

Измерение каонных формфакторов в распаде $K \rightarrow \mu \nu \gamma$ на установке ИСТРА+

ИСТРА+

ОКА

ИФВЭ У-70
(Протвино, Россия)

Вячеслав Дук, ИЯИ РАН

коллаборация ИСТРА+

Содержание

- Распад $K \rightarrow \mu \nu \gamma$
- Эксперимент ИСТРА+
- Отбор событий
- Подавление фоновых процессов
- Выделение сигнала
- Фитирование спектра
- Результаты
- Выводы

Распад $K \rightarrow \mu \nu \gamma$: мотивация

Фотон, излученный из промежуточных состояний K-мезона (SD, или DE)

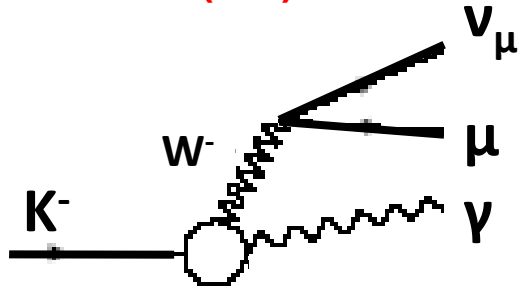


Чувствительность к электрослабой структуре каона



Проверка предсказаний КТВ, LFQM, ...

SD (DE)



$$M = M_{IB} + M_{SD}$$

$$\Gamma = \Gamma_{IB} + \Gamma_{SD} + \Gamma_{INT}$$

Теория $K \rightarrow \mu\nu\gamma$: дифференциальная ширина распада

$$\frac{d\Gamma_{K\mu\nu\gamma}}{dx dy} = A_{IB} f_{IB}(x, y) + A_{SD} [(F_V + F_A)^2 f_{SD+}(x, y) + (F_V - F_A)^2 f_{SD-}(x, y)] - A_{INT} [(F_V + F_A) f_{INT+}(x, y) + (F_V - F_A) f_{INT-}(x, y)],$$

3 основных вклада:
 IB – доминирующий
 SD \pm , INT \pm -
 наиболее интересные
 ($\rightarrow F_V, F_A$)

Кинематические
 переменные:

$$x = 2 * E_\nu(\text{cm}) / M_K$$

$$y = 2 * E_\mu(\text{cm}) / M_K$$

$$f_{IB}(x, y) = \left[\frac{1 - y + r}{x^2(x + y - 1 - r)} \right] \times \left[x^2 + 2(1 - x)(1 - r) - \frac{2xr(1 - r)}{x + y - 1 - r} \right],$$

$$f_{SD+} = [x + y - 1 - r][(x + y - 1)(1 - x) - r],$$

$$f_{SD-} = [1 - y + r][(1 - x)(1 - y) + r],$$

$$f_{INT+} = \left[\frac{1 - y + r}{x(x + y - 1 - r)} \right] [(1 - x)(1 - x - y) + r],$$

$$f_{INT-} = \left[\frac{1 - y + r}{x(x + y - 1 - r)} \right] [x^2 - (1 - x)(1 - x - y) - r],$$

$$r = \left[\frac{M_\mu}{M_K} \right]^2,$$

$$A_{IB} = \Gamma_{K\mu^2} \frac{\alpha}{2\pi} \frac{1}{(1 - r)^2},$$

$$A_{SD} = \Gamma_{K\mu^2} \frac{\alpha}{8\pi} \frac{1}{r(1 - r)^2} \left[\frac{M_K}{F_K} \right]^2,$$

$$A_{INT} = \Gamma_{K\mu^2} \frac{\alpha}{2\pi} \frac{1}{(1 - r)^2} \frac{M_K}{F_K}.$$

Теория $K \rightarrow \mu\nu\gamma$: дифференциальная ширина распада

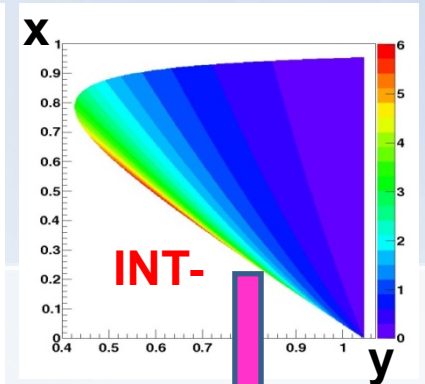
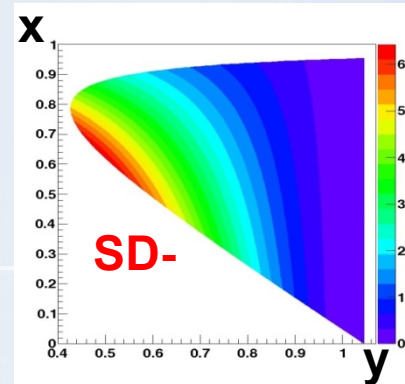
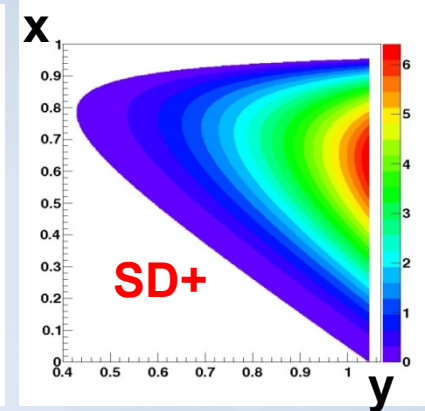
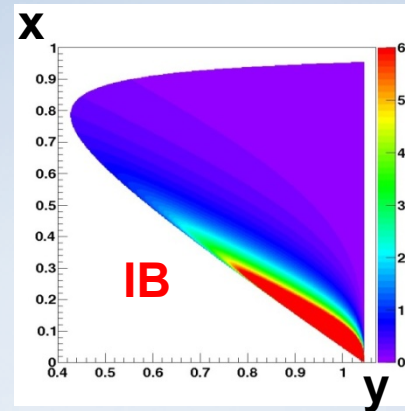
$$\frac{d\Gamma_{K\mu\nu\gamma}}{dx dy} = A_{IB} f_{IB}(x, y) + A_{SD} [(F_V + F_A)^2 f_{SD+}(x, y) + (F_V - F_A)^2 f_{SD-}(x, y)] - A_{INT} [(F_V + F_A) f_{INT+}(x, y) + (F_V - F_A) f_{INT-}(x, y)],$$

3 основных вклада:
 IB – доминирующий
 SD \pm , INT \pm -
 наиболее интересные
 ($\rightarrow F_V, F_A$)

Кинематические
 переменные:

$$x = 2 \cdot E_\nu(\text{cm}) / M_K$$

$$y = 2 \cdot E_\mu(\text{cm}) / M_K$$



**Стратегия:
 выделение INT-**

Теория $K \rightarrow \mu\nu$: формфакторы

КТВ $O(p^4)$:

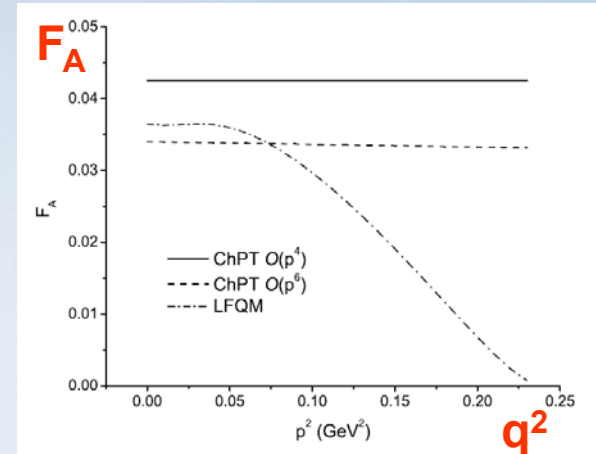
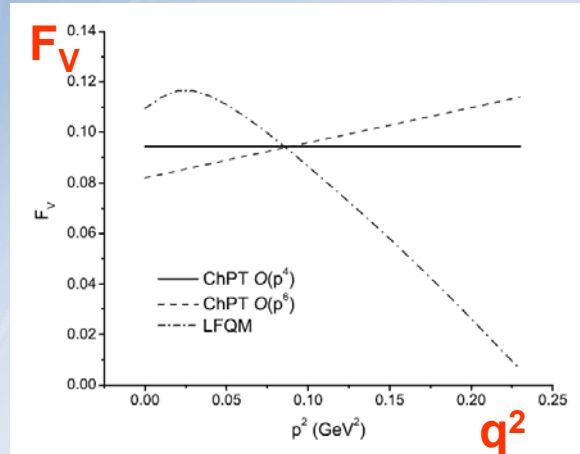
F_V, F_A -
константы

КТВ $O(p^6)$:

F_V, F_A линейно
зависят от q^2

LFQM:

F_V, F_A зависят от
 q^2 сложным
образом



$$q^2 = (P_K - P_\nu)^2 = M_K^2 * (1-x)$$

КТВ $O(p^4)$

$$F_V = 0.0945$$

$$F_A = 0.0425$$

$$F_V + F_A = 0.137$$

$$F_V - F_A = 0.052$$

КТВ $O(p^6)$

$$F_V = F_V(0) * [1 + \lambda * (1-x)]$$

$$F_V(0) = 0.082$$

$$\lambda = 0.4$$

$$F_A \approx 0.034$$

$K \rightarrow \mu \nu \gamma$: основные экспериментальные результаты

авторы	коллора ция	год	Кинематическая область	Полученные результаты
Barmin et al	ИТЕР	1988	$P_\mu < 231.5 \text{ MeV}/c$	$BR(IB) = (6.0 \pm 0.9) * 10^{-3}$
Demidov et al	ИТЕР	1990	$P_\mu < 231.5 \text{ MeV}/c$	$BR(IB) = (6.6 \pm 1.5) * 10^{-3}$
Akiba et al	E104 (КЕК)	1985	$214.5 < P_\mu < 231.5 \text{ MeV}/c$	$BR(IB) = (5.4 \pm 0.3) * 10^{-3}$
Adler et al	E787 (BNL)	2000	$P_\mu > 218.4 \text{ MeV}/c, E_\nu > 90 \text{ MeV}$	$BR(SD+) = (1.33 \pm 0.22) * 10^{-5}$

Измерения формфакторов:

E787(BNL) Phys.Rev.Lett.85(2000)2256 $(K \rightarrow \mu \nu \gamma)$
 $|F_V + F_A| = 0.165 \pm 0.013; -0.04 < F_V - F_A < 0.24$

E865(BNL) Phys.Rev.Lett.89(2002)061803 $(K \rightarrow e \nu e^+ e^-, K \rightarrow \mu \nu e^+ e^-)$
 $F_V + F_A = 0.147 \pm 0.026; F_V - F_A = 0.077 \pm 0.028$

Коллаборация ИСТРА+



- Институт физики высоких энергий, Протвино (**ИФВЭ**)
- Институт ядерных исследований РАН, Москва (**ИЯИ РАН**)
- Объединенный институт ядерных исследований, Дубна (**ОИЯИ**)



ИСТРА+: от $\pi \rightarrow e \nu \gamma$ до $K \rightarrow \mu \nu \gamma$

1990

Изучение распада $\pi \rightarrow e \nu \gamma$: измерение $F_V, \gamma = F_A / F_V, F_T$

2003-
2007

$K \rightarrow e \nu \pi^0, K \rightarrow \mu \nu \pi^0$: измерение формфакторов на большой статистике. [Phys.Lett.B589\(2004\)111](#), [Phys.Lett.B581\(2004\)31](#)

$K \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0$: измерение параметров наклона диаграммы Далитца. [Phys.Lett.B567\(2003\)159](#)

$K \rightarrow \pi^- \pi^0 P$: поиск легкого псевдоскалярного сголдстино. [Phys.Lett.B602\(2004\)149](#)

$K \rightarrow e \nu \pi^0$: Измерение BR и V_{us} . [arXiv:0704.2052 \[hep-ex\]](#)

$K \rightarrow e \nu \pi^0 \gamma$: Измерение BR и T-нечетной корреляции. [Phys.Atom.Nucl.70:734-740,2007](#)

$K \rightarrow \mu \nu \pi^0 \gamma$: Первое наблюдение распада, измерение BR и T-нечетной корреляции. [Phys.Atom.Nucl.70:29-34,2007](#)

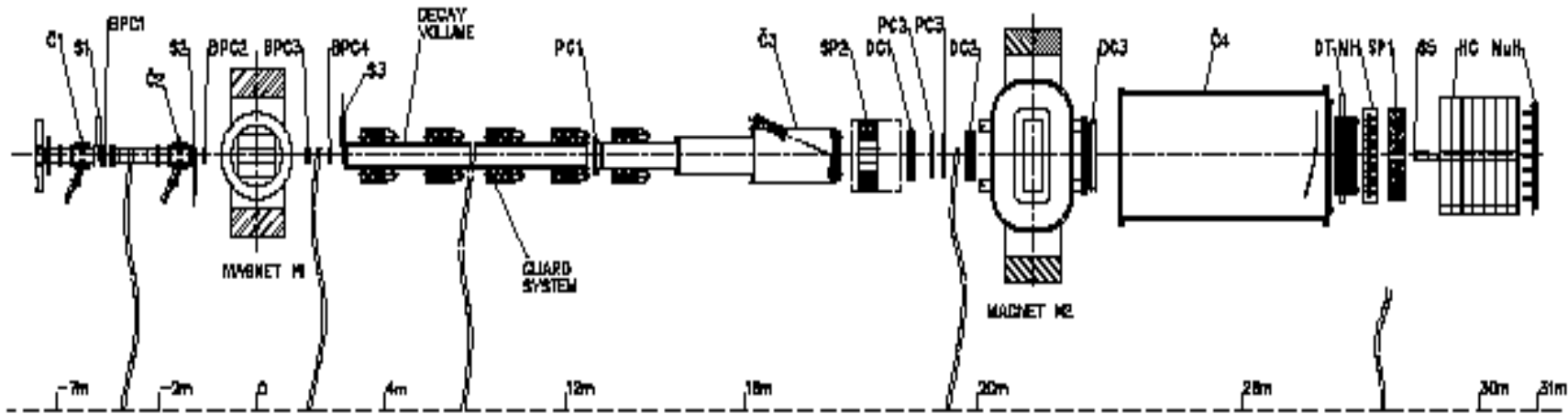
2010

Изучение распада $K \rightarrow \mu \nu \gamma$: измерение $F_V - F_A$

> 2010

ИСТРА+ \rightarrow **ОКА**

Установка ИСТРА+



$p \sim -25 \text{ GeV}$; $\Delta p/p \sim 1.5\%$; $K^- \sim 3\%$; $I \sim 3 \cdot 10^6 / 1.9 \text{ sec}$

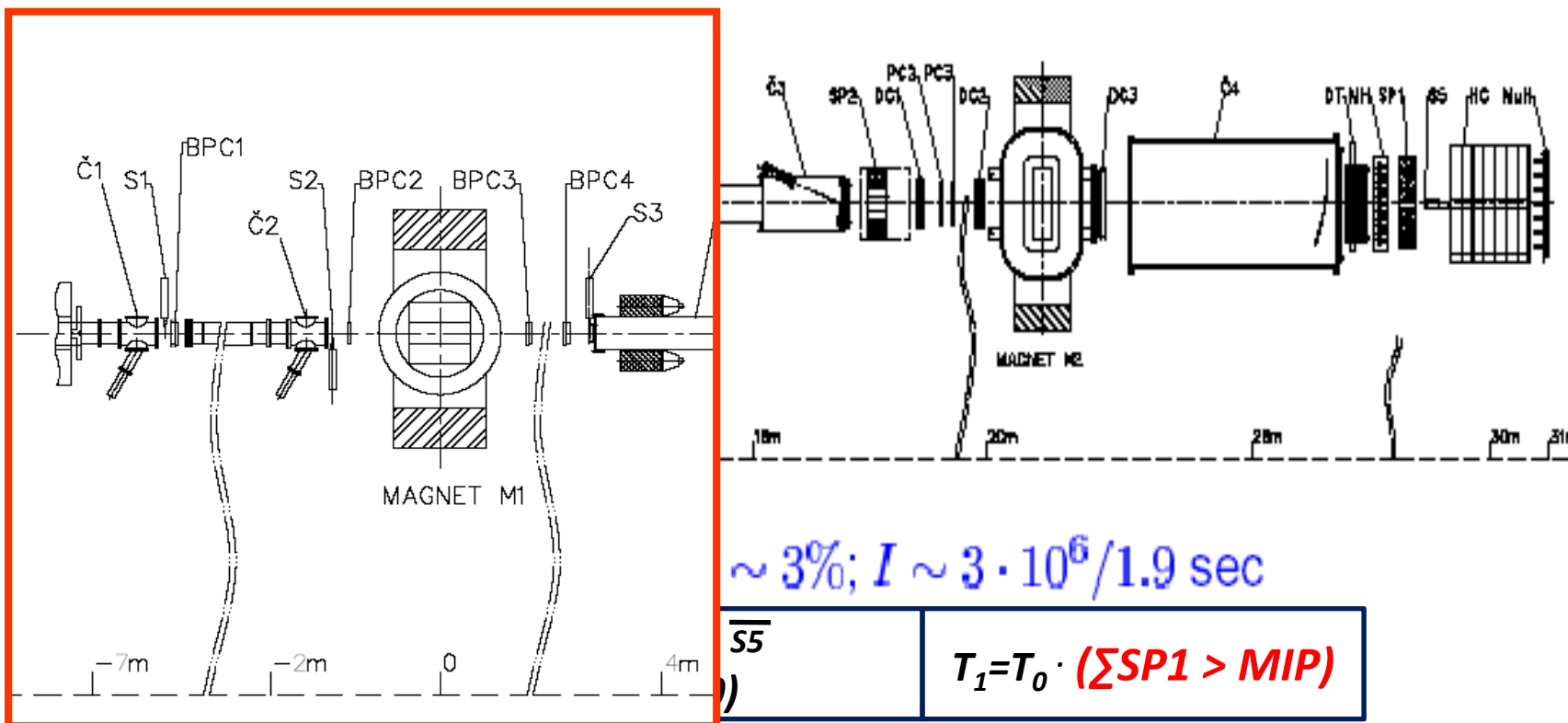
$$T_0 = S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot S4 \cdot C0 \cdot C1 \cdot C2 \cdot \overline{S5}$$

(фактор подавления ~ 10)

$$T_1 = T_0 \cdot (\sum SP1 > MIP)$$

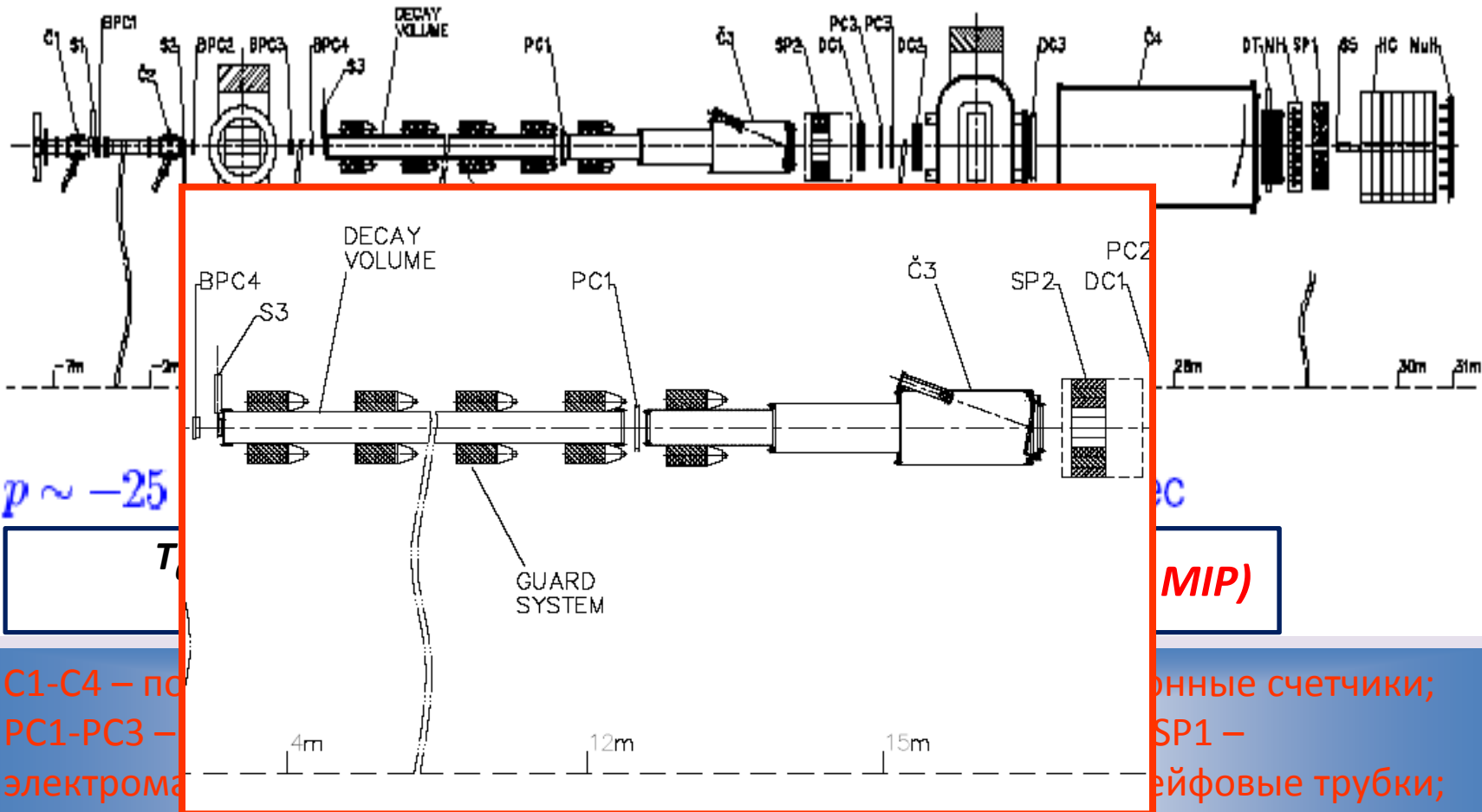
C1-C4 – пороговые черенковские счетчики; S1-S5 – сцинтилляционные счетчики; PC1-PC3 – пропорциональные камеры; SP2 – вето-калориметр; SP1 – электромагнитный калориметр; DC – дрейфовые камеры; DT-дрейфовые трубки; МН – матричный сцинтилляционный годоскоп.

Установка ИСТРА+: пучковая часть



С1-С4 – пороговые черенковские счетчики; S1-S5 – сцинтилляционные счетчики; PC1-PC3 – пропорциональные камеры; SP2 – вето-калориметр; SP1 – электромагнитный калориметр; DC – дрейфовые камеры; DT-дрейфовые трубки; МН – матричный сцинтилляционный годоскоп

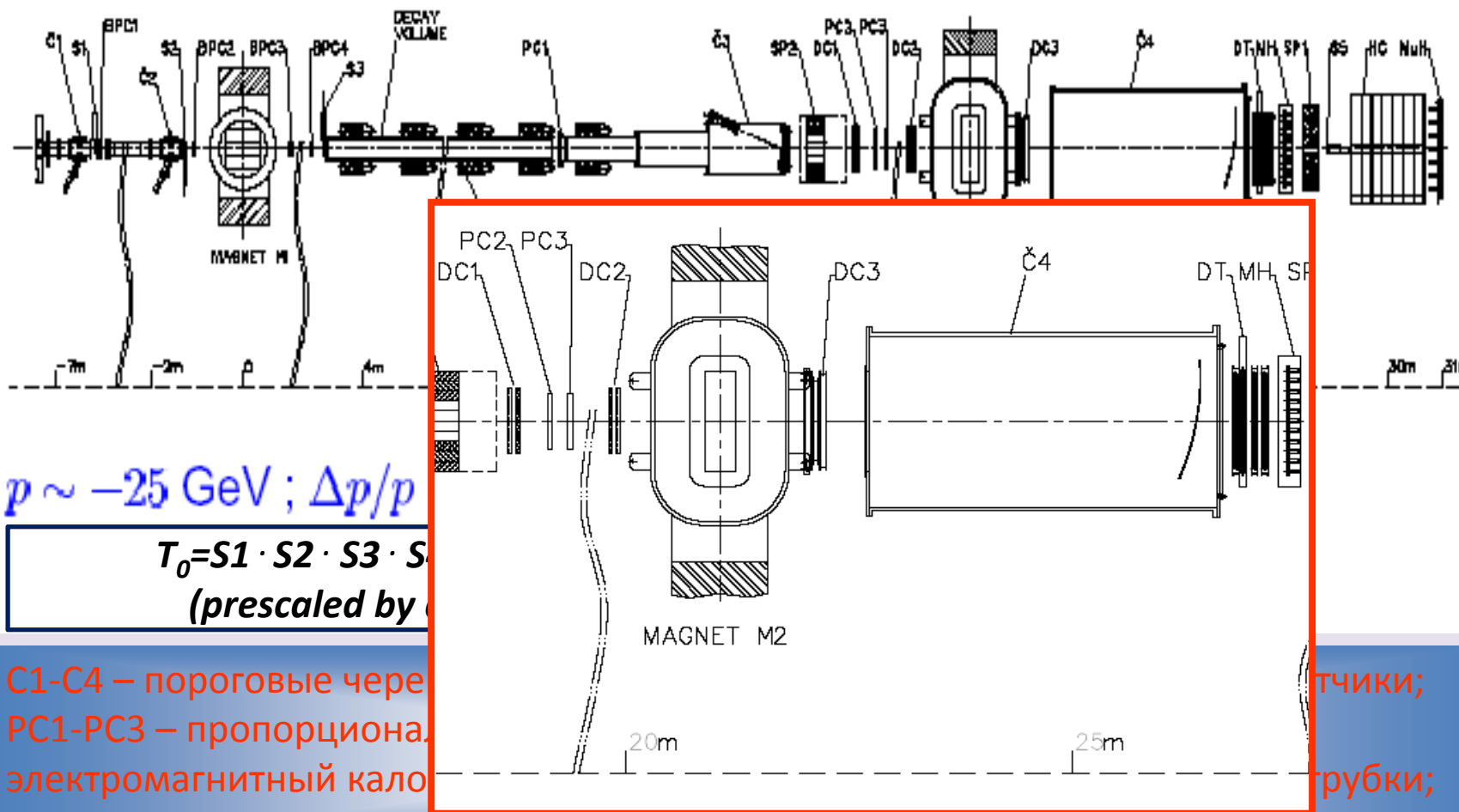
Установка ИСТРА+: распадный объем



C1-C4 – по
PC1-PC3 –
электрома
МН – матричный сцинтилляционный годоскоп

онные счетчики;
SP1 –
ейфовые трубки;

Установка ИСТРА+: магнитный спектрометр



$p \sim -25 \text{ GeV}; \Delta p/p$

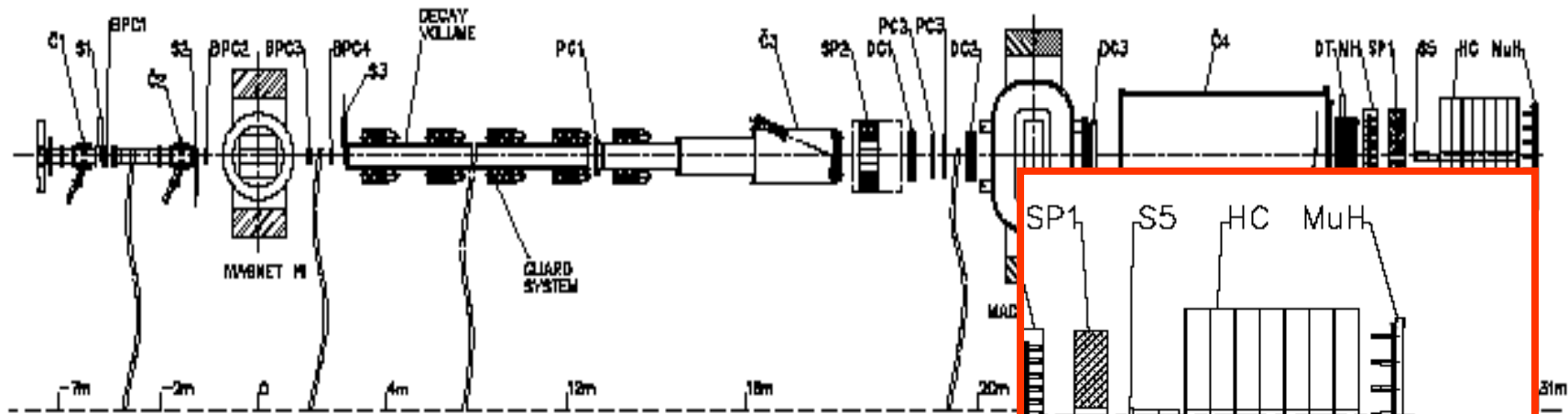
$$T_0 = S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot S4$$

(prescaled by ...)

C1-C4 – пороговые черенковские детекторы;
 PC1-PC3 – пропорциональные камеры;
 электромагнитный калориметр;
 МН – матричный сцинтилляционный детектор

СЧД – кремниевые фотодиоды;
 трубки;

Установка ИСТРА+: ECAL, HCAL



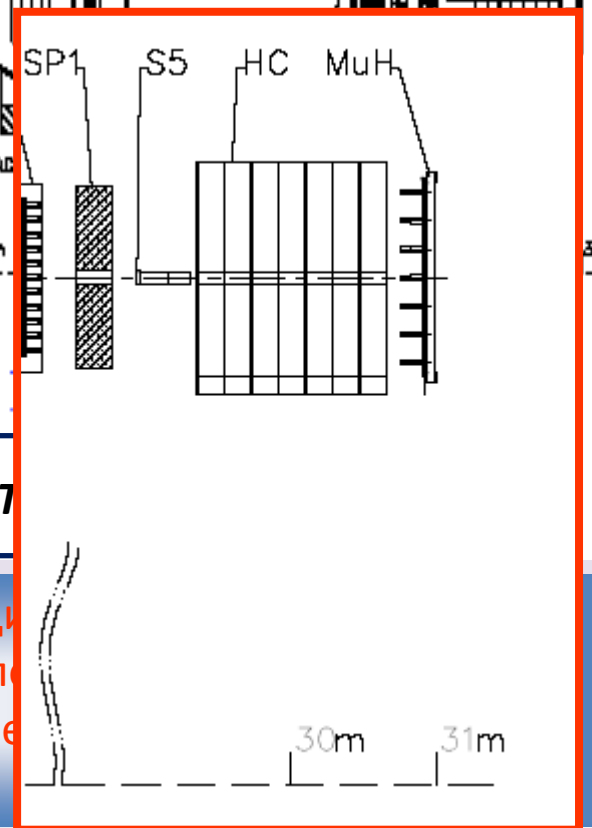
$p \sim -25 \text{ GeV}$; $\Delta p/p \sim 1.5\%$; $K^- \sim 3\%$; $I \sim 3 \cdot 10^6$

$$T_0 = S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot S4 \cdot C0 \cdot C1 \cdot C2 \cdot \overline{S5}$$

(prescaled by a factor of ~ 10)

$$T_1 = 7$$

C1-C4 – пороговые черенковские счетчики; S1-S5 – сцинтилляционные счетчики;
 PC1-PC3 – пропорциональные камеры; SP2 – veto-калориметр;
 электромагнитный калориметр; DC – дрейфовые камеры;
 MН – матричный сцинтилляционный годоскоп



Отбор событий

- **Треки** (один первичный трек, один вторичный трек, ограничения на качество трека)
- **Вето** (отсутствие сигналов выше порога)
- **Вершина распада** ($400 < z < 1600$ см, ограничения на вероятность вершинного фита)
- **Идентификация частиц:**

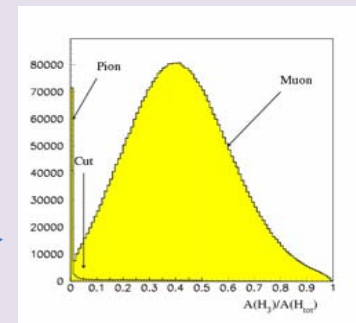
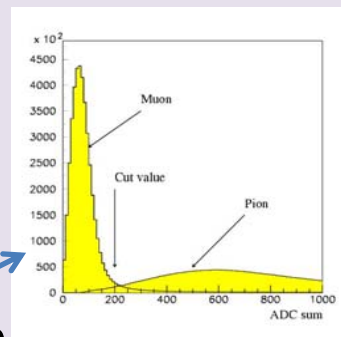
Фотон: ливень в калориметре ECAL

Мюон: 1) MIP в ECAL

2) сумма отсчетов ADC в HCAL < 200

3) относительное энерговыделение

в последних трех слоях HCAL > 0.05



Триггерная эффективность ε

Данные ИСТРА+:

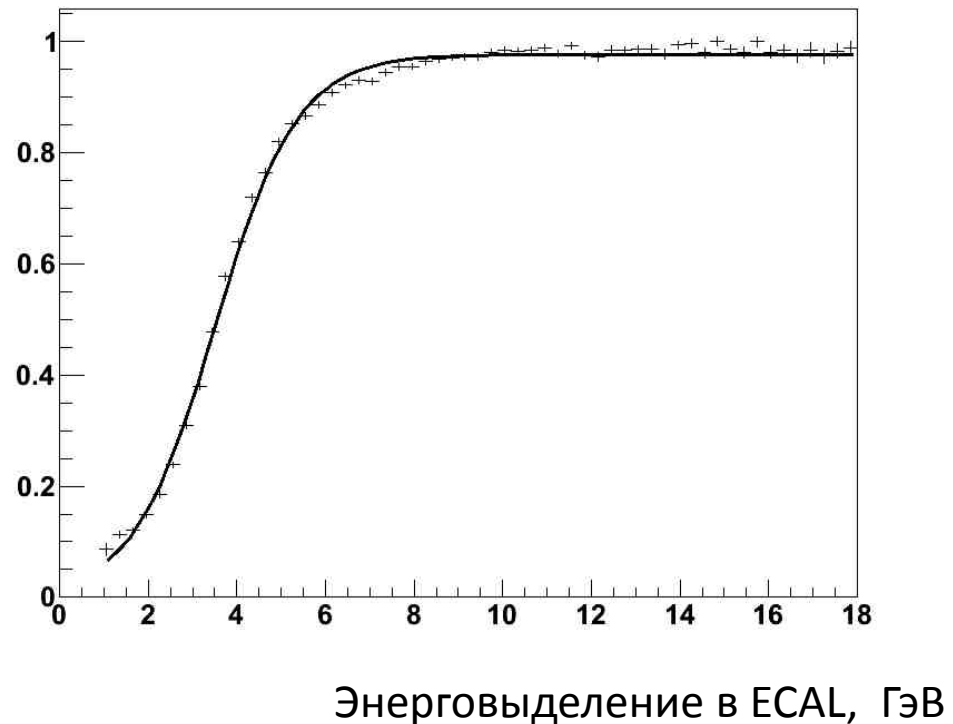
Триггер T_0 : ~10%

$T_1 = T_0 \cdot (\sum ECAL > MIP)$: ~90%

Триггерная эфф-ть:

$$\varepsilon = T_0 * T_1 / T_0$$

Событиям с T_1
присваивается
вес $1/\varepsilon$



Подавление фонов и наблюдение сигнала

- Основные фоновые процессы:



с одним потерянным фотоном от распада $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$



с одним потерянным фотоном от $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ и неправильной идентификацией π

- Наблюдение сигнала:

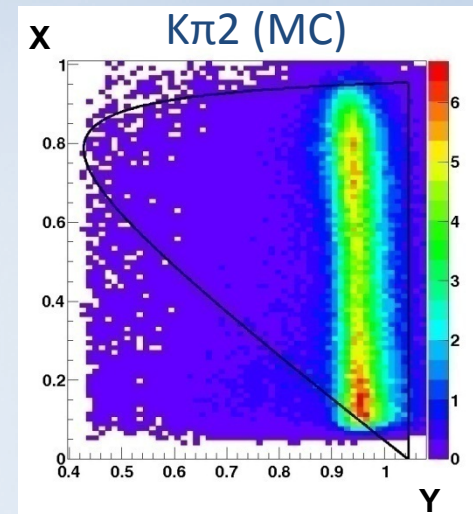
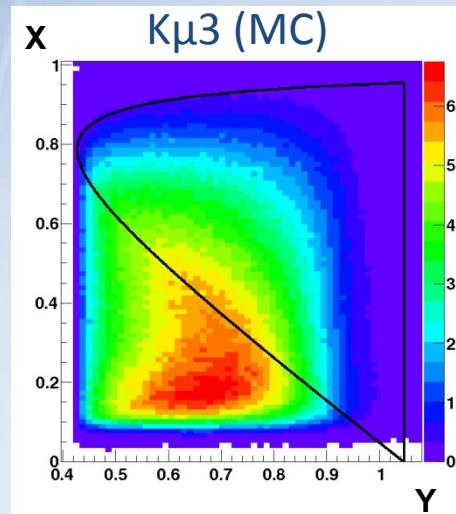
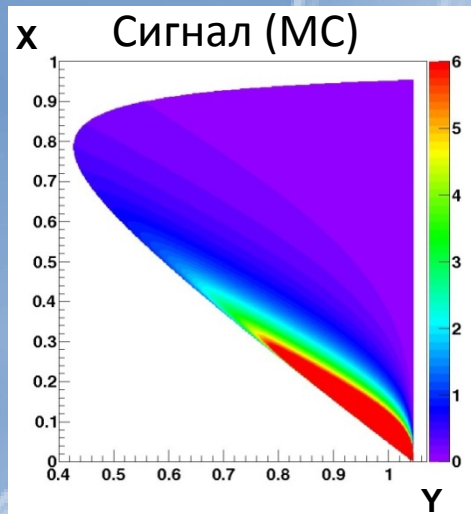
$$M(\mu \nu \gamma) = \sqrt{(P_\mu + P_\nu + P_\gamma)^2} \text{ где}$$

$$\vec{p}_\nu = \vec{p}_K - \vec{p}_\mu - \vec{p}_\gamma; \quad E_\nu = |\vec{p}_\nu|$$

$M(\mu\nu\gamma)$ имеет пик на $M_K = 0.494 \text{ GeV}$ для сигнала

Процедура подавления фонов: "сканирование" Далитц-плота (x, y) и поиск пика в распределении по $M(\mu\nu\gamma)$

Подавление фонов: Далитц-плот (x,y)

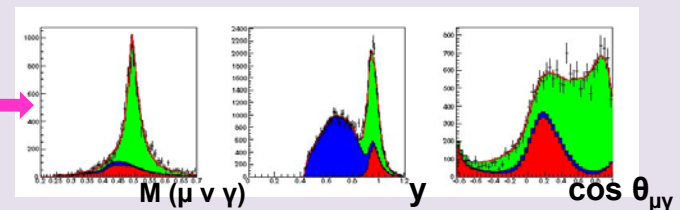
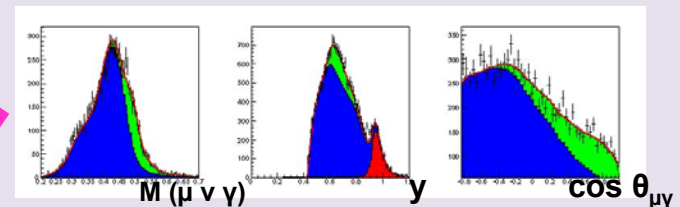
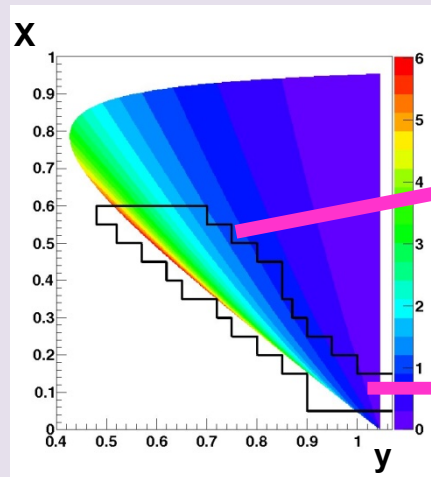


Предыдущие эксперименты: поиск сигнала возле кинематической границы по y

ИСТРА+: поиск сигнала возле кинематической границы по E_ν

Выделение сигнала

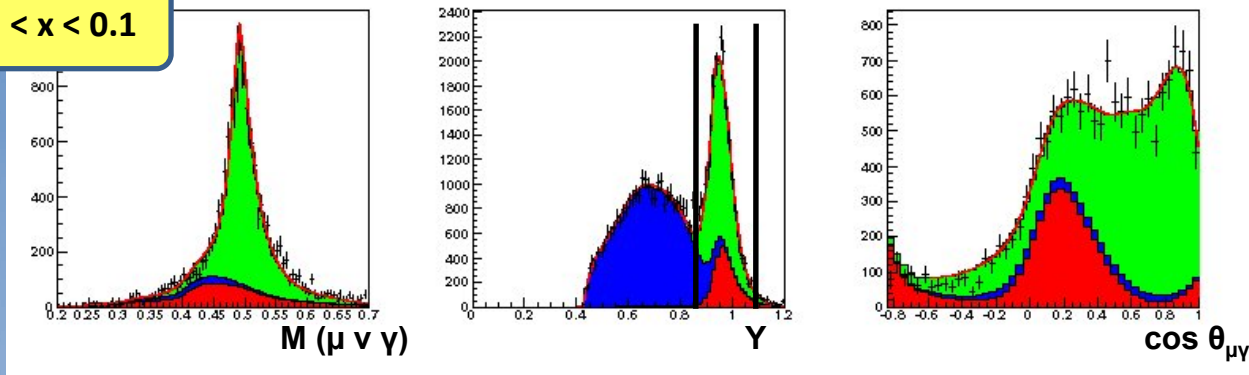
- Далитц-плот (x, y) делится на **полосы** по x с шириной $\delta x = 0.05$ (x -полосы)
- Оптимальное ограничение на y в x -полосах: величина $R = S / \sqrt{S+B}$ (S – сигнал, B – фон) максимальна
- Одновременный фит $M(\mu \nu \gamma)$, y и $\cos \theta_{\mu\gamma}$ в x -полосах



**~22K
сигнальных
событий**

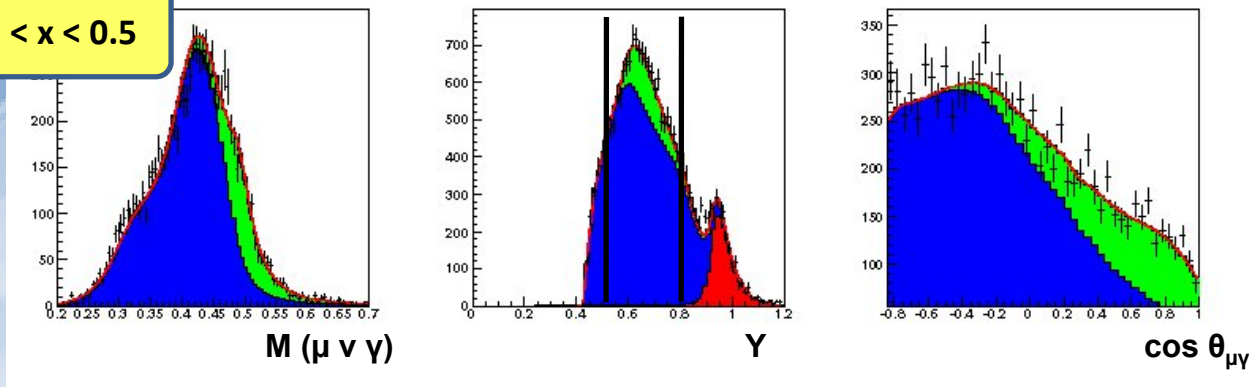
Извлечение сигнала: одновременный фит в x-полосах

$0.05 < x < 0.1$



Фит только $M(\mu\nu\gamma)$
не достаточен
(сигнал и фон
похожи)

$0.45 < x < 0.5$



*формы
распределений
сигнала и фонов
взяты из MC*

зеленый – сигнал, синий – $K\mu 3$, красный – $K\pi 2$

одновременный фит в x-полосах: фитирующая функция

$$F(z) = N_{\text{sig}} * a * f_{\text{sig}}(a*z+b) + N_{\text{К}\mu 3} * a * f_{\text{К}\mu 3}(a*z+b) + N_{\text{К}\pi 2} * a * f_{\text{К}\pi 2}(a*z+b)$$

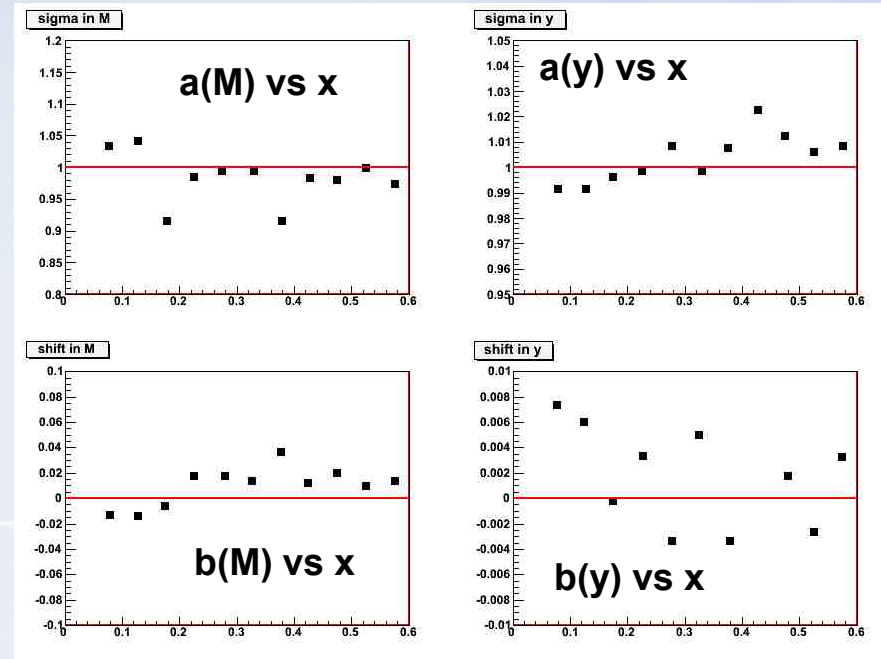
F – фитирующая функция

z – $M(\mu \nu \gamma)$, y или \cos

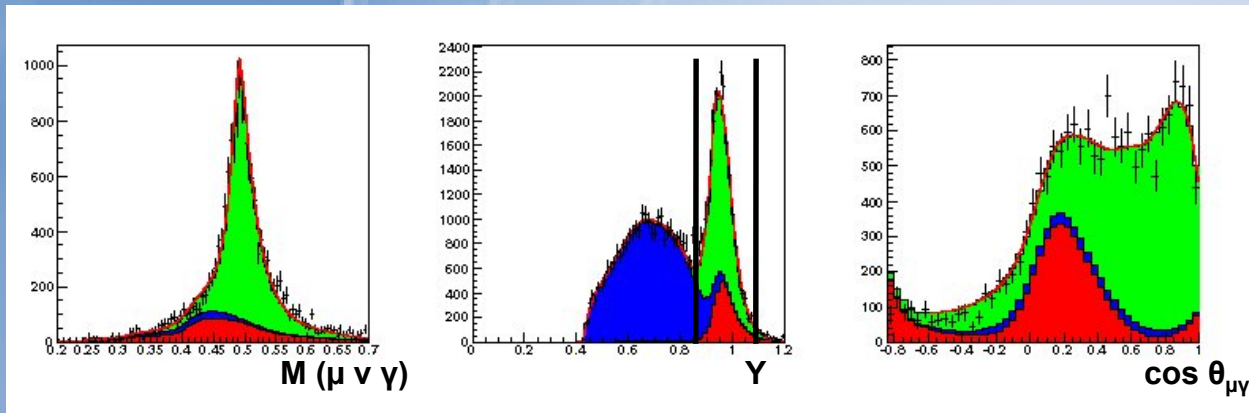
$N_{\text{sig}}, N_{\text{К}\mu 3}, N_{\text{К}\pi 2}$ – нормировочные коэффициенты

$f_{\text{sig}}, f_{\text{К}\mu 3}, f_{\text{К}\pi 2}$ – формы распределений из МС

a, b – дополнительные параметры ($a \sim 1, b \sim 0$)



одновременный фит в x-полосах: вычисление ошибки



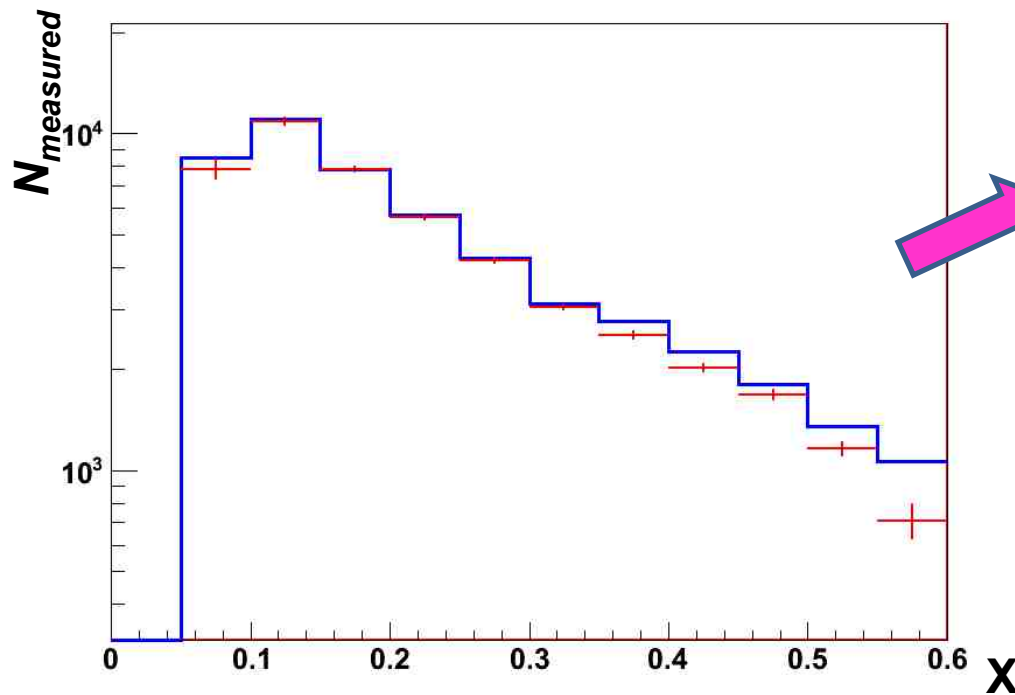
корректное число
событий

корректная оценка
ошибки

одновременный фит 3 гистограмм,
число событий в гистограмме
 $M(\mu\nu\gamma)$

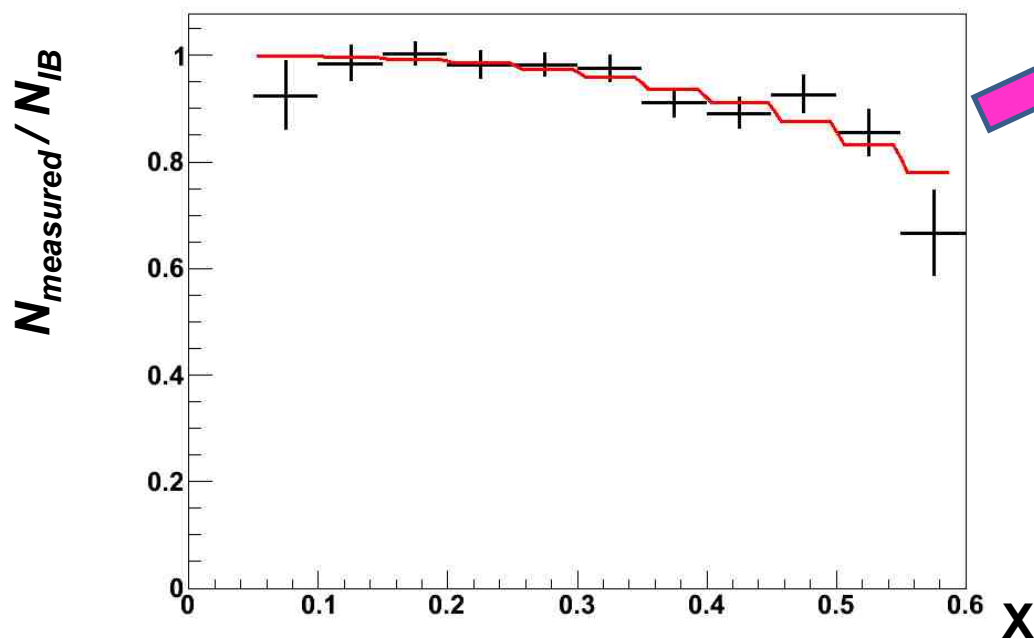
- используется только ОДНА гистограмма – $M(\mu\nu\gamma)$
- начальные значения параметров – из одновременного фита
- однократный вызов MINOS

Окончательный спектр по x



- N_{measured} – из одновременных фитов в x -полосах
- синяя гистограмма – IB
- недостаток событий при больших x обусловлен наличием вклада INT-
- Знак INT- отрицательный

Фит спектра: распределение по x нормировано на IB



фитирующая функция:

$$[(f(IB) - p * f(INT-)) / f(IB)]$$

p – параметр фита, $p = F_V - F_A$

- $N_{measured}$ – из одновременных фитов в x -полосах
- N_{IB} – из MC
- при наличии только IB
 $N_{measured} / N_{IB} = 1$
- Знак **INT-** отрицательный
- ~3% эффект **INT-**

Окончательный
результат:

$$F_V - F_A = 0.21 \pm 0.04 \pm 0.04$$

$F_V - F_A$: систематическая ошибка

Источник систематики	значение
систематика фита	$3.0 \cdot 10^{-2}$
ограничение на x	$1.2 \cdot 10^{-2}$
ширина x-полосы	$2 \cdot 10^{-2}$
ограничение на y	-
ограничение на z	-
Вклад INT+	$1.4 \cdot 10^{-2}$
ИТОГО	$4 \cdot 10^{-2}$

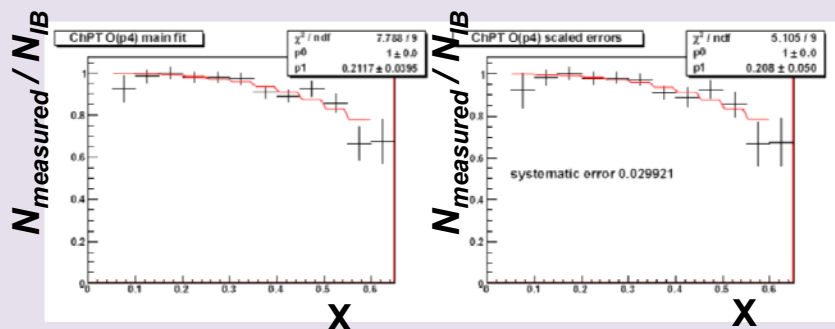
Окончательный
результат:



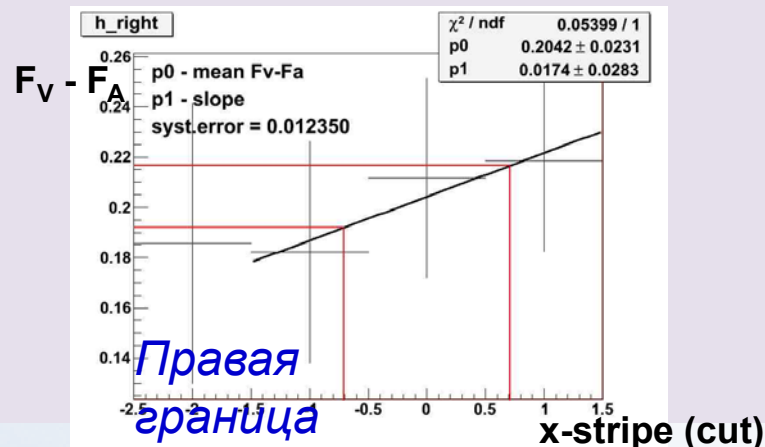
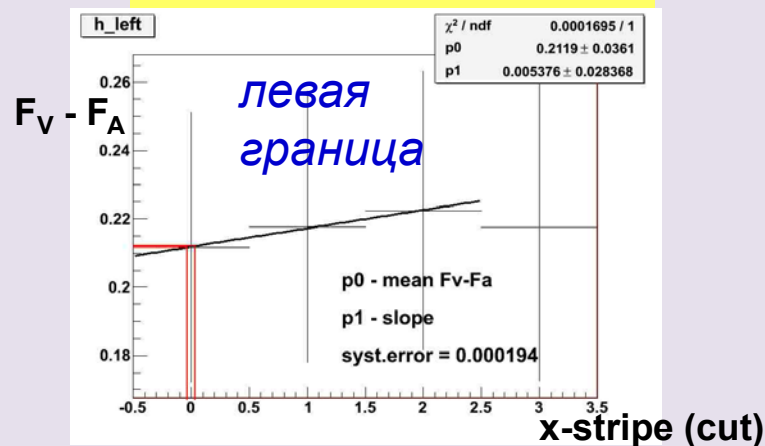
$$F_V - F_A = 0.21 \pm 0.04 \pm 0.04$$

$F_V - F_A$: систематическая ошибка

Систематика фита: ошибки в x-полосах
увеличиваются в $\sqrt{\chi^2}$
(χ^2 – из одновременного фита)



Ограничение по x



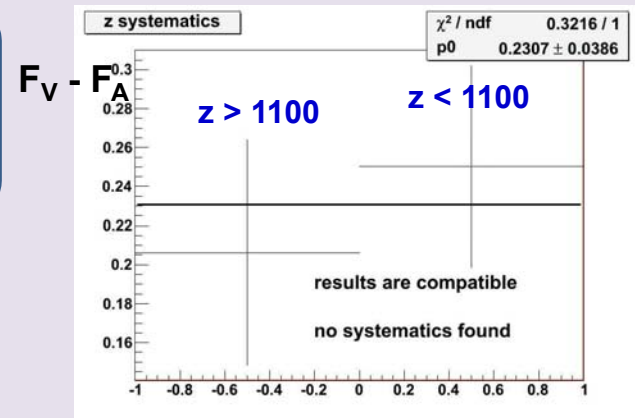
$F_V - F_A$: систематическая ошибка

систематика ограничения по y : более строгое ограничение на y в x -полосах (FWHM), повторение процедуры выделения сигнала: **результаты совместимы**

систематика ограничения по z : повторение процедуры выделения сигнала для $z < 1100$ и $z > 1100$: **результаты совместимы**

$Z < 1100$: вакуум
 $Z > 1100$: He

Ограничение по z

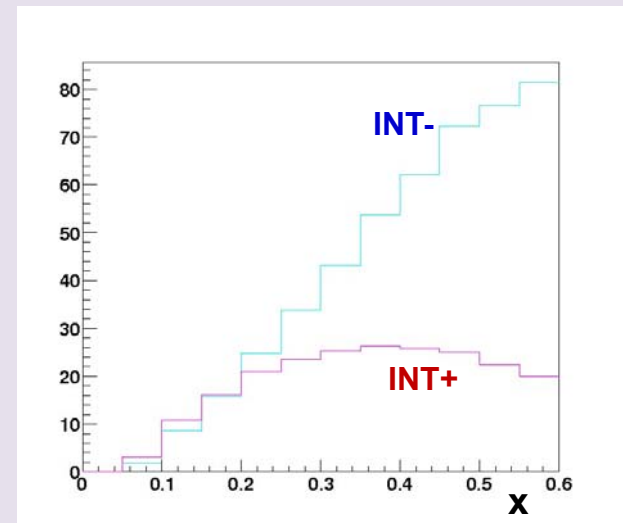


$F_V - F_A$: систематическая ошибка

ширина x-полосы: выбранный кинематический диапазон разбивается на x-полосы $dx=0.035$ (максимальное разрешение по x) $dx=0.07$; результаты сравниваются с основным ($dx=0.05$):

$$\epsilon_{\text{syst}} \sim 2 \cdot 10^{-2}$$

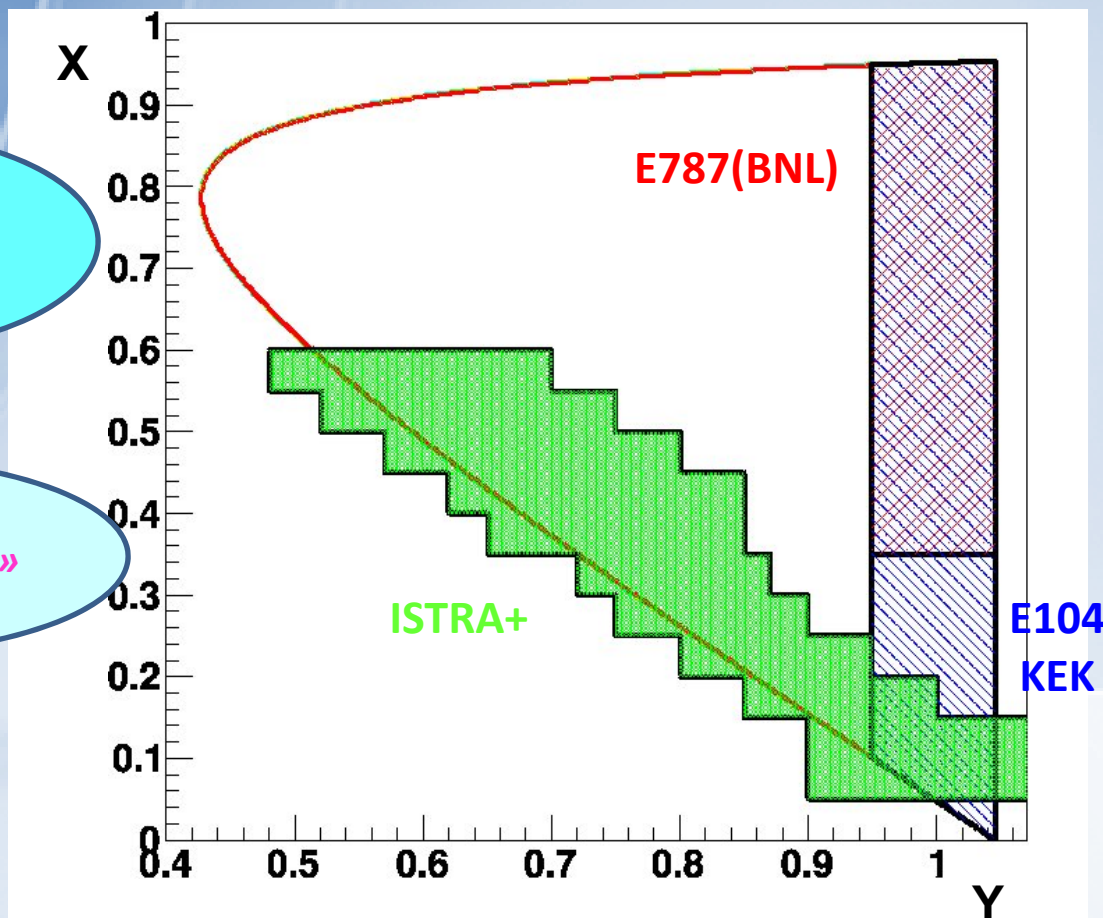
Возможный вклад INT+: добавление INT+ с $F_V + F_A = 0.165$ и $F_V + F_A = -0.165$ в фитирующую функцию; сдвиг результата дает систематическую ошибку : $\epsilon_{\text{syst}} \sim 1.4 \cdot 10^{-2}$



Выбранный кинематический диапазон: комплементарность с предыдущими экспериментами; область малых y ранее не изучена

~49.7К
«взвешенных»
событий

~22К
«невзвешенных»
событий



$F_V - F_A$: сравнение с КТВ $O(p^4)$

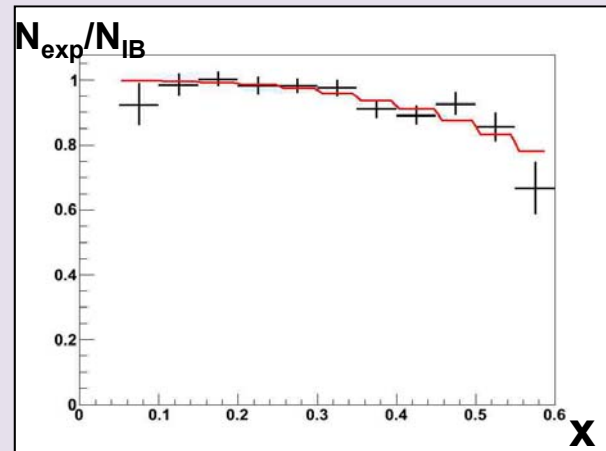
$$F_V - F_A = 0.21 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.04(\text{syst})$$

$$\chi^2/\text{ndf} = 6.9 / 9$$

КТВ $O(p^4)$



$$F_V - F_A = 0.052$$



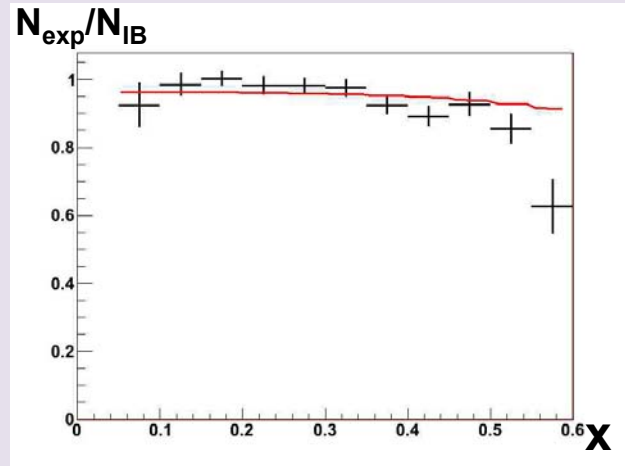
$\sim 2.8\sigma$ выше КТВ $O(p^4)$

$F_V - F_A$: сравнение с LFQM

F_V, F_A взяты из теории

LFQM

$\chi^2/ndf = 24.1 / 10$



$\sim 3\sigma$ отклонение от $\chi^2=1$

$F_V - F_A$: сравнение с КТВ $O(p^6)$

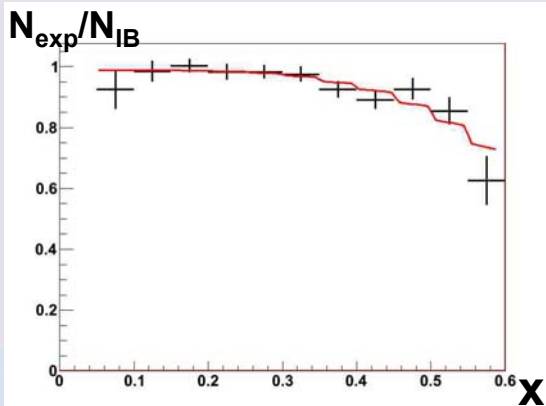
КТВ $O(p^6)$

$$F_V = F_V(0) * [1 + \lambda(1-x)]$$

$$F_V(0) = 0.082$$

$$F_A \approx 0.034$$

$$\lambda = 0.4$$



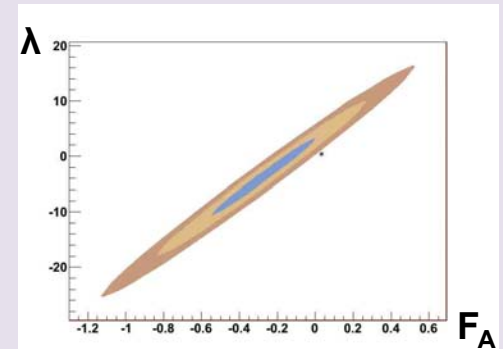
ИСТРА+

$F_V(0)$ - из теории

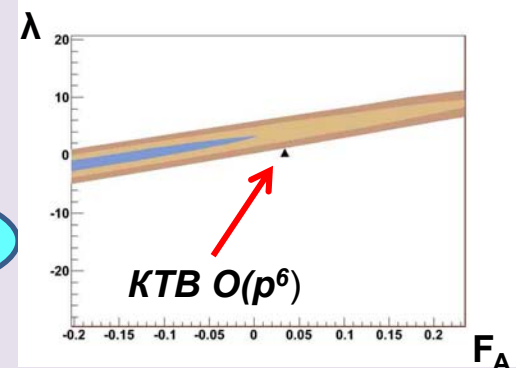
$$F_A = -0.27 \pm 0.28$$

$$\lambda = -3.6 \pm 7.0$$

F_A и λ : сильная корреляция



$$\chi^2/ndf = 6.2 / 8$$



Окончательный результат

авторы	коллобация	год	кинематическая область	результат
Barmin et al	ИТЕР	1988	$P_\mu < 231.5 \text{ MeV}/c$	$BR(IB) = (6.0 \pm 0.9) * 10^{-3}$
Demidov et al	ИТЕР	1990	$P_\mu < 231.5 \text{ MeV}/c$	$BR(IB) = (6.6 \pm 1.5) * 10^{-3}$
Akiba et al	E104 (КЕК)	1985	$214.5 < P_\mu < 231.5 \text{ MeV}/c$	$BR(IB) = (5.4 \pm 0.3) * 10^{-3}$
Adler et al	E787 (BNL)	2000	$P_\mu > 218.4 \text{ MeV}/c$ $E_\gamma > 90 \text{ MeV}$	$BR(SD+) = (1.33 \pm 0.22) * 10^{-5}$
Duk et al	ISTRA+	2010	$12 < E_\gamma < 148 \text{ MeV}$ ($0.05 < x < 0.6$)	$F_V - F_A = 0.21 \pm 0.04 \pm 0.04$

E787: 2800 событий
ИСТРА+: ~22К событий

**~8-кратное
увеличение
статистики**

ВЫВОДЫ

- Распад $K \rightarrow \mu \nu \gamma$ выделен на установке ИСТРА+ в ранее не изученном кинематическом регионе
- Наблюдаемое **число событий** составило **22К** (самая большая статистика в мире)
- Впервые измерен вклад INT-
 $F_V - F_A = 0.21 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.04(\text{syst})$
- Знак INT- отрицательный

Спасибо за внимание!

