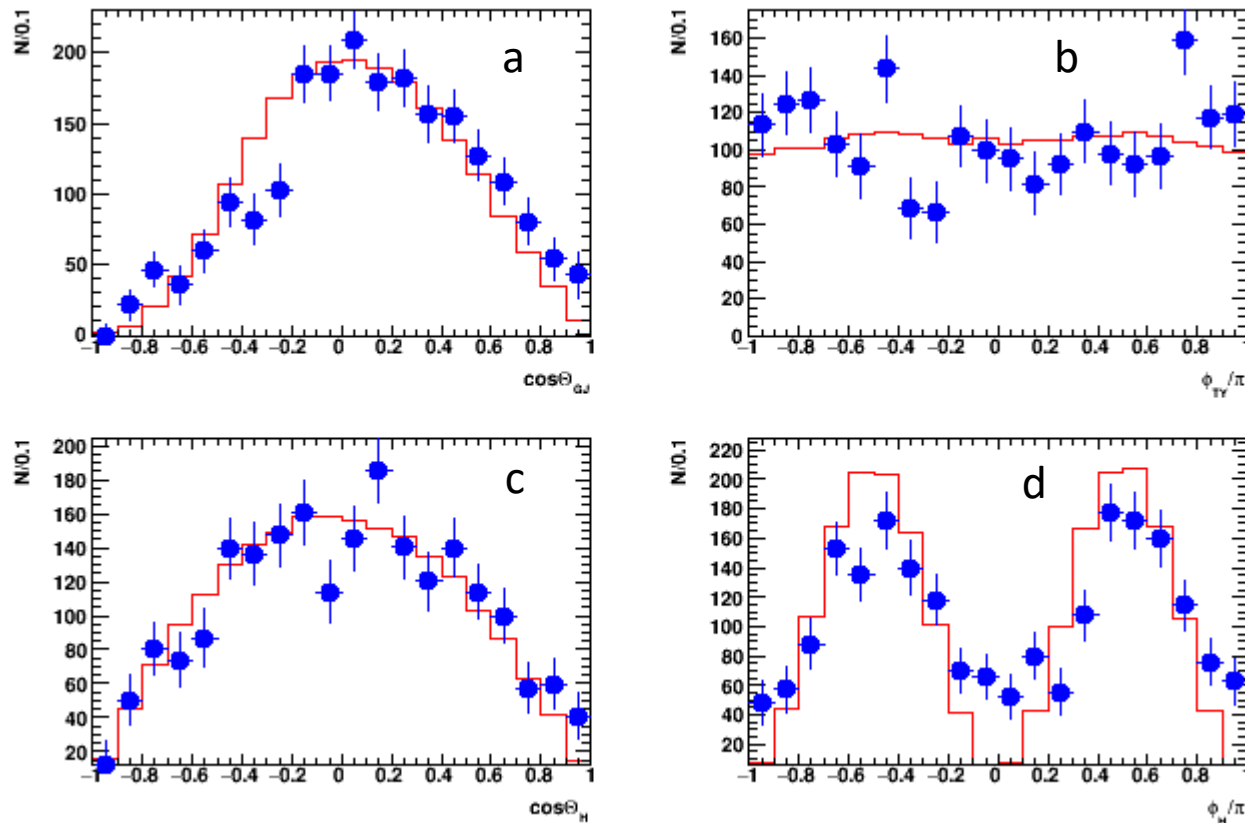
ВЕС, 2025 $\eta'\rho^0$ 1^- (?)



Дополнительные слайды

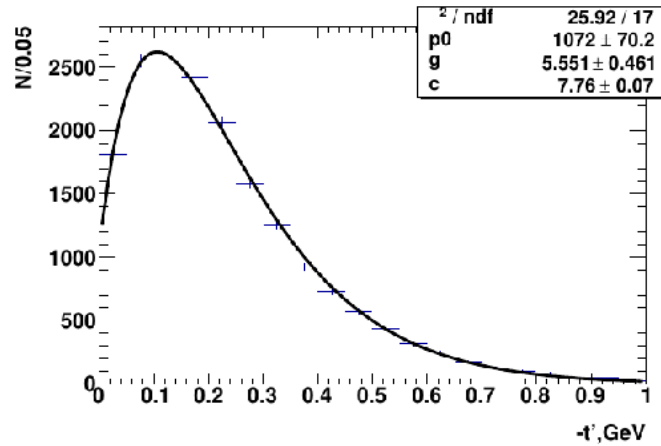
Свойства системы $\phi\pi^0$

Для К-мезона используется спиральная СК (вместо канонической)

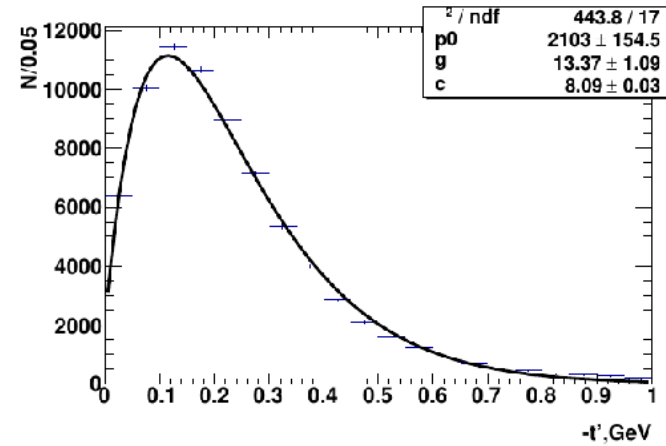


a) $\text{Cos}\theta_{GJ}(\pi^0)$, b) ϕ/π (π^0), c) $\text{Cos}\theta_H(K^-)$, d) ϕ_H/π (K^-)

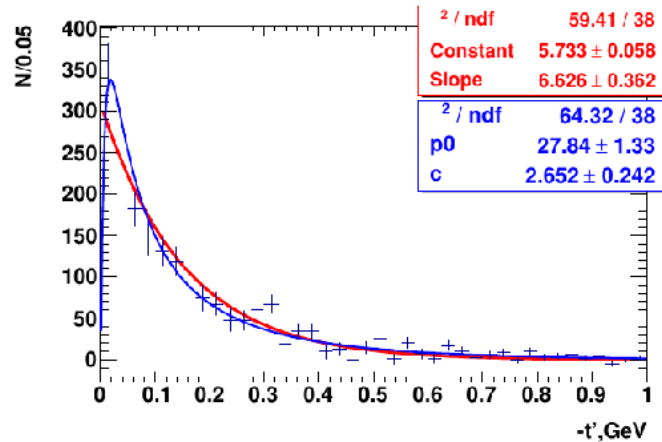
Распределение по квадрату переданного 4-х импульса t'



(a) η a_2 -обмен



(b) ω ρ -обмен



(c) $\phi\pi^0$ экспонентой-красным, π -обмен - синим

- a_2, ρ -обмен
 $(1 - c \cdot g \cdot t') \cdot \exp(c \cdot t')$
- π -обмен
 $|t'| / (t' - m_\pi^2)^2 \cdot \exp(c \cdot t')$

Система $\phi\pi^0$: 3-х-частичный ПВА $K^+K^-\pi^0$

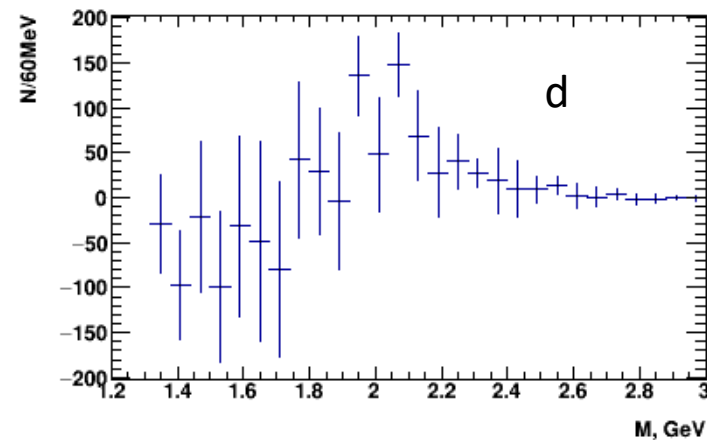
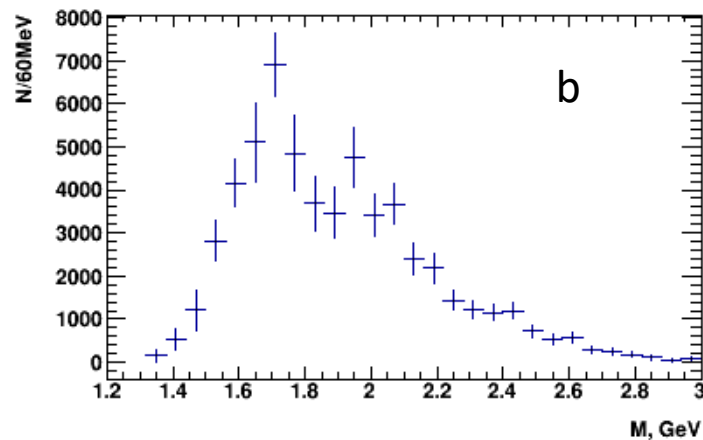
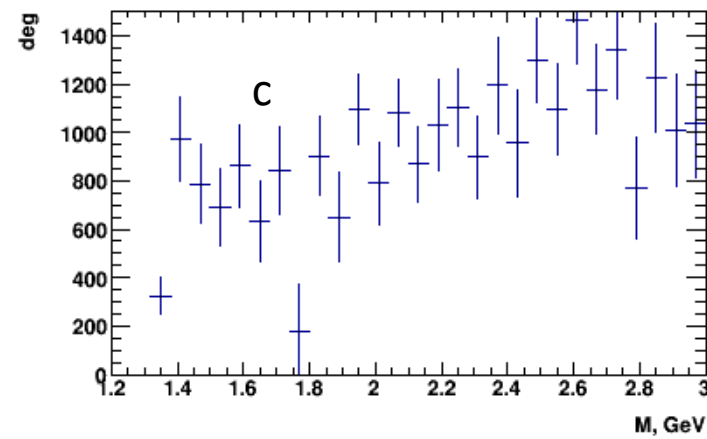
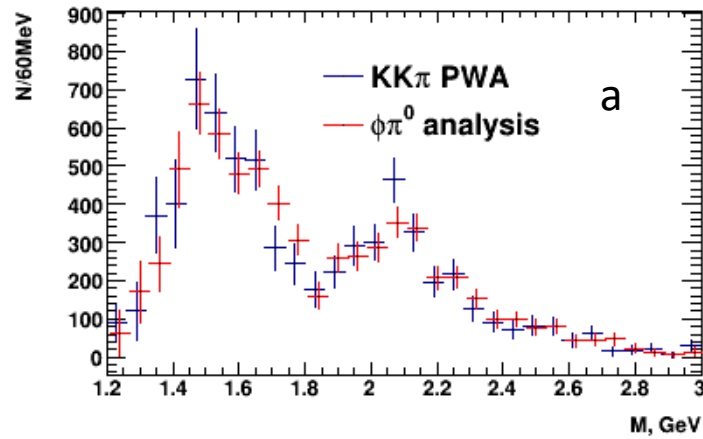
- Матрица плотности размера d без ограничения ранга $\rho = \sum_k^d V_k V_k^+$ в базисе reflectivity
- Нотация волн: $J^P L M \eta R$ (M - проекционное число, η – натуральность обмена)
- $R = \phi, a_0/f_0, a_2, f_2, K^*, K^*_2 \dots$
- Здесь – только в контексте $\phi\pi$

- Сигнал ϕ – почти целиком в волне $1^1 P_0^- \phi$, $I=1$ -- сектор ρ'
- **Форма волны по массе полностью повторяет спектр из метода вычитания фона**
нормировка произвольна ввиду не учёта в ПВА эффективности ϵ_{TF} в MAIN

Система $\phi\pi^0$: 3-х-частичный ПВА $K^+K^-\pi^0$

- ✓ На своём элементе матрицы -- волна **$1-P_0-K^*(892)_a$**
(антисимметричная по $K^+ \leftrightarrow K^-$) $C=-1$ (G и I не определены) -- возможны $\rho/\omega\phi$
В предположении ОПО ($\eta=-1$ и быстрое падение с t) $G=+1, I=-1$ -- ρ'
- ✓ Интенсивность волны в K^*K на порядок больше, структура отлична от $\phi\pi$
- ✓ Интерференция двух волн **мала** ввиду слабого перекрытия на диаграмме Далитца (?)
- ✓ Вывод: структура в $\phi\pi^0$ -- не артефакт интерференции K^*K с бесструктурной $\phi\pi^0$

Система $\phi\pi^0$: 3-х-частичный ПВА $K^+K^-\pi^0$



- a) Спектр $M(\phi\pi^0)$ и интенсивность волны $1-P_0\phi$; b) интенсивность $1-P_0 K^*(892)$; c) относительная фаза двух волн; d) интерференция двух волн