

**Мезонная спектроскопия
в зарядовообменных реакциях
в эксперименте ВЕС**

Ю.А. Хохлов от группы ВЕС

Введение

- Зарядовообменные (ChEx) t -канальные реакции на фиксированной мишени дают доступ к широкому набору мезонных состояний
- При умеренных энергиях диапазона $У-70$ их сечения конкурентны на фоне доминирующей дифракции. В то же время энергия достаточна для рождения тяжёлых (2-3 ГэВ) резонансов
- Один из основных механизмов -- однопионный обмен (ОПО)
- ❖ Спектроскопия в ОПО и e^+e^- аннигиляции взаимно дополнительные:
 - ✓ Измерение ОПО -- сечения резонанса R в изучаемом канале даёт $Br(R \rightarrow \pi\pi) \cdot Br(R \rightarrow \text{канал})$
 - ✓ В e^+e^- аннигиляции часто измеряется $Br(R \rightarrow \text{канал}) / Br(R \rightarrow \pi\pi)$
 R -- преимущественно V (векторные) (и др., например $J/\psi \rightarrow \gamma R$)
 - ✓ Комбинация измерений даёт абсолютные Br , отсюда $\Gamma(V \rightarrow e^+e^-) \propto |\psi(0)|^2$ -- ключ к структуре V

ChEx реакции $\pi^- A \rightarrow A' X^0$

Сечения в u-канале /с обменом барионным числом малы

X^0 -- **ЭКСКЛЮЗИВНАЯ** СИСТЕМА МЕЗОНОВ в области

Beam Fragmentation

$A' = A + (N, N^*, \Delta)$ барионная система (нуклоны, мягкие

мезоны) в области **Target Fragmentation**

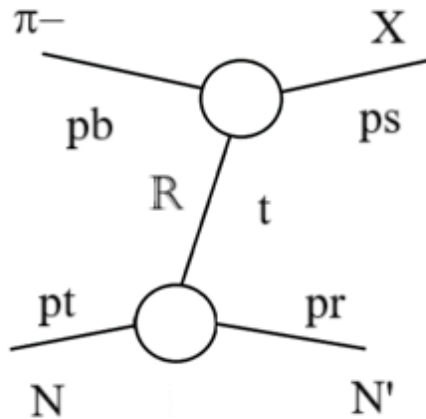
Как правило, частицы TF прямо не наблюдается

(*квазиэксклюзивные* реакции), часто ветвятся.

Отдельный анализ системы ВФ осмыслен в силу факторизации

вершин в t-канале и кинематического разделения двух областей

($s \gg s_0 \sim 10 \text{ ГэВ}^2$)



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

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

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

ChEx реакции $\pi^- A \rightarrow A' X^0$

Совместный анализ BF и TF – **новые возможности** по взаимному «мечению» (фильтрации) мезонной и барионной систем.

ВЕС: первые шаги по совместному анализу. В близкой перспективе – комплексный детектор в TF – области («мишенная станция», TS) на замену мишенной вето--системы

Ядерная мишень:

- ✓ доп. возможности (изотопика мишени, частично когерентные процессы)
- ✓ усложняющий фактор для измерений (энергия связи и ферми – движение нуклонов; A-зависимости сечения).

Модернизированная установка ВЕС

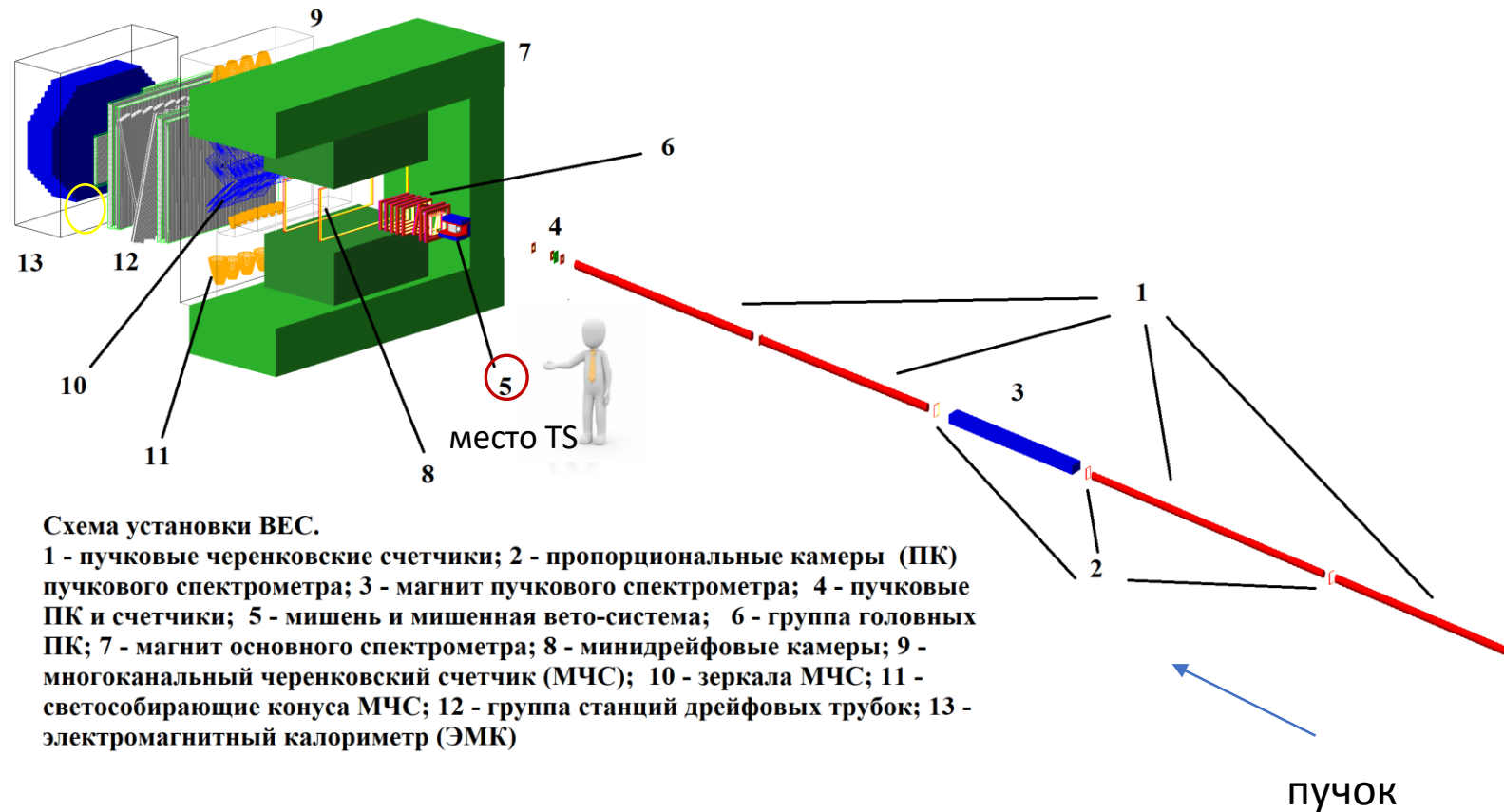


Схема установки ВЕС.

1 - пучковые черенковские счетчики; 2 - пропорциональные камеры (ПК) пучкового спектрометра; 3 - магнит пучкового спектрометра; 4 - пучковые ПК и счетчики; 5 - мишень и мишенная veto-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)

Постановка эксперимента

- Пучковая часть с идентификацией (PID; $\pi^- > 97\%$) и импульсным спектрометром (BS)
- Эксклюзивность в верхней вершине реакции (магнитный спектрометр, ЭМК, идентификация)
- Вето – система для частиц нижней вершины (триггер и/или оцифровка)
- Метод (квадрата) недостающей массы как характеристики фрагментации мишени

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

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

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

- Многокомпонентный триггер:

✓ Пучковая частица до мишени. Нормировка и прямое измерение сечений. $BEAM = S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot \overline{(A10 + A11)}$

✓ Выбывание пучковой частицы после мишени. Взаимодействие ВФ. $MWG = BEAM \cdot \overline{(BK1 + BK2)}$

✓ Запрет срабатываний вето. Взаимодействие ВФ без ТФ. $MAIN = MWG \cdot \overline{(VETO)}$

Постановка эксперимента (2)

- Типичное выделение системы (реакции)
 - отбраковка статистики (bad-files list) на основе поломок или плохих условий набора
 - Требуемая триггерная метка (опционально – триггерные условия off-line)
 - Событие реконструировано
 - Искомая топология системы измеренных частиц, в т.ч. пучковой (кол-во треков и гамма-квантов)
 - **(Квази)Эксклюзивность** системы измеренных частиц ($P_{\text{tot}} \approx P_{\text{beam}}$; сейчас $P_{\text{beam}} = 29$ ГэВ)
 - первичная вершина в мишени
 - (опционально) вторичная вершина
 - (опционально) PID
 - (опционально) обрезания по физическим переменным (инвариантные массы, t , $MM2$)
 - ...

Мезонные системы в ChEx на BES

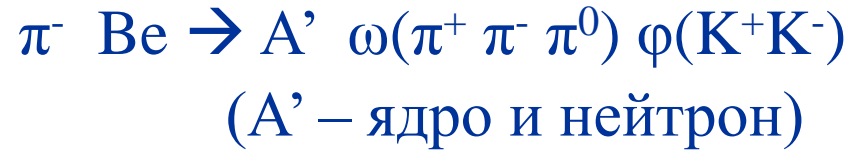
- Скаляр в $\omega\phi$ – кандидат в глоболы (BES, 2024)
- Изовекторные состояния:
 - Изучение состояния $J^{PC}=1^{--}$ в $\phi(1020)\pi^0$ (BES, 2025)
 - **Первое** изучение в ChEx $\eta'(958)\rho^0$ ($J^P = 1^-, 3^- \dots$) (BES, 2025)
 - **Сопоставление с** изученной до модернизации (BES, 2000) $\eta\rho^0$
и др. данными

I. Скаляр $f_0(1710)/f_0(1770)$ в $\omega\phi$

Eur.Phys.J.A 60 (2024) 5, 105 (BES, 2024)

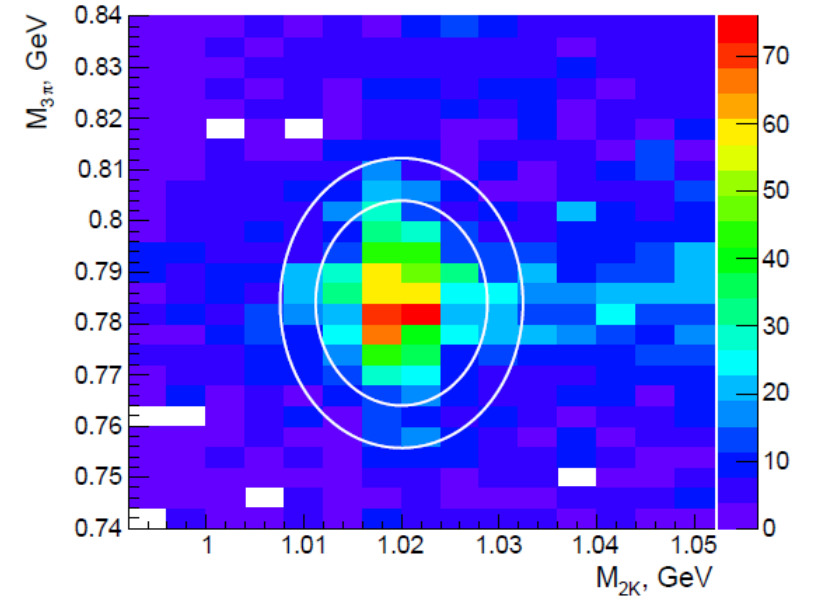
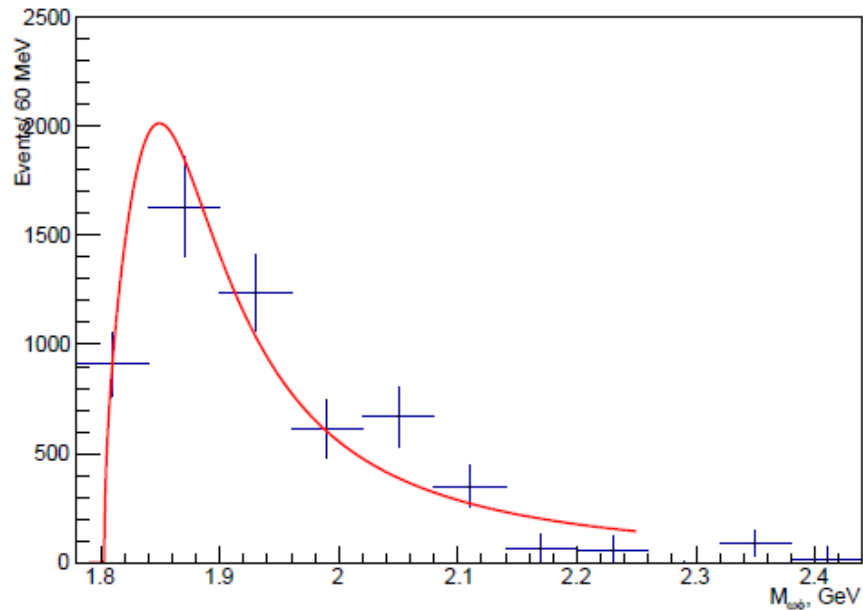
- ✓ Лёгкие скаляры ($J^{PC} = 0^{++}$): неопределенность и избыточность в заполнении $SU(3)_{\text{flavor}}$ мультиплетов ($M = 500; 980; 1500; 1710; \dots$ МэВ)
- ✓ Разнообразие теор. моделей (молекула, 4-кварк, глюбол...)
- ✓ Один из основных источников экспериментальных данных: $J/\psi \rightarrow \gamma f_0$
- ✓ ChEx – альтернативный механизм рождения

I. Скаляр $f_0(1710/1770)$ в $\omega\phi$ (2)



Использованы данные 4-х сеансов 2013-2015 г.

Интенсивность доминирующей волны $J^{PC} = 0^{++}$



$$\frac{dN}{dM} = \frac{CM_R^2 \Gamma_0 g q_{\omega\phi}}{(M_R^2 - M^2)^2 + M_R^2 (\Gamma_0 + g q_{\omega\phi})^2} \quad (M > M_\omega + M_\phi)$$

$$M_R = 1834 \pm 14 \text{ (стат.) } {}^{+2}_{-10} \text{ (сист.) МэВ}$$

$$\Gamma_0 = 114 \pm 15 \text{ (стат.) } {}^{+5}_{-15} \text{ (сист.) МэВ}$$

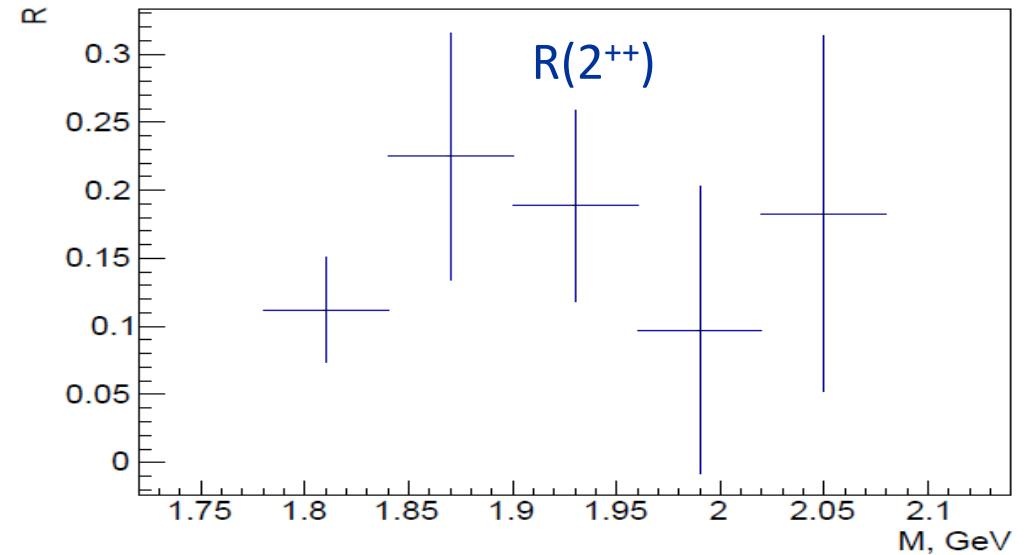
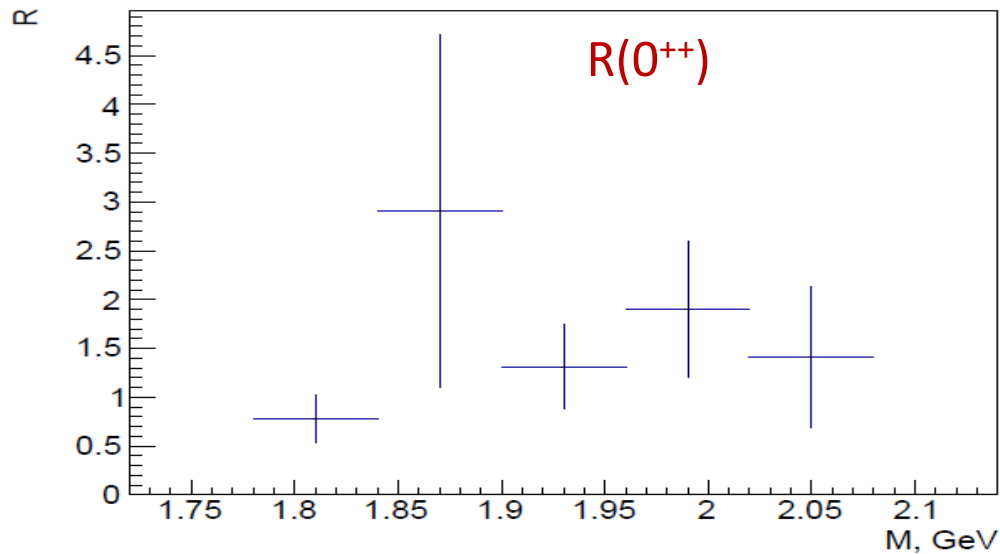
$$\text{Br}(R \rightarrow \omega\phi) \approx g = 0.1$$

I. Скаляр $f_0(1710/1770)$ в $\omega\phi$ (3)

Сравнение каналов $\omega\phi$ и $\omega\omega$

($\omega\omega$ - из Amelin D.V et al. PAN 69, 690-698 (2006); Ivashin, A., et al.: AIP Conf. Proc. 1257(1), 262–266 (2010))

$$R = \frac{N_{\omega\phi,29}^{0+}}{N_{\omega\omega,29}^{0+}} \cdot \frac{Br(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)}{Br(\phi \rightarrow K^+K^-)}$$



Наибольшее экспериментально наблюдаемое нарушение правила OZI

✓ смешивание скаляров (но не тензоров) с разным кварковым составом

Isgur, N., Thacker, H.B.: On the origin of the OZI rule in QCD. Phys.Rev. D 64, 094507 (2001)

I. Скаляр $f_0(1710/1770)$ в $\omega\phi$ (4)

- Характеристики $M, \Gamma, \text{Br}(\omega\phi)/\text{Br}(\omega\omega)$ совместимы с данными из $J/\psi \rightarrow \gamma f_0(1710)$
 - Измерение ВЕС сечения в канале $\omega\phi$ и соотношение Чу-Лоу для модели ОПО дают $\text{Br}(f_0 \rightarrow \pi\pi) \cdot \text{Br}(f_0 \rightarrow \omega\phi) = (4.8 \pm 1.2) \cdot 10^{-3}$ (ChEx, ВЕС-2024)
- $\text{Br}(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(\rightarrow \pi\pi)) \cdot \text{Br}(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(\rightarrow \omega\phi)) = (9.5 \pm 2.6) \cdot 10^{-8}$ ($J/\psi \rightarrow \gamma f_0$, PDG)
- ✓ Отсюда $\text{Br}(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(1710)) = (4.5 \pm 0.8) \cdot 10^{-3}$ -- больше чем для других f_0
- Ср. с решеточным расчетом для скалярного глюбола: $\text{Br}(J/\psi \rightarrow \gamma 0^+ gg) = (3.8 \pm 0.9) \cdot 10^{-3}$
- Для альтернативы $f_0(\text{ВЕС}) \equiv f_0(1770)$ (Denisenko I., Sarantsev A. et al., Phys.Let. B816 (2021), 136227) изменения численно небольшие и не меняют вывода:

Наблюдаемый $f_0(1710/1770)$ имеет большую глюбольную компоненту

II. Изучение изовекторных состояний в ChEx

- $J^P=1^-$ в $\phi(1020) \pi^0$ (BES-2024)
- $J^P = 1^-, 3^- \dots$ в $\eta'(958) \rho^0$ (BES-2025)

на данных 7-ми экспозиций (2013 - 2024 гг.)

- Ранее: $J^P = 1^-$ и 3^- в $\eta(958) \rho^0$ (BES-2002)

➤ возможное наблюдение образования в ChEx плохо установленного $\rho'(2150)$

II. Изучение изовекторных состояний в ChEx (2)

- Модернизированный ВЕС: ускорение ССД, многокомпонентный триггер, пучковый спектрометр → возможность изучения реакций с фрагментацией мишени.
- Основная характеристика ТГ – распределение по ММ2.
- Ключевой детектор – вето-система.
- Два триггера: MWG – без участия вето, MAIN – с вето (hardware или software)
- В реакциях ChEx с изовекторными системами $\phi \pi^0$ и $\eta' \rho^0$ вклад ТГ доминирует
- В реакции с изоскалярной системой $\omega \phi$ вклад ТГ мал
Это различие требует дальнейшего изучения

II. Изучение изовекторных состояний в ChEx (3)

Роль системы частиц TF и вето в эффективности

- ✓ Хорошее приближение – факторизация по системам частиц BF и TF:

$$\epsilon_{tot}^{trig} = \epsilon_{TF}^{trig} \times \epsilon_{BF}^{trig} \quad \epsilon_{TF}^{MWG} \lesssim 1 \quad \text{вылет продуктов отдачи «вперёд»}$$
$$\epsilon_{TF}^{MAIN} \ll 1 \quad \text{подавление вето}$$

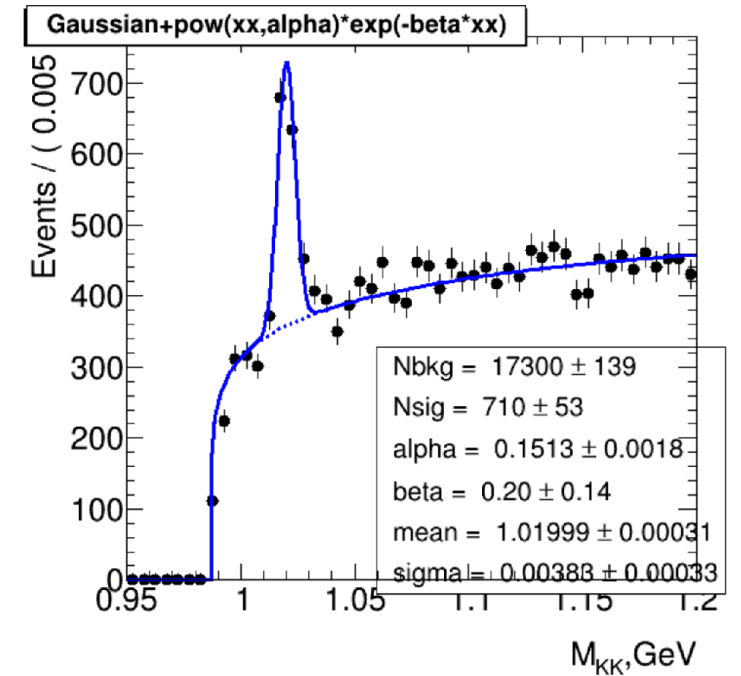
Экономная модель отдачи

- ✓ сумма компонент из подгонки спектра MM2 (ограничено разрешением):
 - нуклон
 - $\Delta(1232)$
 - более тяжёлые барионные возбуждения (« Δ ») для эффективного описания
- ✓ изотопика: исходные нуклоны $n : p = 4 : 5$; коэффициенты Клебша в рождении и распадах
- ✓ 2-х (N π) и 3-х (N $\pi\pi$) -- частичные распады равномерно по фазовому объёму или каскадно $\Delta \rightarrow \Delta(1232) \pi$
- ✓ полярный угол отдачи – согласно t-распределению

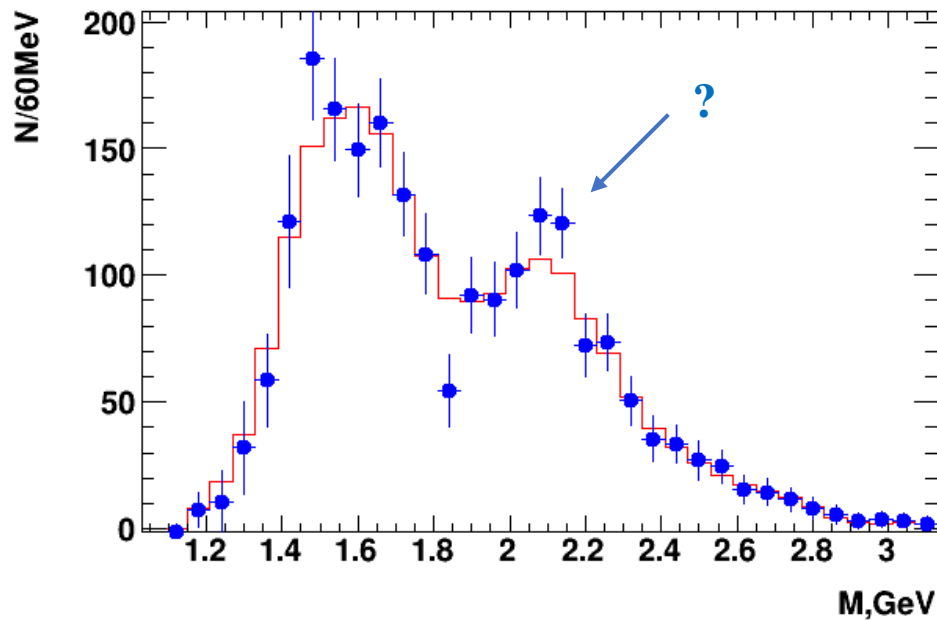
II.1. Изучение системы $\phi\pi^0$ (1)

✓ ВЕС 2024: Physics of Particles and Nuclei Letters v.22 (2025) 1, p.131–136

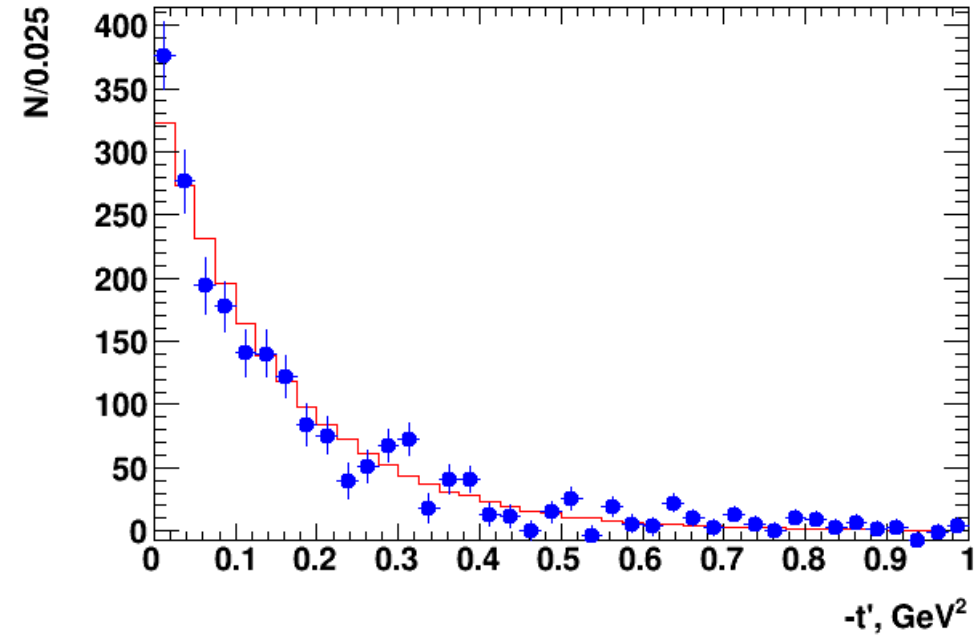
- Вычитание фона не- ϕ ($\rightarrow K^+ K^-$) по одномерным переменным Y ($M(KK\pi)$, t , $\cos \theta_{GJ}$, ...)
- Структурированный спектр масс мезонной системы
- P-волновое состояние с $J^P=1^-$
- t - распределение, проекция спина и натуральность обмена $M^n = 0^-$ совместимы с ОПО
- Доминирует вклад с возбуждением в нижней вершине



II.1. Изучение системы $\phi\pi^0$ (2)



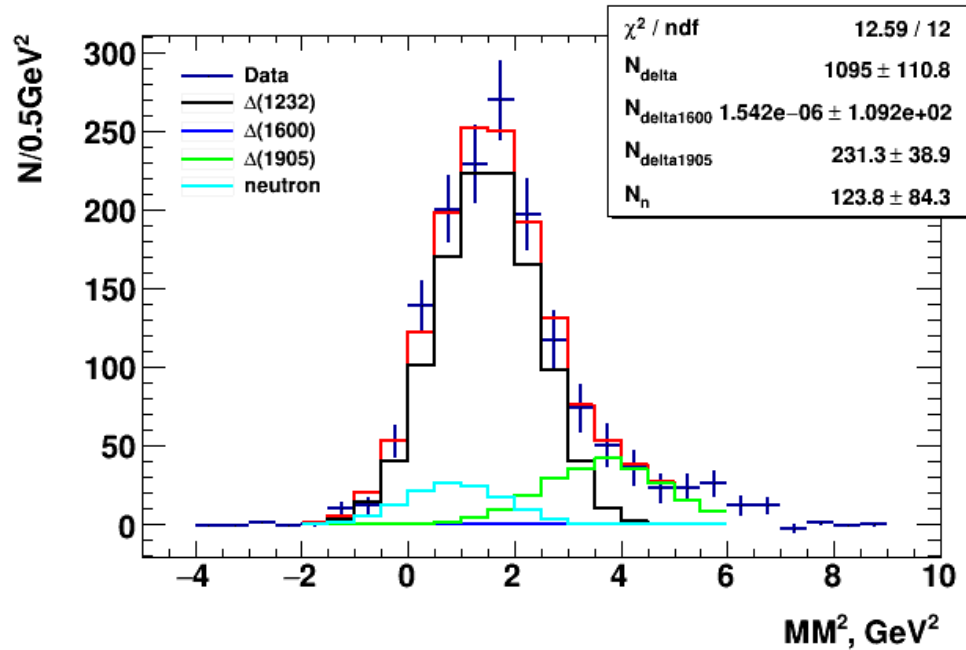
Спектр масс $\phi\pi$



t' – распределение

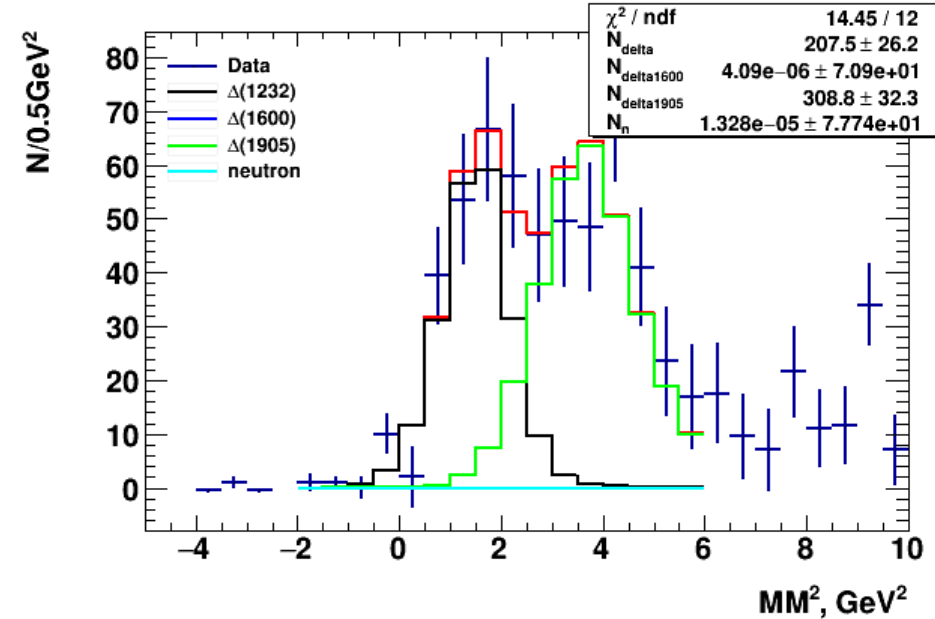
Здесь и далее: точки с ошибками – экспериментальные данные;
красная линия – сглаженные спектры для целей моделирования

II.1. Изучение системы $\phi\pi^0$. Механизмы реакции



Спектр MM^2 и его подгонка.
MAIN (VETO в триггере)

Вклад нейтрона в отдаче мал
(статистически не значим)



Спектр MM^2 и его подгонка.
MWG (нет VETO в триггере)

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

Trig = MAIN (с VETO):

$$\sigma\{\pi^- N \rightarrow \Delta(1232) \phi(1020) \pi^0, 1.2 < M < 2.5 \text{ ГэВ}\} = (2.72 \pm 0.1 \text{ (стат.)}) \text{ мкБн}$$

Trig = MWG (без VETO):

$$\sigma\{\pi^- N \rightarrow \Delta(1232) \phi(1020) \pi^0, 1.2 < M < 2.5 \text{ ГэВ}\} = (0.83 \pm 0.08 \text{ (стат.)}) \text{ мкБн}$$

Усредняя:

$$\sigma\{\pi^- N \rightarrow \Delta(1232) \phi(1020) \pi^0, |t'| < 1 \text{ ГэВ}^2, {}^9\text{Be}\} = 1.78 \pm 0.06 \text{ (стат.)} \pm 0.95 \text{ (сист.) мкБн}$$

Систематика – из неопределённости модели отдачи в нижней вершине

Доля области пика $M > 1.8$ ГэВ -- 40% . В MAIN:

$$\sigma\{\pi^- N \rightarrow \Delta(1232) \phi(1020) \pi^0, M > 1.8 \text{ ГэВ}, |t'| < 1 \text{ ГэВ}^2, {}^9\text{Be}\} = 1.1 \pm 0.04 \text{ (стат.) мкБн}$$

II.1. Система $\phi\pi^0$. Модели описания спектра масс

$$\frac{dN}{dM} = \left| \sum_i \sqrt{N_i} e^{i\varphi_i} A_i(M; \Pi_i) \right|^2$$

Π_i -- параметры амплитуды

Резонансная амплитуда

$$A(M; M_0, \Gamma_0) \propto \frac{M_0 \sqrt{(\Gamma_0 \Gamma)}}{M_0^2 - M^2 - iM_0 \Gamma_0}$$

с парциальной шириной

$$\Gamma = \Gamma_0 \frac{M_0}{M} \frac{q}{q_0} \frac{BF(qR, L=1)}{BF(q_0R, L=1)} \quad (R=5/\text{ГэВ})$$

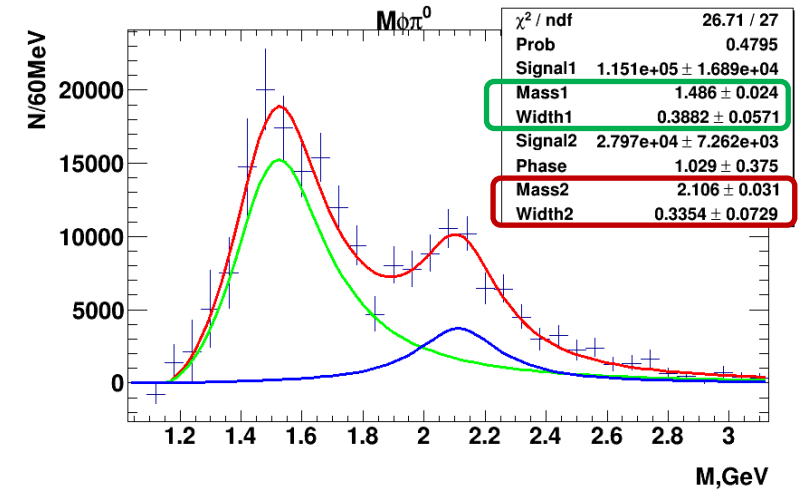
Фоновые амплитуды

$$A(M; \alpha, \beta) \propto (M - M_{thr})^\alpha e^{-\beta M}$$

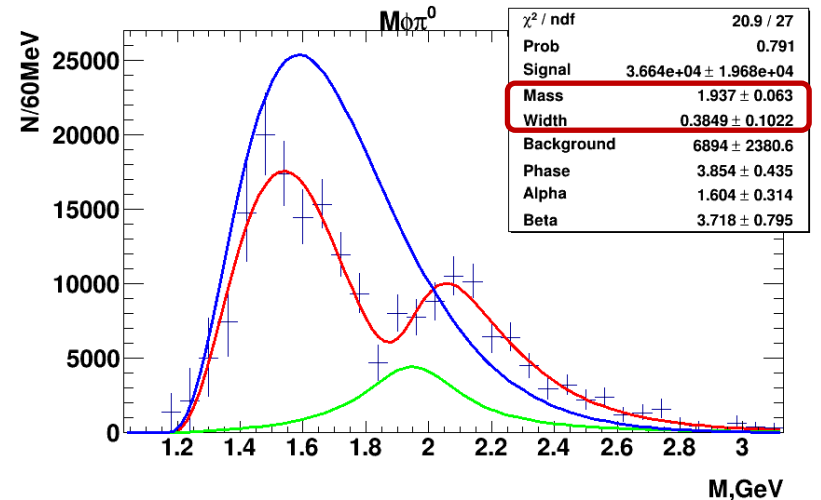
$$A(M; \alpha, \beta) \propto \frac{P^\alpha}{M} (M^2 - M_\rho^2)^\beta$$

- Описания а) $\rho'(1450)$ и тяжёлый @ 2 ГэВ ρ' ;
б) фон и тяжёлый ρ'
- Вклад $\rho'(1700)$ отсутствует
- Параметры сигнала @ 2.1 ГэВ:
 $M_0 = 2.05 \pm 0.05$ (стат.) ± 0.1 (сист.) ГэВ
 $\Gamma_0 = 0.3 - 0.4$ ГэВ

PDG-совместимый $\rho'(1450) + R$



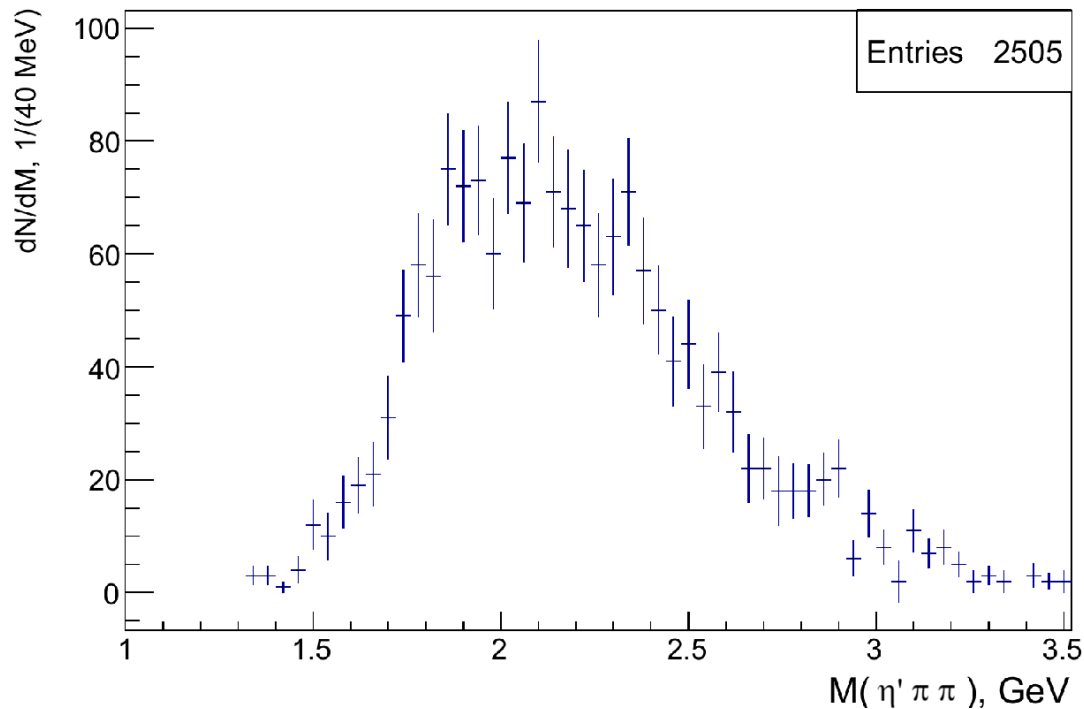
фон + R



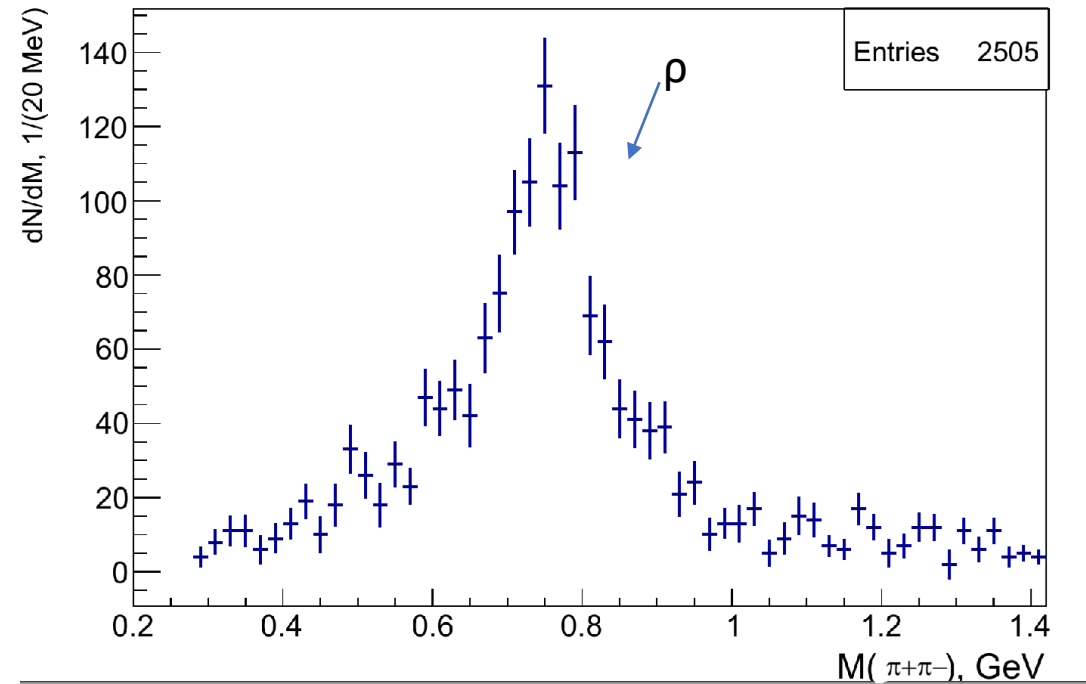
II.2 Изучение системы $\eta'(958) \pi^+ \pi^-$

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

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



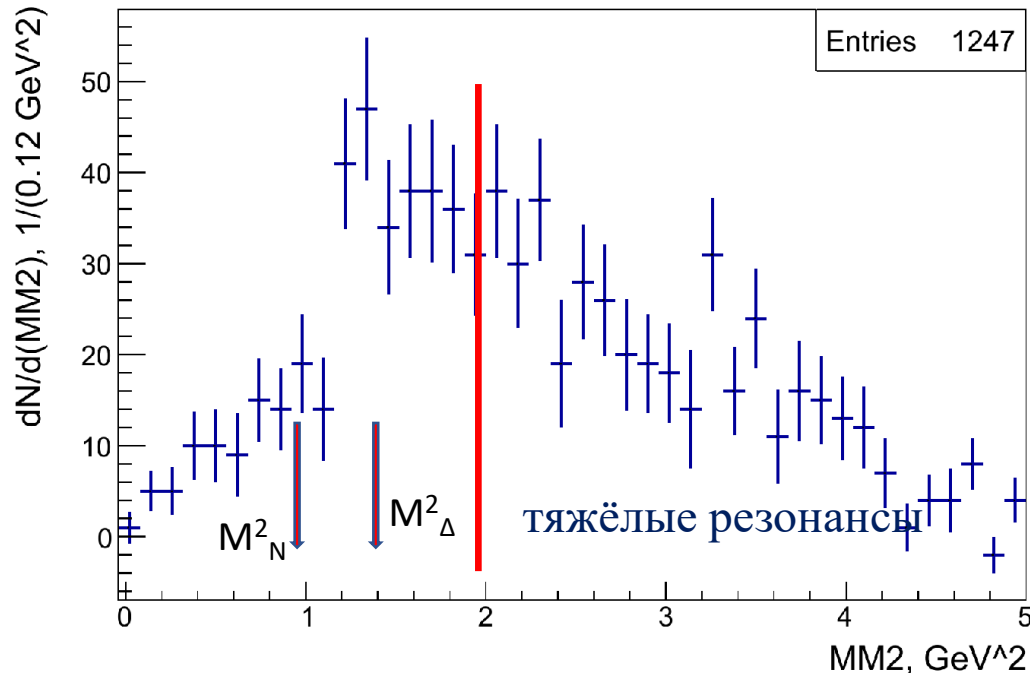
Спектр массы $\pi^+ \pi^-$
Trig = MAIN



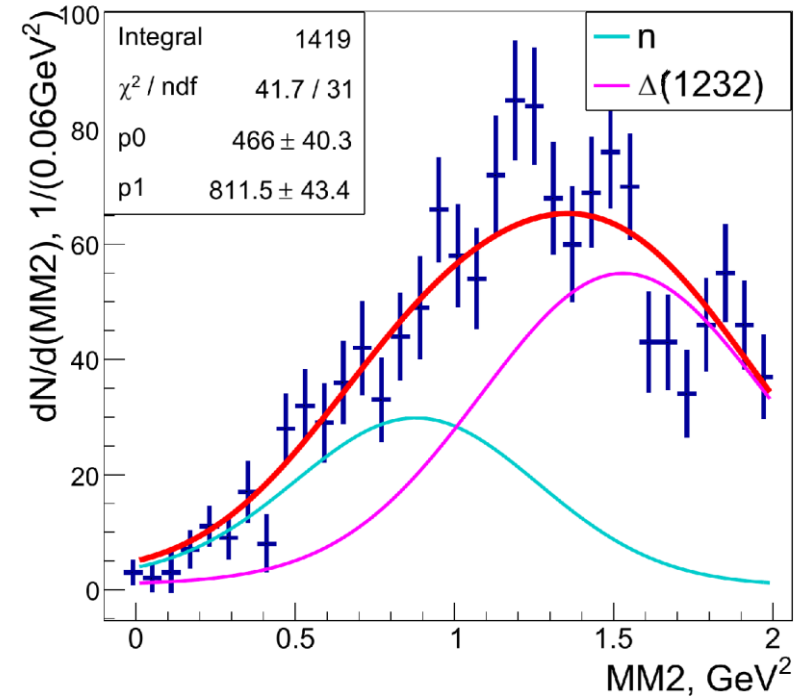
Состояние $I=1$ ($C=-1$) $\rho \eta'$ доминирует в $\eta' \pi \pi$

II.2 Система $\eta'(958) \pi^+\pi^-$. Спектр MM2

Trig= MWG (без вето)



MAIN (с вето)



- Фрагментация мишени доминирует, нуклонная компонента значима
- Результирующее отношение двух компонент в исходной смеси $n : \Delta(1232) = 0.14$
- ❖ Как и в случае $\phi\pi^0$, вклад $\Delta(1600)$ нулевой

$$\sigma\{\pi^- N \rightarrow \Delta(1232) \eta' \pi^+ \pi^-, |t'| < 0.2 \text{ ГэВ}^2, {}^9\text{Ве}\} = (12.5 \pm 1.9 \text{ (стат.)}) \text{ мкБн}$$

Для сравнения с $\phi \pi^0$

$$\sigma\{\pi^- p \rightarrow n \eta' \pi^+ \pi^-, |t'| < 0.2 \text{ ГэВ}^2, {}^9\text{Ве}\} = (1.92 \pm 0.21 \text{ (стат.)}) \text{ мкБн}$$

Пересчёт на нуклон: $\propto Z^2/3$



$$\sigma\{\pi^- p \rightarrow n \eta' \pi^+ \pi^-, |t'| < 0.2 \text{ ГэВ}^2\} = (0.77 \pm 0.08 \text{ (стат.)}) \text{ мкБн}$$

Для сравнения с $\eta(547) \pi^+ \pi^-$ и $\omega \pi^0$

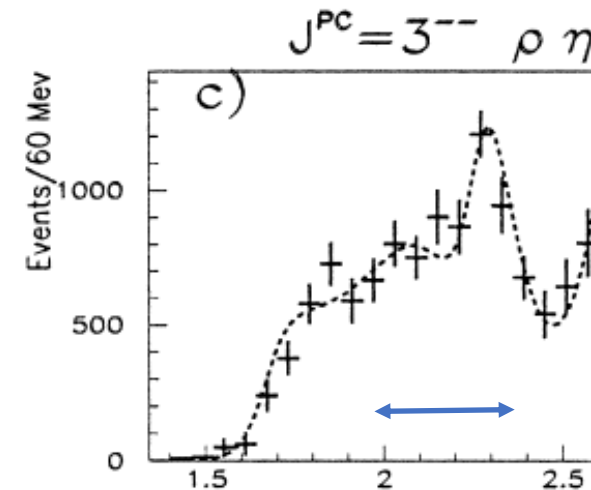
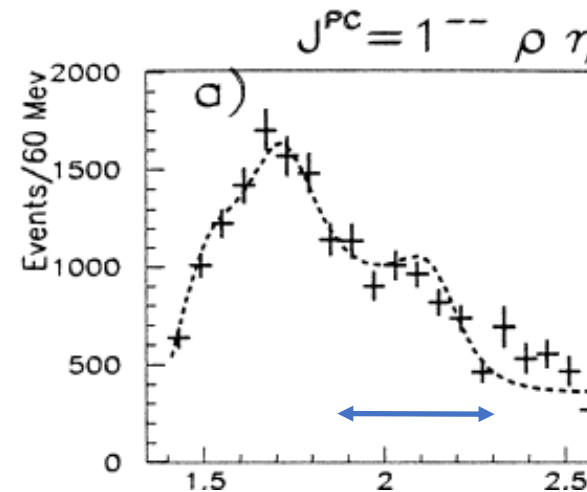
II. Обсуждение. 3 системы в ChEx на BES

- $\phi\pi^0$: $J^{PC} = 1^{--}$ с пиком @ $M \approx 2.1$ ГэВ ($M_0 = 2.05 \pm 0.05$ (стат.) ± 0.1 (сист.) ГэВ, $\Gamma_0 = 0.3 - 0.5$ ГэВ)
- $\eta' \rho^0$ с широким максимумом @ ~ 2.1 ГэВ:
 - $C = -1$
 - В ОПО $\pi\pi \rightarrow R$ с натуральной J^P ($0^+, 1^-, \dots$)
 - с исключением $q\bar{q}$ экзотики $J^{PC} = 0^{++}, 2^{++} \dots$ остаются $J^{PC} = 1^{--}, 3^{--}, \dots$
- ПВА похожей системы $\eta \pi^+\pi^-$ при $P=37$ GeV (BES-2000, NP A 668 (2000) 83-96):
в ОПО-совместимом секторе с натуральностью обмена $\eta = -1$ основные волны $1^{--}, 3^{--} \rho\eta$

Грубая оценка сечения ($|t| < 0.2$ ГэВ², $P=29$ ГэВ)

$$\sigma(\pi^- p \rightarrow n \rho\eta \quad 1^{--}; \quad 1.9\text{--}2.3 \text{ ГэВ}) \approx 0.8 \text{ мкБ}$$

$$\sigma(\pi^- p \rightarrow n \rho\eta \{1^{--} + 3^{--}\}; 1.9\text{--}2.3 \text{ ГэВ}) \approx 2.4 \text{ мкБ}$$



II. Обсуждение. $\rho'(2150)$ на BES ?

Подходящий кандидат в 1^{--} : $\rho'(2150)$

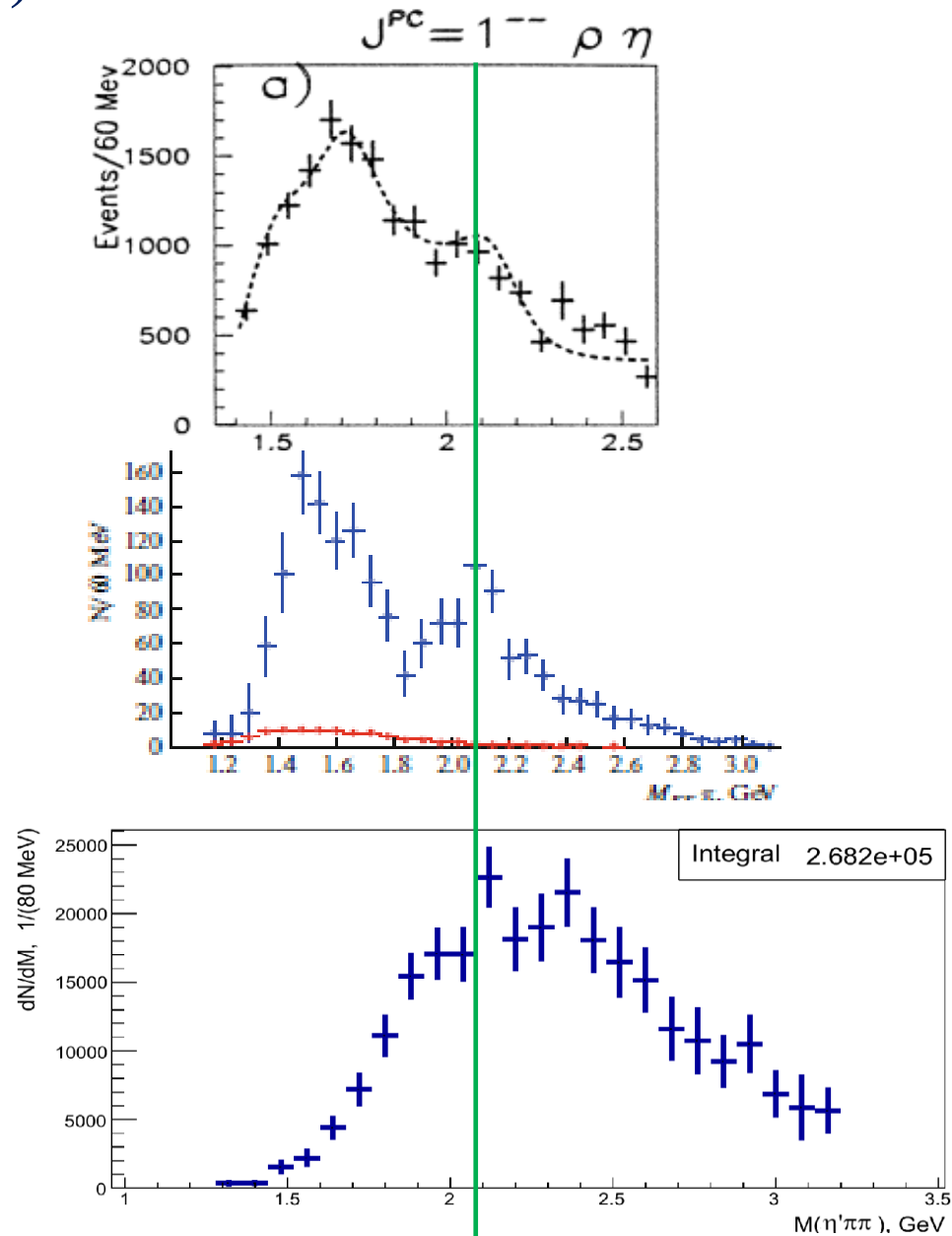
BES, 2000 1^{--} в $\eta\rho^0$

($\eta\rho^-$? доклад А.Шумакова на ФЧСВЭ)

BES, 2024 1^{--} в $\phi\pi^0$

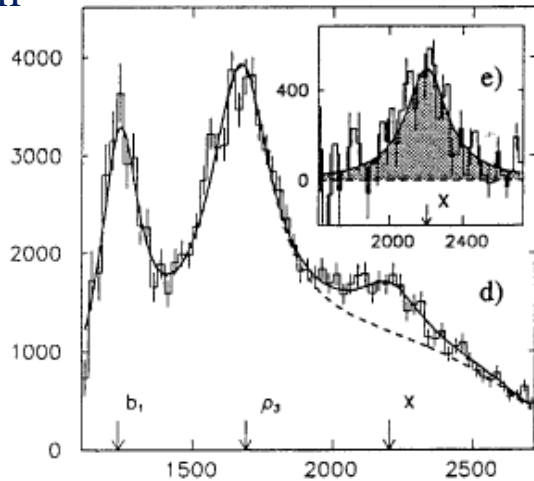
BES, 2025 $\eta'\rho^0$ ожидается 1^{--}

от 100% до 30% подобно $\eta\rho^0$?



II. Обсуждение. $\rho'(2150)$

ChEx (ГАМС @38 & @100 ГэВ): оценка
 $\sigma(\pi^- p \rightarrow n X J^P=1^-, p=29 \text{ GeV}) \cdot \text{BR}(X \rightarrow \omega \pi^0) =$
 $0.52 \pm 0.1 \text{ мкБн}$



e^+e^- (BESIII): оценка для двух моделей фита

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

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

$\rho(2150)$

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

OMITTED FROM SUMMARY TABLE

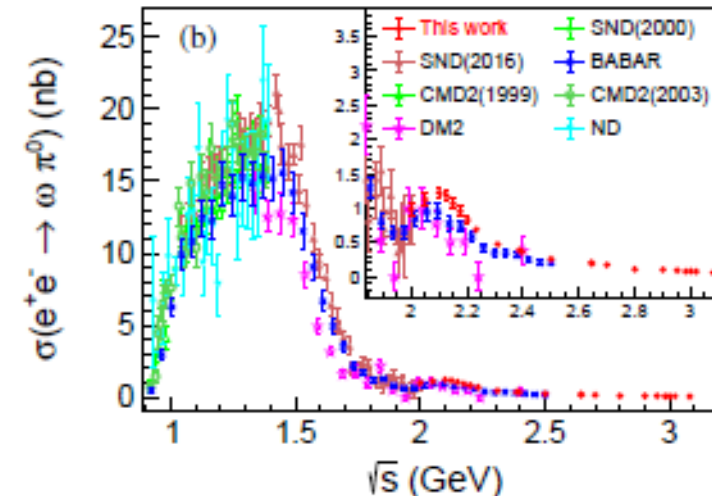
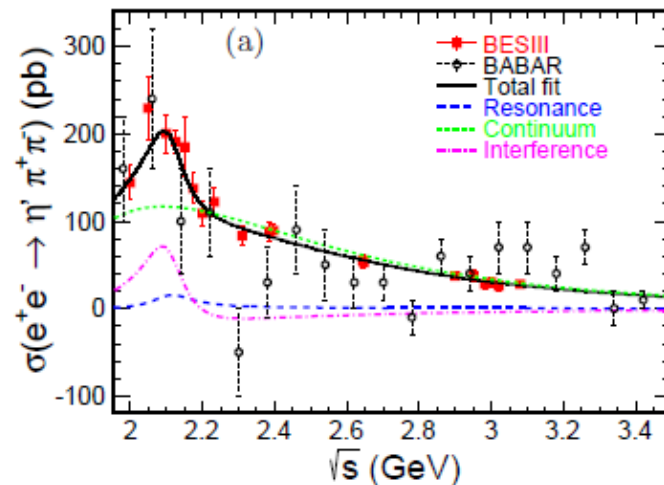
This entry was previously called $T_1(2190)$. See the review on "Spectroscopy of Light Meson Resonances."

$\rho(2150)$ MASS

e^+e^- PRODUCED

VALUE (MeV)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
2034 ± 13 ± 9		1 ABLIKIM	21A	BES3 $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$
2111 ± 43 ± 25		2 ABLIKIM	21X	BES3 $e^+e^- \rightarrow \eta'\pi^+\pi^-$

••• We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. •••



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реакции ChEx/ОПО на ВЕС – важный источник экспериментальных данных по спектроскопии в области масс до ~ 3 ГэВ

- ✓ Изучено образование $f_0(1710/1770)$ в системе $\omega\phi$ с параметрами, свидетельствующими о его глобальной природе
- ✓ При интерпретация сигналов в $\eta\rho^0$, $\eta'\rho^0$, $\phi\pi^0$ в области ~ 2.1 ГэВ как $\rho'(2150)$ получены отношения вероятностей его распадов по каналам:

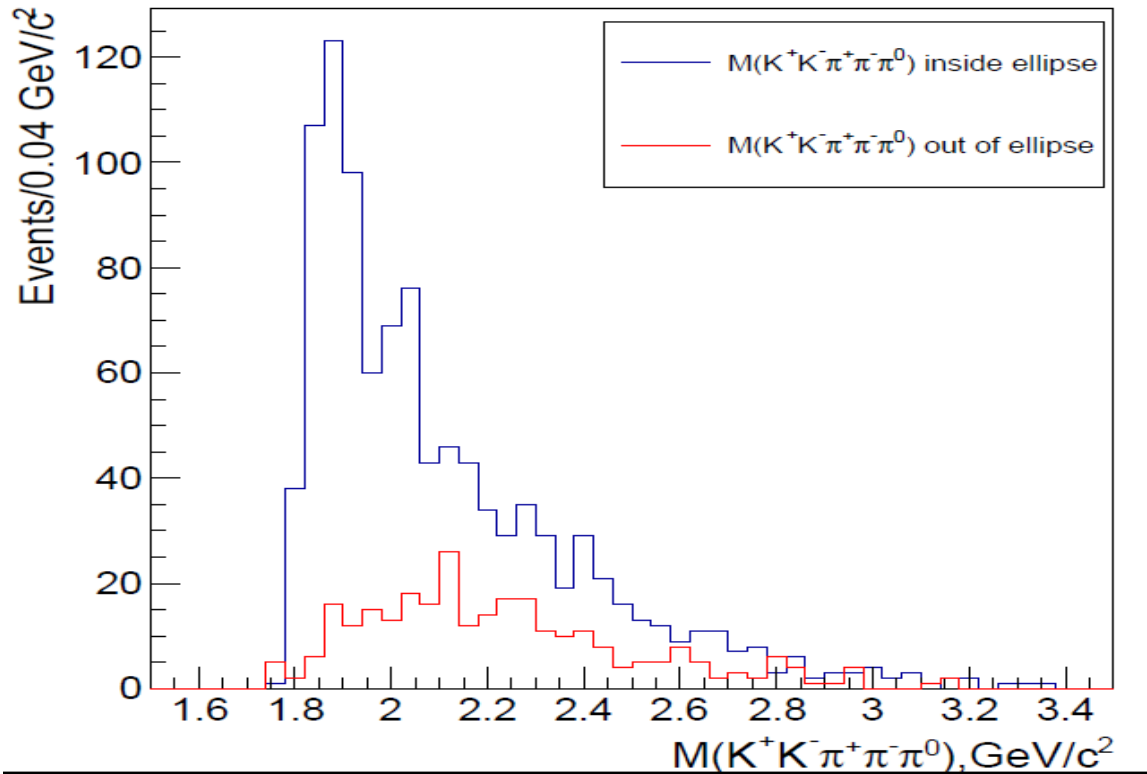
$$\eta\rho^0 : \eta'\rho^0 : \omega\pi^0 : \phi\pi^0 = 1 : (0.3 \div 1) : 0.6 : 0.06$$

Дополнительные слайды

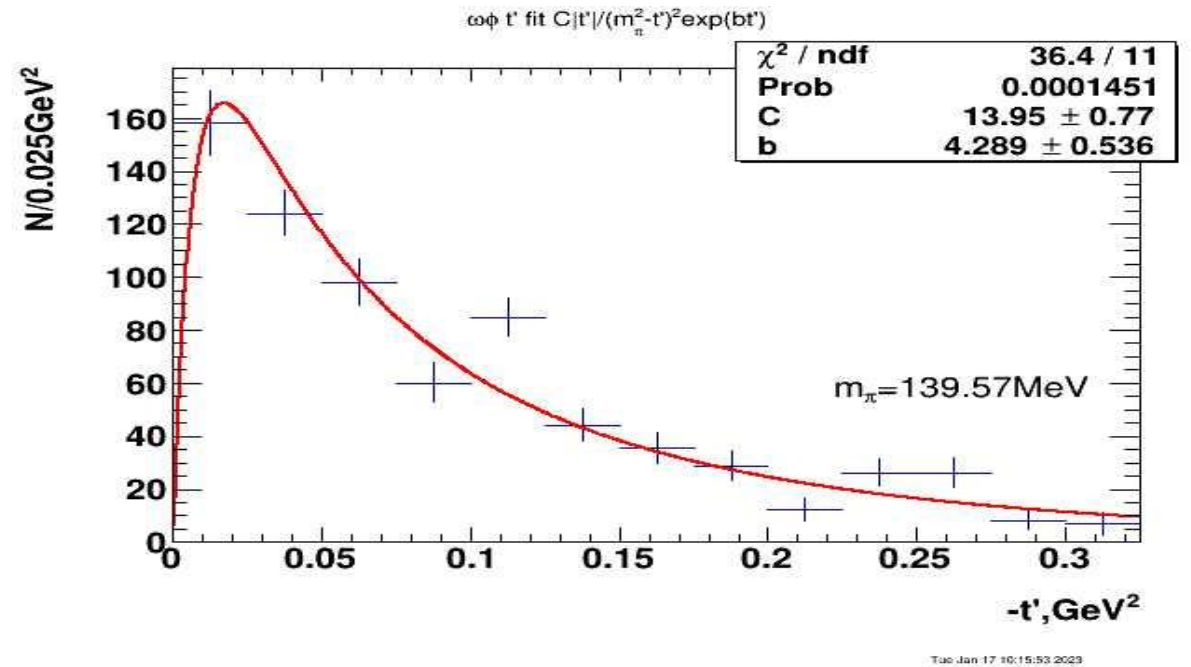
Некоторые характеристики ВЕС

- Пучок: 2 млн/с, разброс $p \pm 1\%$; состав: 98% π , 1.6% K, 0.2% \bar{p}
- Пучковый спектрометр: точность 0.7%
- Спектрометрический магнит: $H \times V \sim 2 \times 1 \text{ м}^2$, $B \times L \sim 1.5 \text{ Т} \cdot \text{м}$
- Основной импульсный спектрометр: 0.5% (1.2%) @3 ГэВ (25 ГэВ)
- Ch28: порог $\pi \sim 3.5 \text{ ГэВ}$; ~ 4 ф.э. в макс.
- «Прозрачность» к γ : $< 15\% X_0$ до ЭМК
- ЭМК: разрешение $dE/E \approx 4\%$ и $dX \approx 3.2 \text{ мм}$ @5 ГэВ

Характеристики событий реакции образования $\omega\phi$



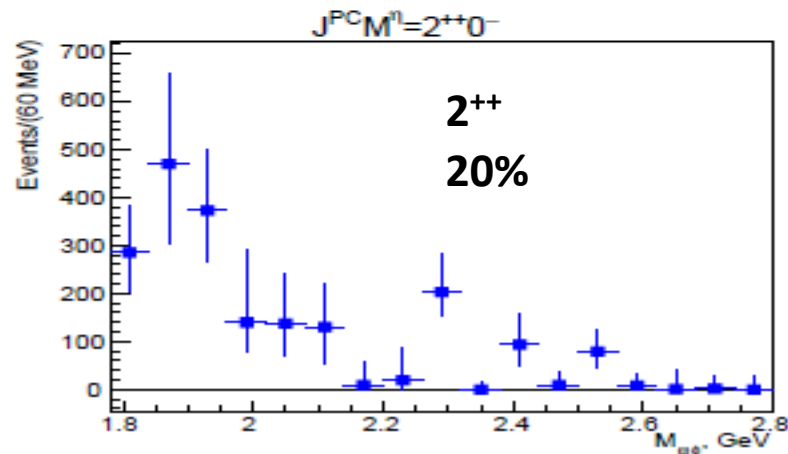
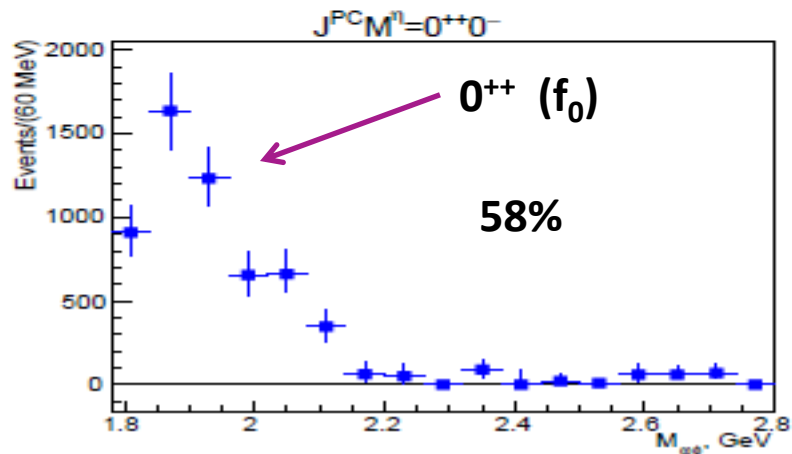
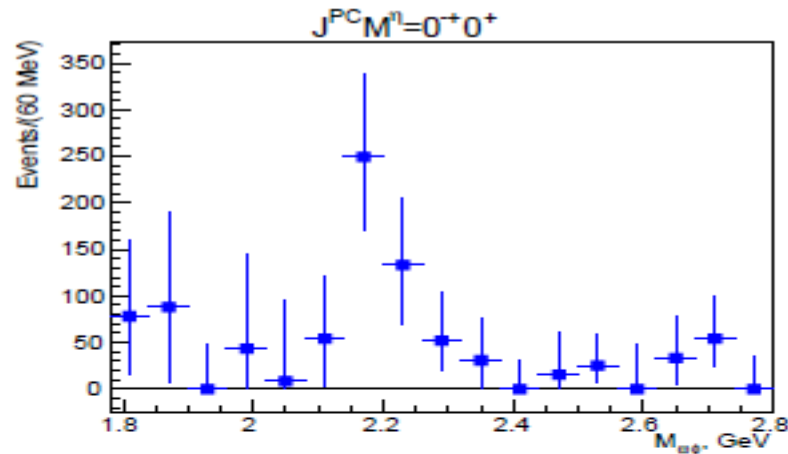
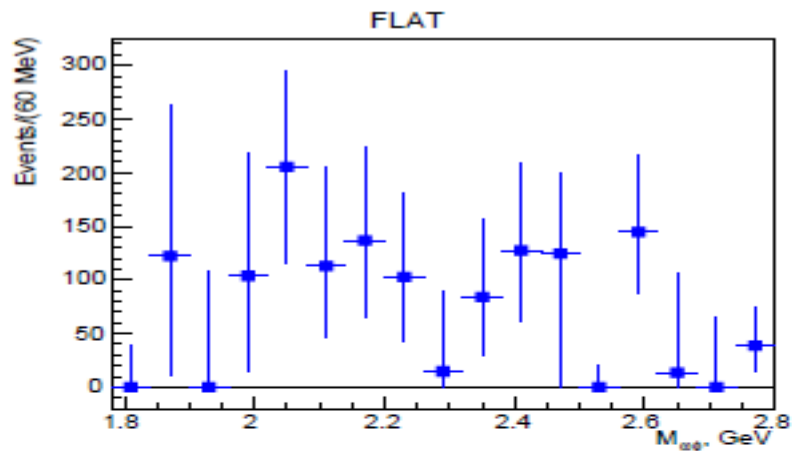
Спектр масс системы мезонов в **сигнальной** и **фоновой** областях



t – распределение и OPE фит

Основная подгонка ПВА $\omega\phi$

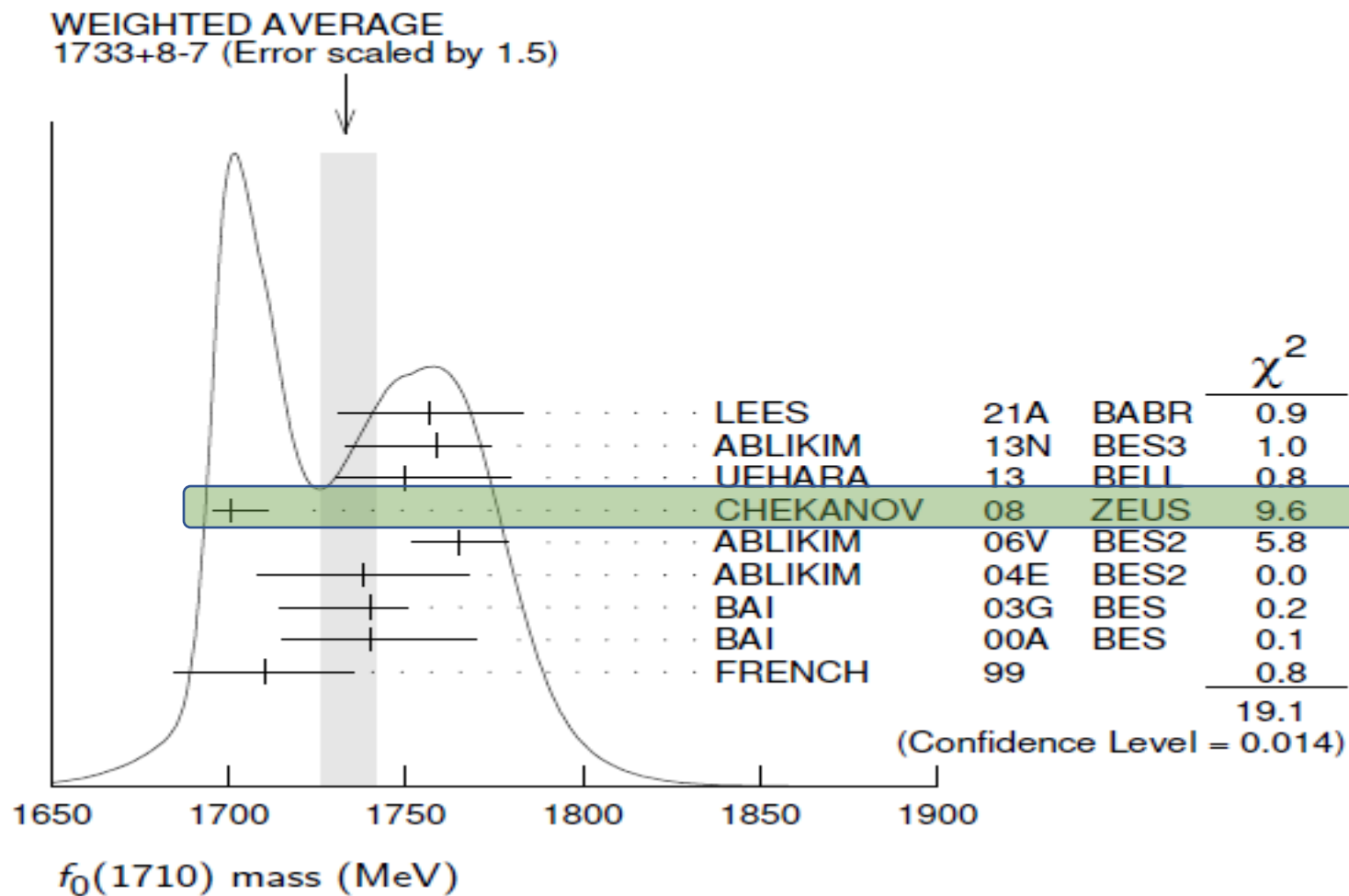
($t < 0.15 \text{ ГэВ}^2$, 580 событий)



Доминирование волн UPE
совместимо с OPE

Масса $f_0(1710)$ в PDG

Citation: R.L. Workman *et al.* (Particle Data Group), Prog.Theor.Exp.Phys. **2022**, 083C01 (2022)



Масса $gg\ 0^+$

Вычисления «на решетке»

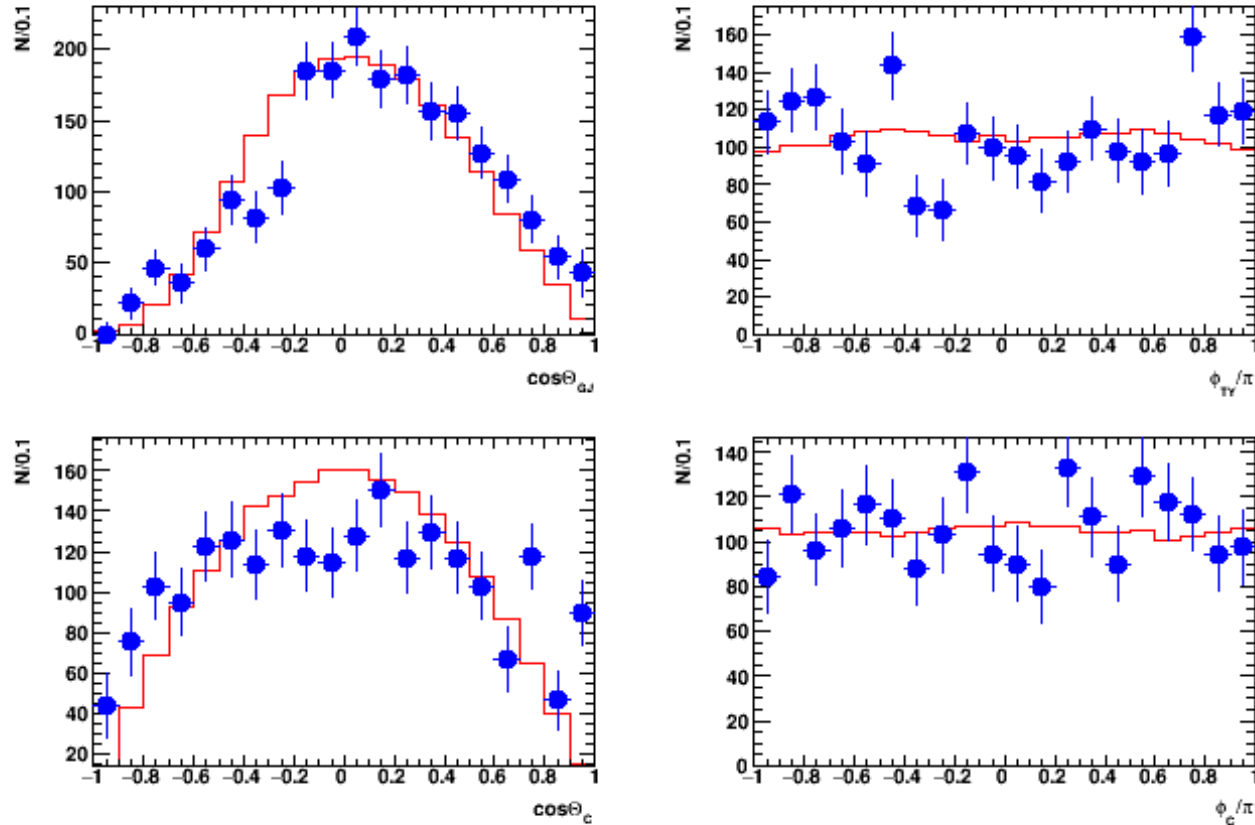
TABLE I: Scalar glueball masses (in units of MeV) in quenched (top) and unquenched (bottom) lattice QCD.

Bali <i>et al.</i> (1993) [34]	1550 ± 50
H. Chen <i>et al.</i> (1994) [37]	1740 ± 71
Morningstar, Peardon (1999) [38]	$1730 \pm 50 \pm 80$
Vaccarino, Weingarten (1999) [39]	1648 ± 58
Loan <i>et al.</i> (2005) [40]	1654 ± 83
Y. Chen <i>et al.</i> (2006) [33]	$1710 \pm 50 \pm 80$
Gregory <i>et al.</i> (2012) [41]	1795 ± 60

Свойства системы $\phi\pi^0$

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

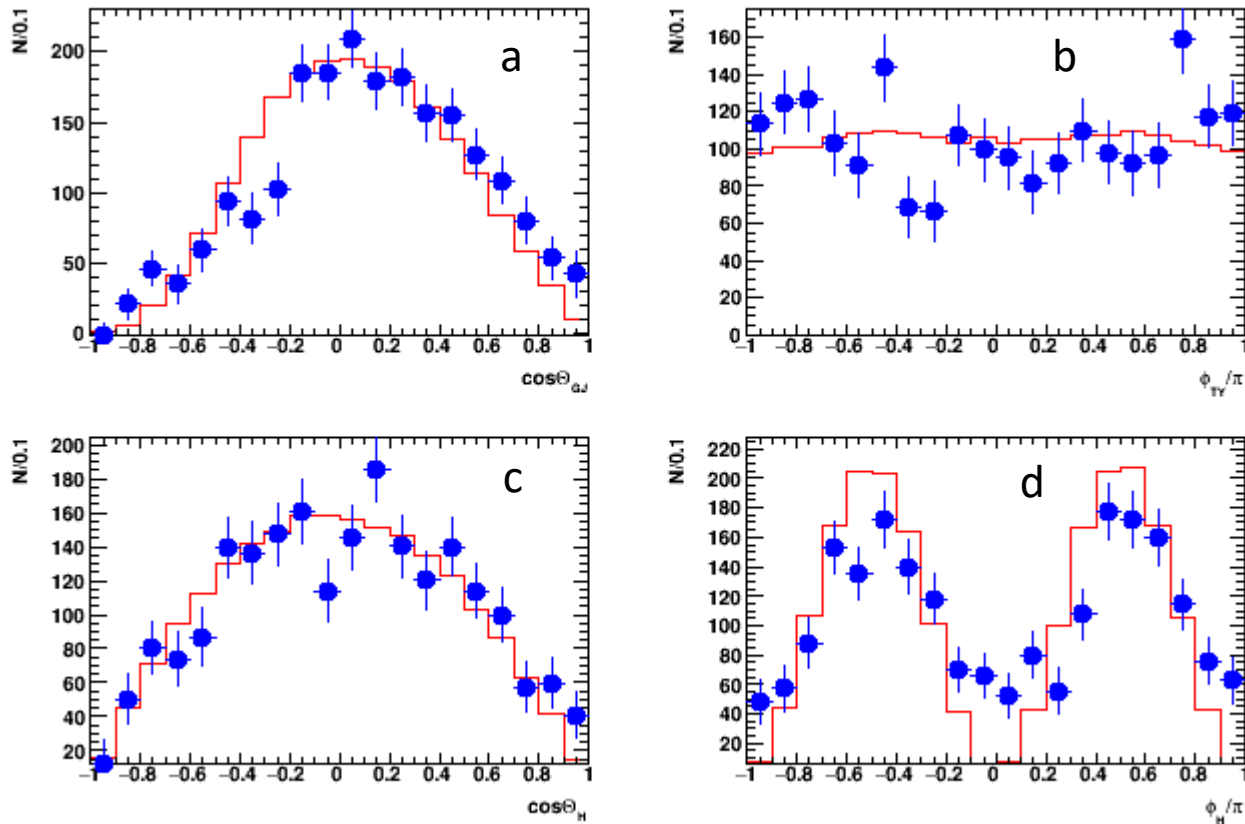
$$A = \vec{P}_{\pi^0} \times \vec{P}_{K^-} = P_{\pi^0} \cdot P_{K^-} \sin \Theta_{\pi^0} \sin \Theta_{CK^-} \sin(\phi_{CK^-} - \phi_{\pi^0})$$



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

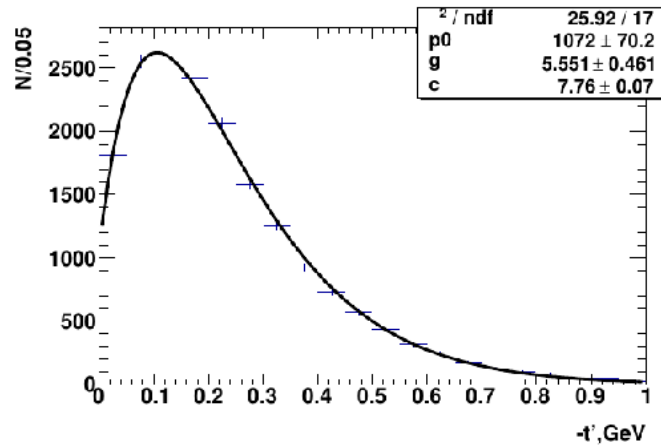
Свойства системы $\phi\pi^0$

Для К-мезона используется спиральная СК (вместо канонической)

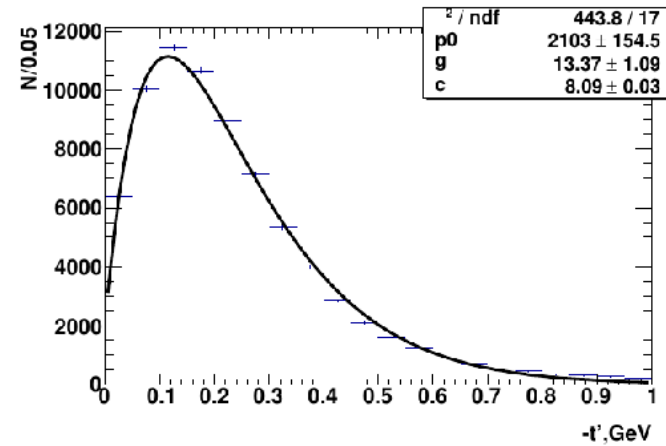


a) $\text{Cos}\theta_{GJ}(\pi^0)$, b) ϕ/π (π^0), c) $\text{Cos}\theta_H(K^-)$, d) ϕ_H/π (K^-)

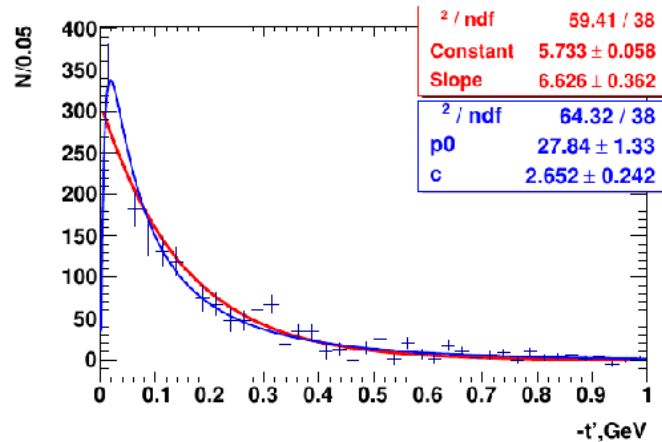
Распределение по квадрату переданного 4-х импульса t'



(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
 $|t'| / (t' - m_\pi^2)^2 \cdot \exp(c \cdot t')$

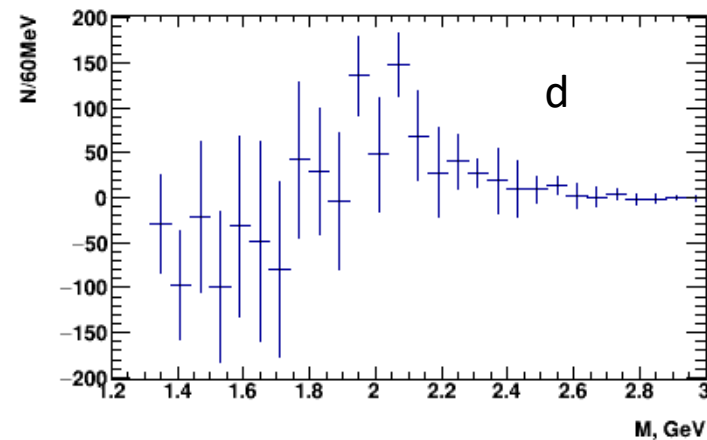
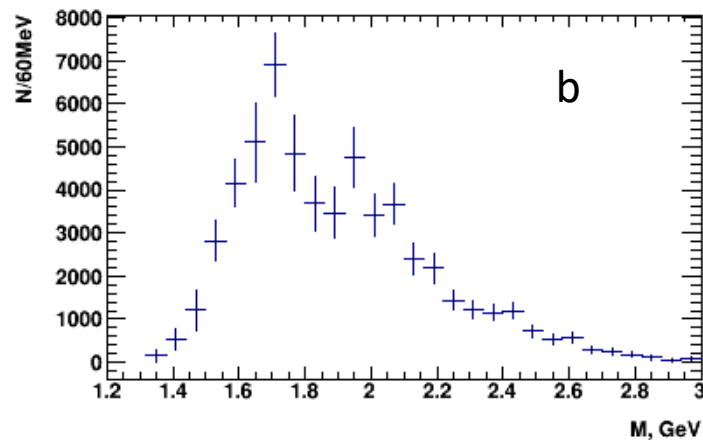
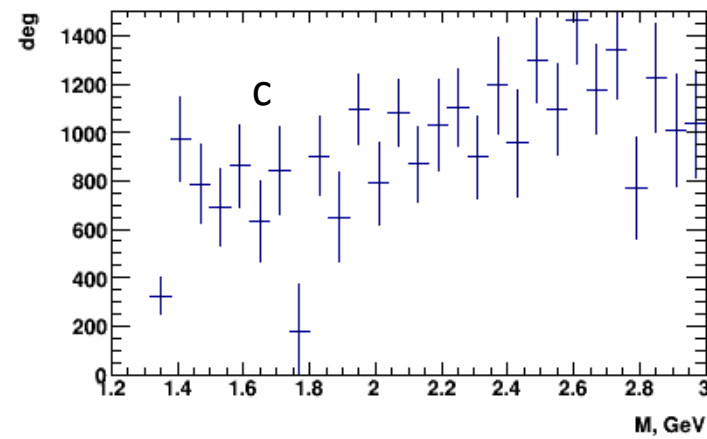
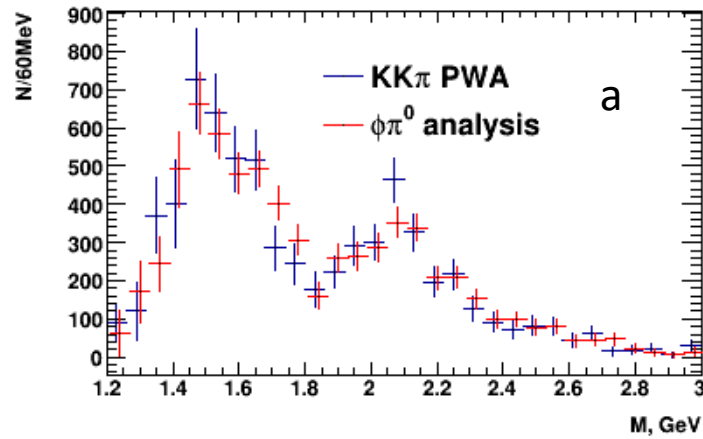
Система $\phi\pi^0$: 3-х-частичный ПВА $K^+K^-\pi^0$

- Матрица плотности размера d без ограничения ранга $\rho = \sum_k^d V_k V_k^+$ в базисе reflectivity
- Нотация волн: $J^P LM\eta R$ (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 $1^1P_0^- \phi$, $I=1$ -- 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 $1P0$ ϕ ; b) интенсивность $1P0$ $K^*(892)a$;
c) относительная фаза двух волн; d) интерференция двух волн