

Изучение образования  $\phi\pi^0$ -системы в реакции  
перезарядки 29 ГэВ-ного пионного пучка на  
бериллиевой мишени установки ВЕС

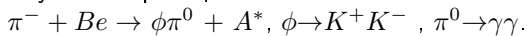
Дорофеев В. А.  
от имени сотрудничества ВЕС

НИЦ "Курчатовский институт" - Институт физики высоких энергий  
Лаборатория адронной спектроскопии

03.04.2024

# Введение

Изучаемая реакция



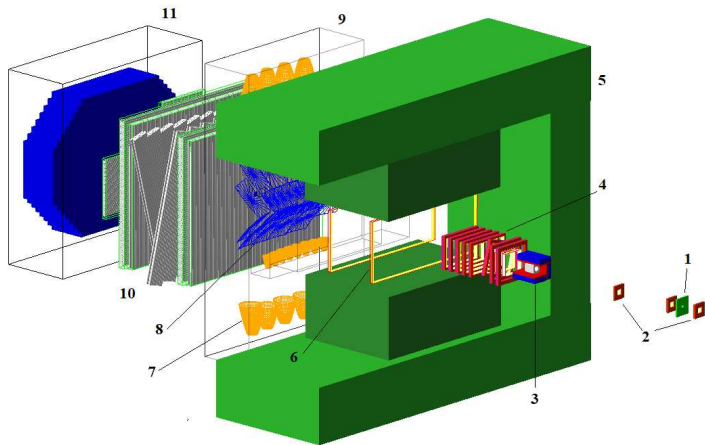
$\phi\pi^0$ -система  $I = 1 \Rightarrow$  состоит из  $q\bar{q}s\bar{s} \Rightarrow$  OZI подавление

Набор квантовых чисел  $\phi\pi^0$ -системы

L	S	P	D	F
$J^{PC}$	$1^{+-}$	$0^{--}$ $1^{--}$ $2^{--}$	$1^{+-}$ $2^{+-}$ $3^{+-}$	$2^{--}$ $3^{--}$ $4^{--}$
	$b_1$	non $q\bar{q}$ $\rho_1$ $\rho_2$	$b_1$ non $q\bar{q}$ $b_3$	$\rho_2$ $\rho_3$ $\rho_4$

- Лептон-Ф(ИФВЭ)  $\pi^- + LiH \rightarrow K^+K^-\pi^0 + A^*$  @32.5ГэВ  
 $N = 349 \pm 46$ ,  $C(1480)$ ,  $\Gamma = 130 \pm 60$ МэВ,  $BR(\phi\pi)/BR(\omega\pi) > 0.5$
- E852(BNL)  $\pi^- + p \rightarrow K^+K^-\pi^0 + n$  @18ГэВ  $N \sim 1000$   $M_{\phi\pi} < 1.75$ ГэВ
- BaBar,SND,BESIII  $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}\pi^0$

# Установка ВЕС



Ось z - вдоль пучка, y - вверх, x - до правой тройки

- MWG:  $S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \overline{A_{10}} \cdot \overline{A_{11}} \cdot \overline{K_1} \cdot \overline{K_2}$
- MAIN:  $\text{MWG} \cdot \overline{\text{TargetVeto}}$

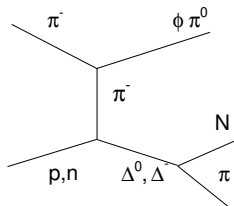
# Данные и Монте-Карло

Анализировались данные экспозиции  $2.5 \cdot 10^{11}$  пучковых частиц без учета мертвого времени.

Распределение данных по сеансам

Сеансы	run44	run45	run47	run48	run59	сумма
	2012	2013	2015	2015	2022	
MAIN, $10^9$	2.20	1.46	1.08	1.29	0.87	6.90
MWG, $10^8$	0.15	0.10	1.50	1.90	1.58	5.23

Сгенерированы наборы событий образования  $\phi\pi^0$  в волне  $J^P M^\eta = 1^-0^-$  с  $\Delta(1232)$  и  $\phi\rho^-$  в волне  $J^P M^\eta LS = 2^-0^+ P2$  с нуклоном.



$$\frac{dN_{Be}}{dx} = NF \cdot \left( 4/3 \cdot \frac{dN_0}{dx} + 5 \cdot \frac{dN_-}{dx} \right)$$

$$|\pi^- p \rangle = 1/\sqrt{3} |3/2 - 1/2 \rangle - \sqrt{2/3} |1/2 - 1/2 \rangle$$

$$|\pi^- n \rangle = |3/2 - 3/2 \rangle$$

# Отборы событий $\pi + Be \rightarrow K^+K^-\pi^0 + A^*$

Отбор событий  $\pi + Be \rightarrow h^+h^-\pi^0 + A^*$  из реконструированных данных:

- флаг успешной реконструкции
- метка триггера MAIN
- 1 вершина  $\Rightarrow$  1 пучковая частица идентифицированная как  $\pi$ -мезон
- z-координата вершины совпадает с геометрическим положением мишени
- 2 противоположно заряженных трека в магнитном спектрометре
- 2-3 фотона с  $|m_{\gamma\gamma} - m_{\pi^0}| < 20\text{МэВ}$ . Энергия неспаренного  $E_\gamma < 0.5\text{ГэВ}$
- Проекция импульса  $h^+h^-\pi^0$ -системы на направление пучка  $P_{xL}$ .  
 $26 \leq P_{xL} < 30\text{ГэВ}$
- отсутствие коротких треков в камерах стоящих сразу за мишенью

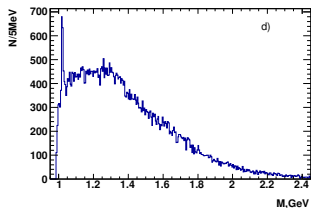
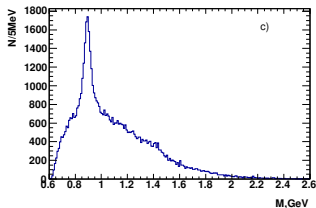
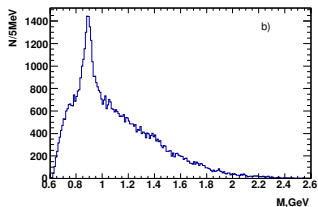
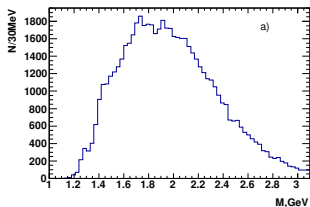
Амплитудный метод идентификации заряженных частиц с 4 гипотезами  $\pi\pi, \pi K, K\pi, KK$ .

Критерий идентификации:

отношение 2-й по величине вероятности к максимальной  $\alpha = \frac{P(\text{hyp})_{next}}{P(\text{hyp})_{max}} \leq 0.4$

Вклад  $e, \pi$  пренебрежимо мал.

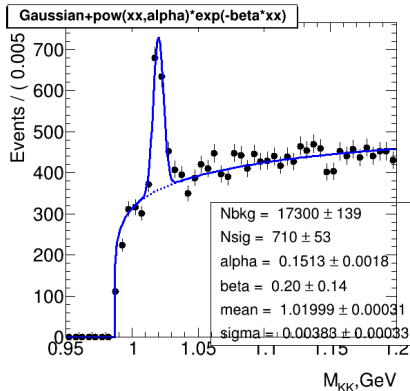
# Характеристика событий $K^+K^-\pi^0$



Wed Mar 13 09:57:06 2024

Спектры масс а)  $K^+K^-\pi^0$ , б)  $K^+\pi^0$ , в)  $K^-\pi^0$ , г)  $K^+K^-$ ,

# Выделение $\phi\pi^0$ -системы в событиях $K^+K^-\pi^0$



Интервалы в процедуре вычитания фона:

- левый фоновый

$$1.000 \leq M_{KK} < 1.010 \text{ ГэВ}$$

- сигнальный

$$1.015 \leq M_{KK} < 1.025 \text{ ГэВ}$$

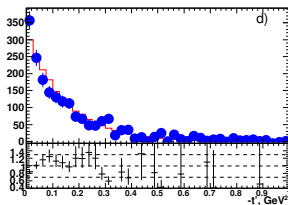
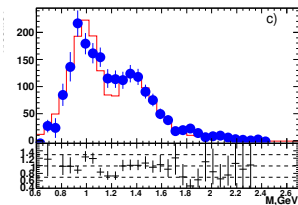
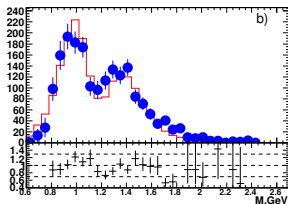
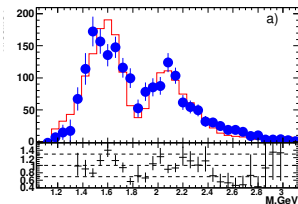
- правый фоновый

$$1.030 \leq M_{KK} < 1.040 \text{ ГэВ}$$

	run44	run45	run47	run48	run59
M	$1020.0 \pm 0.3$	$1020.2 \pm 0.4$	$1019.9 \pm 0.5$	$1020.1 \pm 0.4$	$1019.9 \pm 0.5$
$\sigma$	$3.8 \pm 0.3$	$4.0 \pm 0.4$	$4.6 \pm 0.6$	$3.9 \pm 0.4$	$4.9 \pm 0.6$
N	$710 \pm 53$	$543 \pm 46$	$362 \pm 40$	$400 \pm 38$	$388 \pm 41$

Параметры пика и количество  $\phi$ -мезона в сеансах

# Свойства событий с $\phi\pi^0$ 1



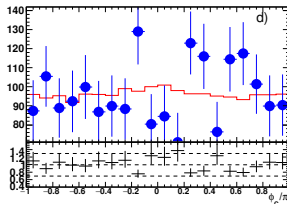
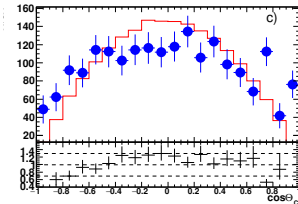
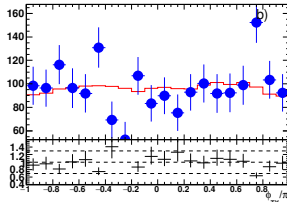
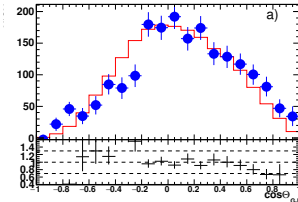
Спектры масс а)- $K^+K^-\pi^0$ , б)- $K^+\pi^0$ , в)- $K^-\pi^0$ , г)- $-t'$ . Красным - МК  $\phi\pi^0$  в  $1^-0^-$  волне с  $\Delta^0$ . Синим - непоправленные на эффективность данные



# Свойства событий с $\phi\pi^0$ 2

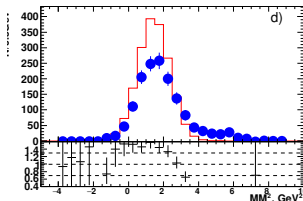
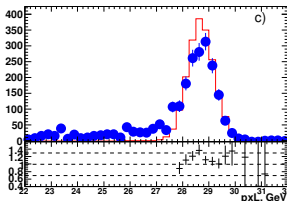
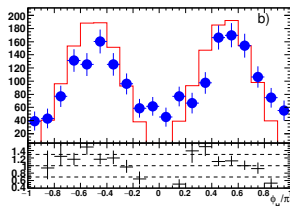
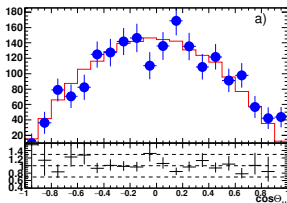
В формализме Земаха амплитуда распада  $J^P M^\eta = 1^- 0^- \rightarrow 1^- + 0^-$  :

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



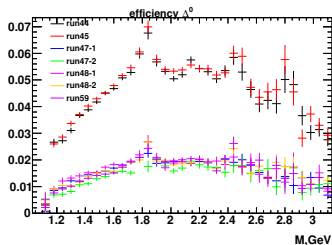
a)  $-\cos \Theta_{\pi^0}$ , b)  $-\phi_{\pi^0}/\pi$ , c)  $-\cos \Theta_{CK^-}$ , d)  $-\phi_{CK^-}/\pi$

# Свойства событий с $\phi\pi^0$ 3

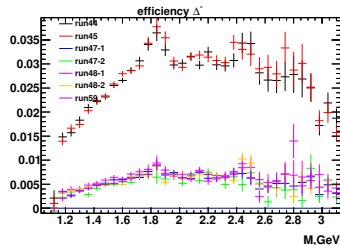


a)  $-\cos \Theta_{HK-}$ , b)  $\phi_{HK-}/\pi$ , c)  $P_{xL}$ , d)  $MM^2$

# Эффективности регистрации $J^P M^\eta = 1^- 0^- \phi \pi^0$

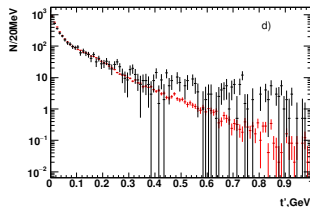
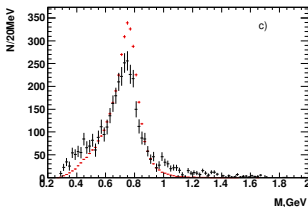
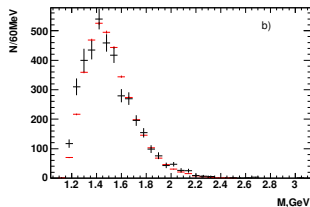
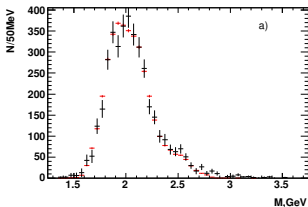


(a) с  $\Delta^0(1232)$  изобарой



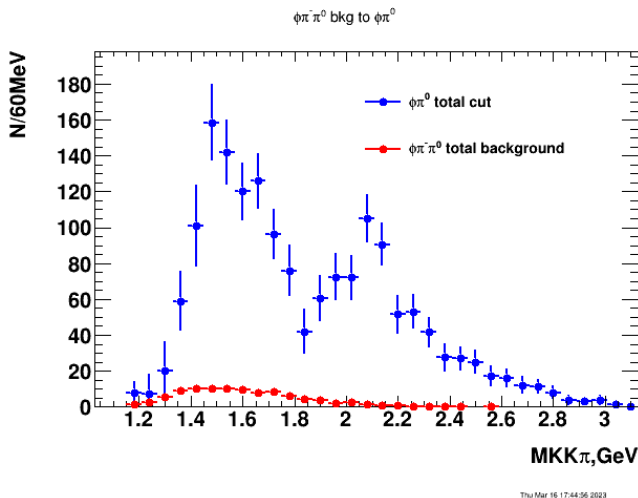
(b) с  $\Delta^-(1232)$  изобарой

# Фон. Свойства $\phi\pi^-\pi^0$ -системы 1



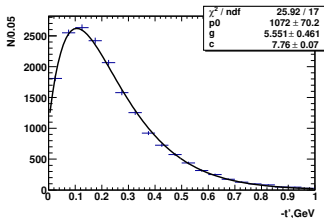
Спектры масс а)- $K^+K^-\pi^-\pi^0$ , б)- $K^+K^-\pi^0$ , в)- $\pi^-\pi^0$ . д)-  $-t'$ . Красным - МК  $\phi\rho^-$  в  $2^-0^+P2$  волне с нуклоном. Черным - непоправленные на эффективность данные

# Оценка фона $\phi\pi^-\pi^0$ -системы

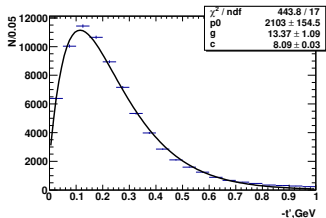


Вклад фона  $J^P M^n LS = 2^- 0^+ P 2 \phi\rho^-$  (красным) в спектр масс  $\phi\pi^0$  без данных run59.

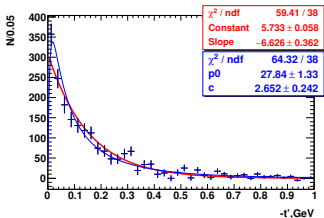
# Распределение по квадрату переданного 4-х импульса $t'$



(a)  $\eta$   $a_2$ -обмен



(b)  $\omega$   $\rho$ -обмен



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

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

# Систематические погрешности

- Применена другая процедура вычитания фона под  $\phi$ -мезоном - фильтрация
- Устойчивость процедур фильтрации и вычитания
  - ▶ сдвиг начала бинов на 0.03ГэВ
  - ▶ сдвиг начала бинов на 0.0025МэВ в гистограмме  $M_{KK}$  для фильтрации
  - ▶ Расширины на 4МэВ интервалы в вычитании
  - ▶  $\pm\sigma$  к ширине сигнала  $\phi$ -мезона в фильтрации
- Зависимость спектра масс  $\phi\pi^0$  от порога и метода идентификации
  - ▶  $\alpha = [0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1]$
  - ▶ применен пороговый метод
- Зависимость спектра масс  $\phi\pi^0$  от нижнего предела отбора по  $P_{xL} = [26, 27, 27.5, 28]$ ГэВ
- Дополнительные требования:
  - ▶ Обрезание по  $-t' < 0.2$ ГэВ<sup>2</sup>
  - ▶ Отсутствие сигнала в сэндвичах охранной системы мишени
- Образование  $\phi\pi^0$ -системы в К-пучке
- Оценка фона  $\phi\pi^0\pi^0$ ,  $\phi\pi^-\pi^0$  для  $\phi\pi\pi$  LIPS,  $\phi\rho^-$  LIPS
- Вклад  $J^P M^\eta = 1^-1^+$  волны образованной в результате  $a_2$ -обмена
- МК образование нейтрона с  $\phi\pi^0$   $J^P M^\eta = 1^-0^-$  в  $\pi$ -обмене на протоне

# Заключение

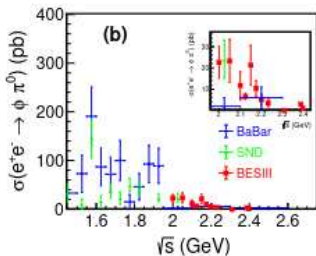
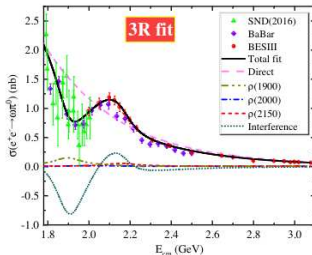
Проводится изучение  $\phi\pi^0$ -системы образующейся в реакции перезарядки 29 ГэВ-ного пионного пучка на Ве мишени установки ВЕС в данных полученных в экспозиции интегральным потоком  $2.5 \cdot 10^{11}$  пучковых частиц. Наблюдается  $2403 \pm 98$  событий с  $\phi\pi^0$ -системой обладающей следующими свойствами:

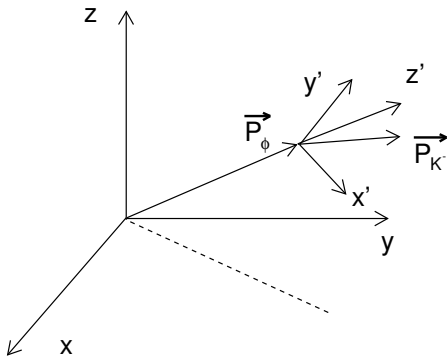
- спектр масс имеет сложную структуру
- имеет квантовые числа векторного состояния в волне  $J^P M^{\eta} = 1^{-} 0^{-}$
- в процессе образования доминирует  $\pi$ -обмен
- рождается в основном вместе с  $\Delta(1232)$ -изобарой



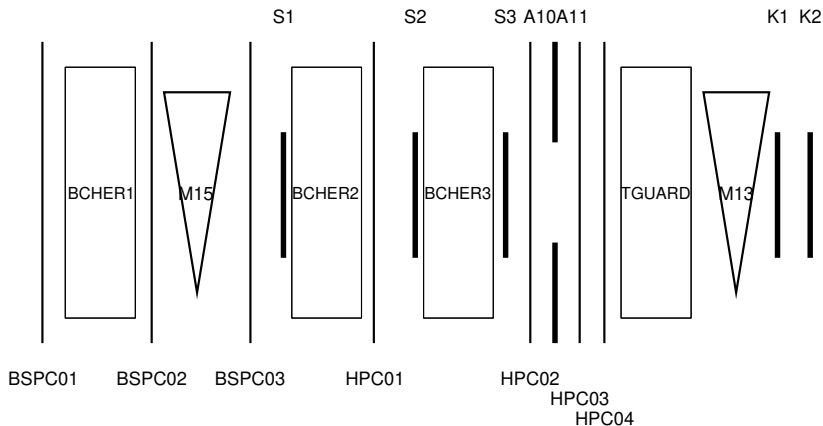
# Введение

- Лептон-Ф  $\pi^- p \rightarrow K^+ K^- \pi^0 n$  @32.5ГэВ  
!OZI  $C(1480) N = 349 \pm 46$ ,  $\Gamma = 130 \pm 60$ МэВ,  $BR(\phi\pi)/BR(\omega\pi) > 0.5$
- E852  $\pi^- p \rightarrow K^+ K^- \pi^0 n$  @18ГэВ  $N \sim 1000$  ! $C(1480)$
- BaBar, SND, BESIII  $e^+e^- \rightarrow K \bar{K} \pi^0$   
Возбуждения  $\rho$ :  $2^3S_1\rho(1450)$ ,  $1^3D_1\rho(1700)$ ,  $2^3D_1\rho(2150)$ .  
Структуры  $\rho(1900)$  около порога  $N\bar{N}$ .

(a) BaBar, SND, BESIII  $\phi\pi^0$ (b) BaBar, SND, BESIII  $\omega\pi^0$

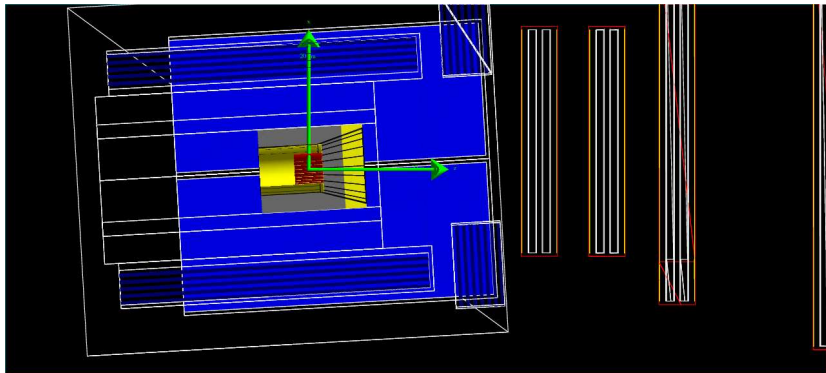
Спиральная система координат  $\phi$ -мезона

# Пучковый спектрометр и триггерная система



- MWG:  $S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \overline{A_{10}} \cdot \overline{A_{11}} \cdot \overline{K_1} \cdot \overline{K_2}$
- MAIN:  $\text{MWG} \cdot \overline{\text{TargetVeto}}$

# Охранная система мишени



# Характеристики установки

- Пучок:
  - ▶ Интенсивность  $2 \times 10^6 / \text{с}$
  - ▶ Состав  $\pi : K : \bar{p} = 98\% : 1.6\% : 0.2\%$
  - ▶ Импульс 29ГэВ с разбросом  $\pm 1\%$
  - ▶ Точность измерения импульса пучковым спектрометром равна 0.7%
- Мишень из Ве цилиндрической формы
  - ▶ Толщина 4см  $\Rightarrow 10\%X_0, 10\%\lambda_I$
  - ▶  $\varnothing 4\text{см}$
- Широкоапертурный магнитный спектрометр вторичных частиц:
  - ▶ Интеграл поля магнита  $B \times L \sim 1.5\text{Tm} \Rightarrow \text{kick} = 0.6\text{ГэВ}$
  - ▶ Точность измерения импульса вторичных частиц в диапазоне 3 – 25ГэВ составляет 0.5 – 1.2%
- Пороги в МЧС для  $\pi : K = 3.7 : 13.2\text{ГэВ}$  для  $\Delta n = 7 \cdot 10^{-4}$
- Количество вещества за мишенью до калориметра  $\sim 5\%X_0$
- Энергетическое и координатное разрешение калориметра для 5ГэВ-ного фотона составляет 4% и 3.2мм соответственно.

# Идентификация заряженных частиц $h^+h^-\pi^0$

Амплитудный метод с 4 гипотезами  $\pi\pi, \pi K, K\pi, KK$ .

Вероятность гипотезы  $P(\text{hyp}) = \prod_i 4096 \cdot P_i(\text{ADC})$ , где

- $i$  - номер канала который бы засвечивал электрон
- $P_i(\text{ADC})$  - вероятность амплитуды  $i$ -го канала

$$P_i(\text{ADC}) = \sum_{k=0}^{30} \frac{e^{-n_i} \cdot n_i^k}{k!} \cdot s_{ik}(\text{ADC}), \text{ где}$$

- $n_i$  - число фотоэлектронов в  $i$ -м канале согласно гипотезы
- $s_{ik}(\text{ADC})$  -  $k$ -кратная свертка одноэлектронного спектра  $i$ -го канала

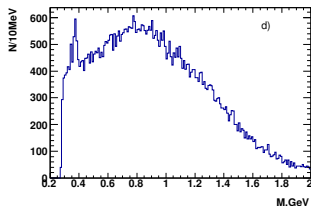
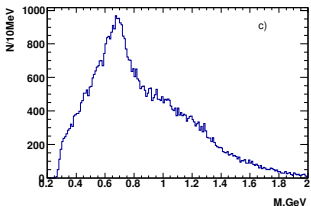
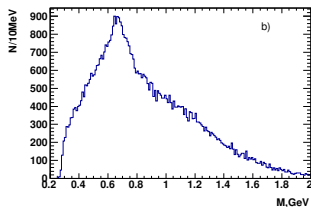
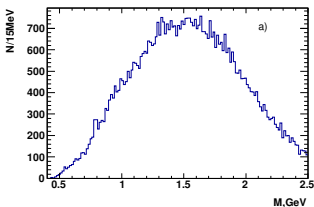
Критерий идентификации:

отношение 2-й по величине вероятности к максимальной  $\alpha = \frac{P(\text{hyp})_{next}}{P(\text{hyp})_{max}} \leq 0.4$

Вклад электронов в систему  $K^+K^-\pi^0$  не обнаружен методом  $E/p$ .

Примесь  $\pi$ -мезонов пренебрежимо мала.

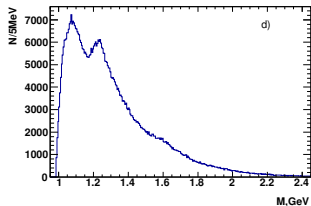
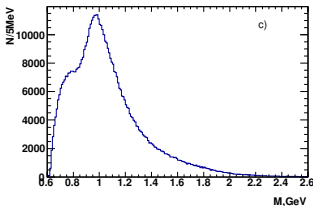
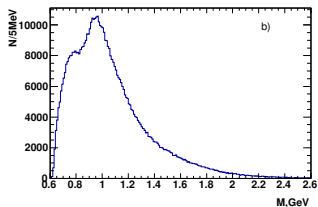
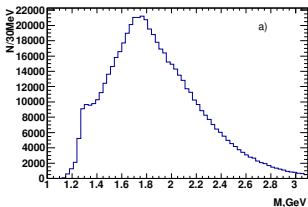
# Отражение $K^+K^-\pi^0$ в $\pi^+\pi^-\pi^0$



Wed Mar 13 09:57:06 2024

Спектры масс а)  $\pi^+\pi^-\pi^0$ , б)  $\pi^+\pi^0$ , в)  $\pi^-\pi^0$ , г)  $\pi^+\pi^-$ ,

# Отражение $\pi^+\pi^-\pi^0$ в $K^+K^-\pi^0$

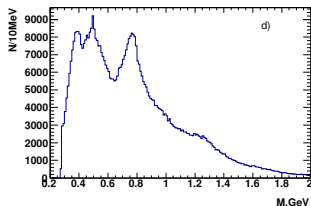
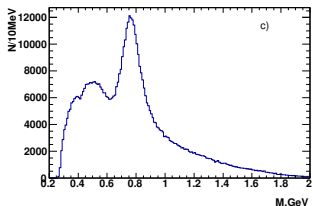
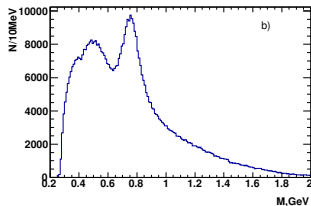
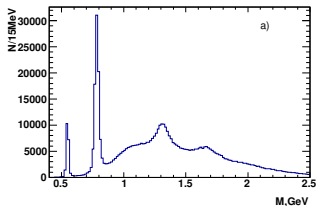


Wed Mar 13 09:57:06 2024

Спектры масс а)  $K^+K^-\pi^0$ , б)  $K^+\pi^0$ , в)  $K^-\pi^0$ , г)  $K^+K^-$ ,

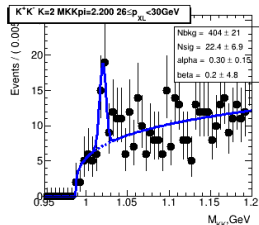
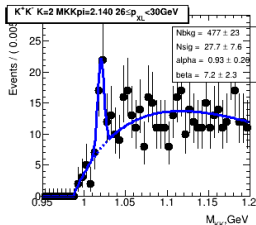
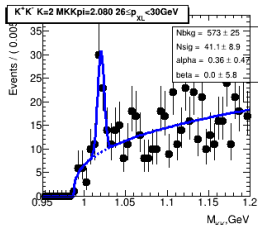
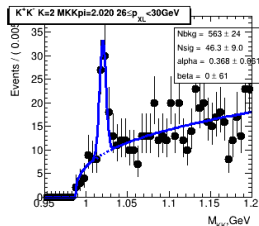
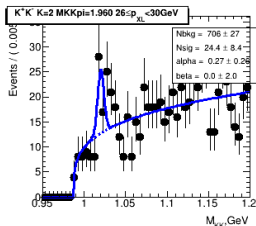
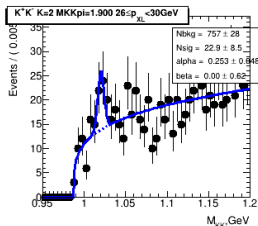


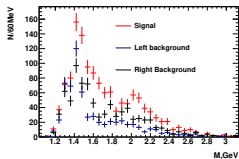
# Характеристика событий $\pi^+\pi^-\pi^0$



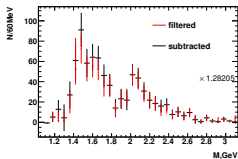
Wed Mar 13 09:57:06 2024

Спектры масс а)  $\pi^+\pi^-\pi^0$ , б)  $\pi^+\pi^0$ , в)  $\pi^-\pi^0$ , г)  $\pi^+\pi^-$ ,

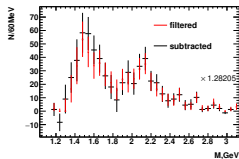
Фильтрация  $\phi\pi^0$ -системы



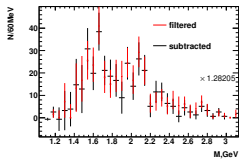
(a) Вычитание фона run44



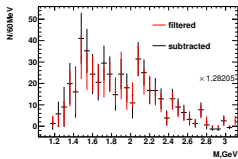
(b) run44



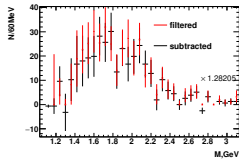
(c) run45



(d) run47

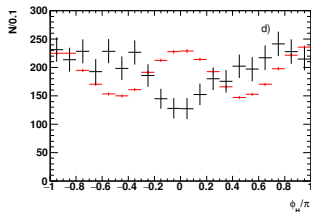
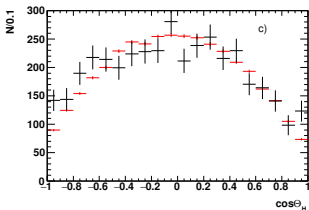
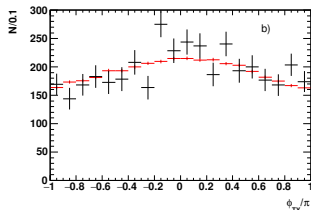
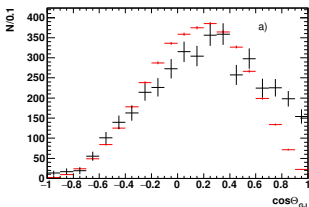


(e) run48

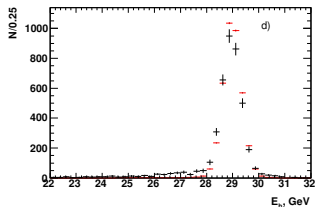
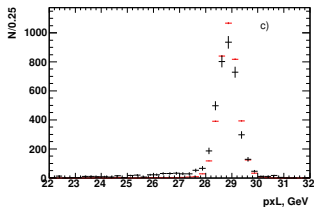
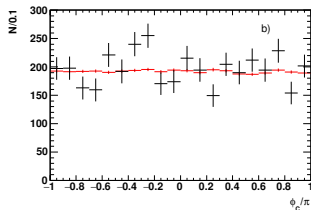
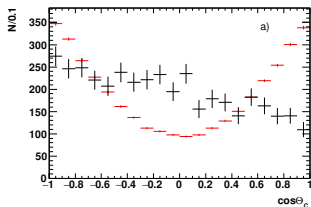


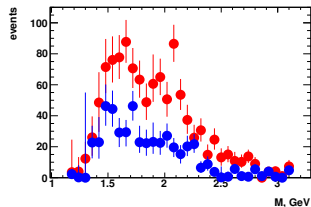
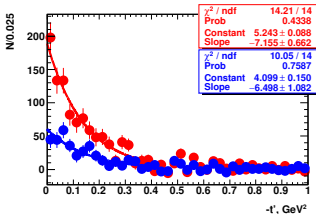
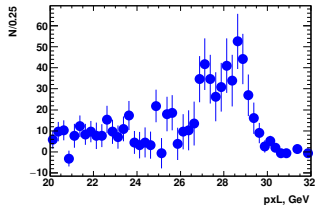
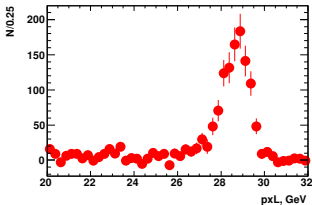
(f) run59

Вычитание фона  $K^+K^-\pi^0$ . Спектр масс  $\phi\pi^0$ .

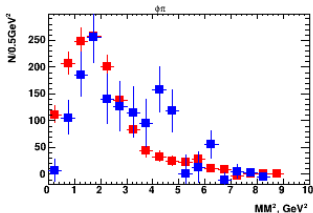
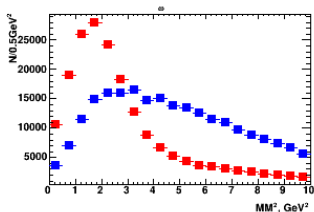
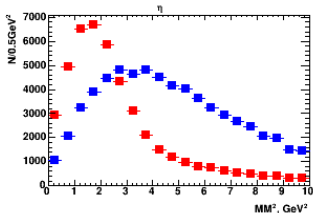
Фон. Свойства  $\phi\pi^-\pi^0$ -системы 2

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

Фон. Свойства  $\phi\pi^-\pi^0$ -системы 3a) -  $\cos \Theta_{CK-}$ , b) -  $\phi_{CK-}/\pi$ , c) -  $P_{xL}$ , d) -  $E_{b1C}$

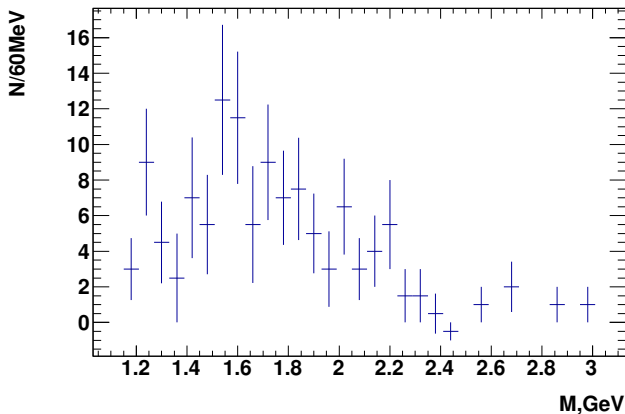
Сравнение  $\phi\pi^0$  для триггера MAIN и MWG

MAIN - красным, MWG - синим. Данные 47, 48, 59 сеансов. Верхний ряд -  $P_{xL}$ ,  
Нижний -  $t'$  и  $M_{KK\pi}$

Сравнение  $MM^2$  для триггера MAIN и MWGTotal MAIN and MWG $\times 5$ 

Tue Oct 3 19:47:47 2023

Распределения по квадрату недостающей массы для  $\eta$ ,  $\omega$ -мезонов и  $\phi\pi^0$ .

Образование  $\phi\pi^0$ -системы в К-пучке

Масса  $K^+K^-\pi^0$