

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-512

P1-96-512

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОРМФАКТОРОВ  
 $\lambda_+$  И  $\lambda_0$  В  $K_{\mu 3}^-$  И  $K_{e 3}^-$ -РАСПАДАХ

Направлено в журнал «Ядерная физика»

1996

В.М.Артемов, А.Д.Волков, Г.А.Емельяненко, Б.Ж.Залиханов, Е.В.Комиссаров,  
В.С.Курбагов, В.З.Сердюк, В.В.Сидоркин, И.Н.Силин, С.В.Ященко  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В.Н.Болотов, С.А.Волков, Е.Н.Гущин, С.В.Лаптев, В.Н.Марин, И.Н.Семенов,  
В.Л.Шматков  
Институт ядерных исследований РАН, Москва

А.В.Восканян, А.Ж.Кетикян  
Ереванский физический институт

В.Ф.Константинов  
Институт физики высоких энергий, Протвино

## 1 Введение

В настоящей работе приводятся результаты совместного анализа данных по  $K_{\mu 3}^-$  и  $K_{e 3}^-$  распадам. Информация была получена на установке ИСТРА-М [1]. Установка расположена на канале 4А ускорителя У-70 в Протвино.

Установка ИСТРА-М — это существенно модернизированный вариант установки ИСТРА, на которой в конце 80-х годов был получен ряд интересных результатов по  $\pi^-$ ,  $K^-$  распадам [2, 3]. В 1988–1992 годах установка подверглась модернизации: была заменена пучковая и трековая части, поставлен спектрометрический магнит, добавлены адронный калориметр и мюонный детектор. С 1992 года по настоящее время проведено три сеанса.

В данной работе анализируется  $\sim 3000$  событий распада  $K^- \rightarrow \mu^- \nu \pi^0$  ( $K_{\mu 3}$ ) и  $\sim 3000$  событий распада  $K^- \rightarrow e^- \nu \pi^0$  ( $K_{e 3}$ ), полученных в апрельском сеансе 1992 года.

## 2 Установка

Канал 4А на У-70 — это несепарированный пучок  $K^-$ ,  $\pi^-$  мезонов с импульсом  $\sim 30$  ГэВ/с, доля каонов 3–4%.

На рис. 1 показана схема установки ИСТРА-М. Пучковая частица отклонялась магнитом ВМ, ее траектория до распада в вакуумной трубе измерялась пропорциональными камерами РС 3–6.  $K^-$ -мезоны отделялись от  $\pi^-$ -мезонов с помощью пороговых черенковских счетчиков. Траектория и импульс вторичной частицы измерялись системой дрейфовых камер до магнита и дрейфовых трубок после него. Координата и энергия  $\gamma$ -квантов измерялась электромагнитным калориметром SP-1. Далее располагался адронный калориметр. За адронным калориметром следует 2 м железа, за которым находится мюонный детектор.

Конструктивные особенности электромагнитного спектрометра, характеристики детектора и отдельных его счетчиков, способы настройки, вопросы, связанные с алгоритмами калибровки, реконструкции событий в спектрометре подробно изложены в работах [3, 4, 5]. Конструкция адронного калориметра, а также испытание калориметра на пучках мюонов, пионов и электронов описаны в работах [6], [7].

## 3 Отбор событий

Работа по анализу событий  $K_{\mu 3}$ -распада была проделана ранее, и ее результаты были опубликованы отдельно [8]. Поэтому здесь мы опускаем подробности отбора событий  $K_{\mu 3}$ .

В качестве кандидатов в  $K_{e 3}$ -распады отбирались события с двумя  $\gamma$ -квантами в SP-1 и заряженной частицей, имеющей сигнатуру электрона. Для идентификации электрона использовались следующие особенности отклика детекторов

установки на электрон. При прохождении через SP-1 электрон теряет практически всю энергию. Для электронов энергосодержание в SP-1 в пределах ошибок совпадает с импульсом, определенным по магнитному спектрометру. Энергосодержание от электрона в НС мало: в 34 % случаев электрон имеет энергосодержание ниже порога (300 МэВ). С учетом этого, налагались следующие критерии:

1. Совпадение в пределах ошибок энергосодержания в электромагнитном спектрометре с импульсом, измеренным по магнитному спектрометру;
2. Энергосодержание в адронном калориметре  $< 1,0$  ГэВ;
3. Отсутствие отклика мюонного детектора.

На рис. 2 представлено распределение отобранных таким образом событий по квадрату недостающей массы и эффективной массе двух  $\gamma$ -квантов. События явно сосредоточены в области  $M_{miss}^2 \sim 0$  ГэВ<sup>2</sup> и  $M_{\gamma\gamma} \sim m_{\pi^0}$ . Далее проводился кинематический фит на гипотезу  $K_{e3}$  (2С-фит).

На стадии кинематического анализа применялся нетрадиционный подход к системе обработки данных, в котором в минимизируемом функционале фигурируют непосредственно измеренные координаты [9]. Математический аппарат, развитый в рамках этого подхода и описанный в работах [10, 11], может быть использован при минимизации функционалов со связями не только типа равенств, но и неравенств. При проведении кинематического фита нами использовалась новая программа минимизации регулярных функций FUMIVI, позволяющая работать с произвольными ограничениями на область изменения параметров [12].

На распределении событий, прошедших фит на гипотезу  $K_{e3}$  (рис. 3), заметна концентрация событий в области  $T_e^* > 0,1$  ГэВ.  $T_{\pi^0}^* = (0,1 \div 0,12)$  ГэВ. Фоном для распада  $K_{e3}$ , может являться распад  $K_{\pi 2}$ , т.к. вероятность перепутать  $\pi^-$ -мезон с электроном довольно высока. Чтобы избавиться от этого фона все события были пропущены через фит на гипотезу  $K_{\pi 2}$ , и события, прошедшие этот фит с  $P(\chi^2) > 1,0\%$ , были исключены из результирующей выборки. Результат представлен на рис. 4. Видно, что избытка событий в указанной области больше нет. Очевидно, что таким образом мы выбрасываем некоторое количество событий, являющихся на самом деле распадами  $K_{e3}$ , искажая тем самым результирующее распределение. Для определения доли таких событий было смоделировано достаточно большое количество событий распада  $K_{e3}$  и все они были пропущены через фит на гипотезу  $K_{\pi 2}$ . Таким образом для каждой клетки далитц-плота была найдена вероятность отбрасывания истинного события распада  $K_{e3}$ . Далее была проделана соответствующая корректировка количества событий в клетках далитц-плота. Рис. 5 дает качественное представление об области далитц-плота, где вероятность отбросить  $K_{e3}$ -события достаточно велика.

Напомним, что в случае распада  $K_{\mu 3}$ , распад  $K_{\pi 2}$  также являлся источником фона, но только когда  $\pi^-$ -мезон распадался на лету, и установка регистрировала мюон от этого распада. Распады  $K_{\pi 2}$  с последующим распадом  $\pi^-$ -мезона

не могут являться источником существенного фона для распада  $K_{e3}$ , так как установка позволяет надежно отделять мюоны от электронов.

## 4 Определение параметров разложения формфакторов в $K_{l3}$ -распаде.

В рамках V-A теории амплитуда распада  $K_{l3}$  имеет вид [14]

$$M = (G/\sqrt{2}) \sin \theta_c \bar{u}_\mu \gamma_\alpha (1 + \gamma_5) u_\nu < \pi^0 | V_\alpha^{(1)} | K >. \quad (1)$$

Используя фундаментальные предположения о лоренц-инвариантности можно записать следующее выражение для адронного тока:

$$< \pi^0 | V_\alpha^{(1)} | K > \sim (k + q)_\alpha f_+(t) + (k - q)_\alpha f_-(t), \quad (2)$$

где  $k, q$  — 4-импульсы каона и пиона, а  $t = (k - q)^2$  — квадрат 4-импульса, переданного лептонной паре. Плотность распределения событий по далитц-плоскости имеет вид:

$$\rho(E_\pi, E_l) \sim A f_+^2(t) + B f_+(t) f_-(t) + C f_-^2(t), \quad (3)$$

где  $A, B, C$  — известные функции  $E_\pi, E_l$ .

В соответствии с гипотезой T-инвариантности формфакторы  $f_+(t)$  и  $f_-(t)$  считаются реальными. Обычно  $f_+(t)$  используется в виде разложения по степеням  $t$ :

$$f_+(t) = f_+(0) [1 + \lambda_+ (\frac{t}{m_\pi^2}) + \dots], \quad (4)$$

при этом, как правило, ограничиваются линейным приближением. Вместо  $f_-$  обычно используют другой формфактор:

$$f_0(t) = f_+(t) + \frac{t}{M_K^2 - m_\pi^2} f_-(t), \quad (5)$$

который также представляют в виде разложения по степеням  $t$ :

$$f_0(t) = f_0(0) [1 + \lambda_0 (\frac{t}{m_\pi^2}) + \dots], \quad (6)$$

и ограничиваются линейными членами. Последнее эквивалентно неявному предположению о слабой зависимости от  $t$  формфактора  $f_-(t)$ . Таким образом, анализ экспериментальных данных должен давать информацию о значениях  $\lambda_+, \lambda_0$ .

## 5 Анализ плотности распределения событий по далитц-плоскости

На рис. 6 представлен далитц-плот для событий, прошедших все этапы отбора, в разбиении, использованном при анализе. Видно, что практически вся площадь далитц-плота хорошо статистически обеспечена. Это является следствием достаточно высокой энергии  $K^-$ -мезонов, т.к. в результате эффективность регистрации распадов мало зависела от энергии вторичных частиц в системе центра масс. Следующий необходимый шаг — корректировка этого распределения с учетом акцептанса установки.

Для расчета акцептанса было сгенерировано методом Монте-Карло по  $\sim 500.000$  событий распада  $K_{\mu 3}$  и  $K_{e 3}$ . Предварительно было проведено тестирование программы моделирования на распаде  $K_{\mu 2}$ . На рис. 7 приведено сравнение типичных экспериментальных и смоделированных распределений. Для каждого из распадов в каждой ячейке далитц-плота было найдено отношение числа "зарегистрированных" событий к числу событий сгенерированных. Полученные таким образом значения были использованы для коррекции плотности распределения экспериментальных событий по далитц-плоскости. Коррекция производилась путем деления числа событий в каждой ячейке на соответствующее значение акцептанса и последующей нормировки на общее число найденных событий.

На рис. 8 и 9 показаны скорректированные распределения для  $K_{\mu 3}$  и  $K_{e 3}$  соответственно, использованные при фите.

В результате отдельного анализа  $\sim 3000$  событий  $K_{\mu 3}^-$  распада с использованием линейного приближения формфакторов в параметризации  $\lambda_+$ ,  $\lambda_0$  были получены следующие значения:

$$\lambda_+ = 0,014 \pm 0,024,$$

$$\lambda_0 = 0,058 \pm 0,020.$$

Значение  $\chi^2$  было равно 91, при числе степеней свободы  $\text{ndf} = 74$ .

Для распада  $K_{e 3}$  плотность распределения событий практически не зависит от  $\lambda_0$ , т.к. соответствующий формфактор входит в выражение для плотности с множителем, пропорциональным квадрату массы электрона. Полученное нами значение для  $\lambda_+$  в распаде  $K_{e 3}$ :

$$\lambda_+ = 0,018 \pm 0,007,$$

при  $\chi^2 = 100$  и числе степеней свободы  $\text{ndf} = 81$

Видно, что полученные значения  $\lambda_+$  для  $K_{\mu 3}$  и  $K_{e 3}$  согласуются в пределах ошибок. Это позволяет в предположении  $(\mu - e)$ - универсальности провести совместный фит полученных данных. Совместный фит дал следующие значения:

$$\lambda_+ = 0,017 \pm 0,007,$$

$$\lambda_0 = 0,057 \pm 0,017.$$

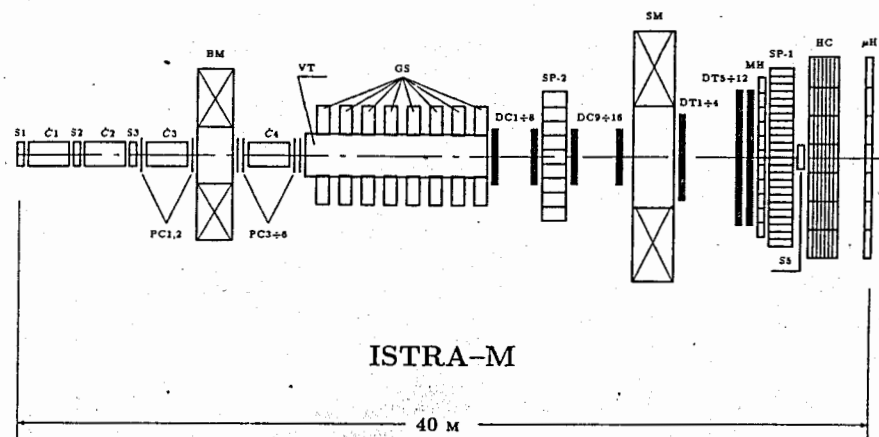


Рис. 1. Схема установки ИСТРА-М

- S1÷5 — спинтилляционные счетчики;
- C1÷4 — газовые черенковские счетчики;
- BM, SM — пучковый и спектрометрический магниты;
- PC1÷6 — пропорциональные камеры;
- VT — распадный объем;
- GS — охранная система;
- DC1÷16 — дрейфовые камеры;
- SP1÷2 — черенковский спектрометр;
- DT1÷12 — дрейфовые трубки;
- MH — матричный годоскоп;
- HC — адронный калориметр;
- μH — мюонный годоскоп.

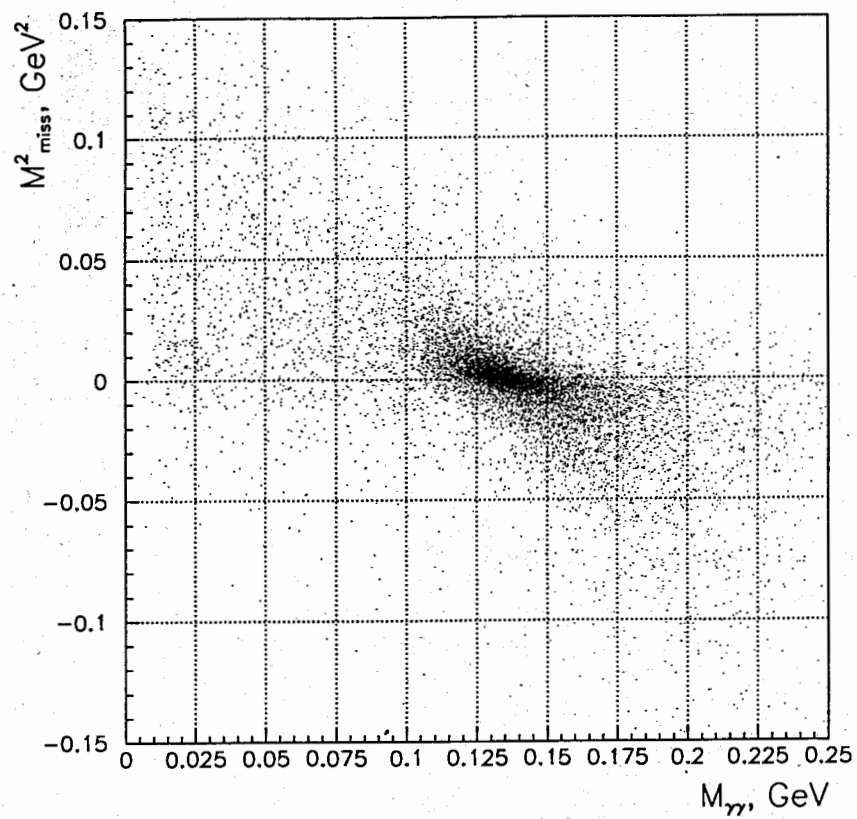


Рис. 2. Распределение событий-кандидатов на плоскости  $M_{\gamma\gamma}$ ,  $M_{miss}^2$

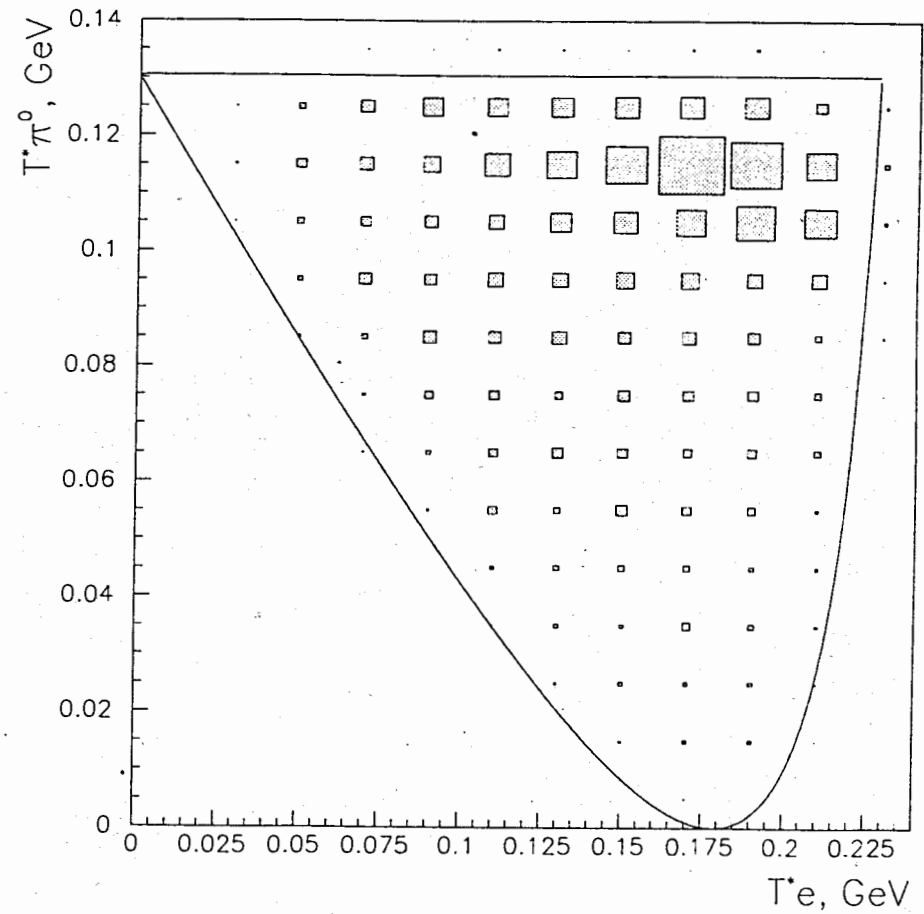


Рис. 3. Распределение событий на далитц-плоскости после фита на гипотезу  $K_{e3}$

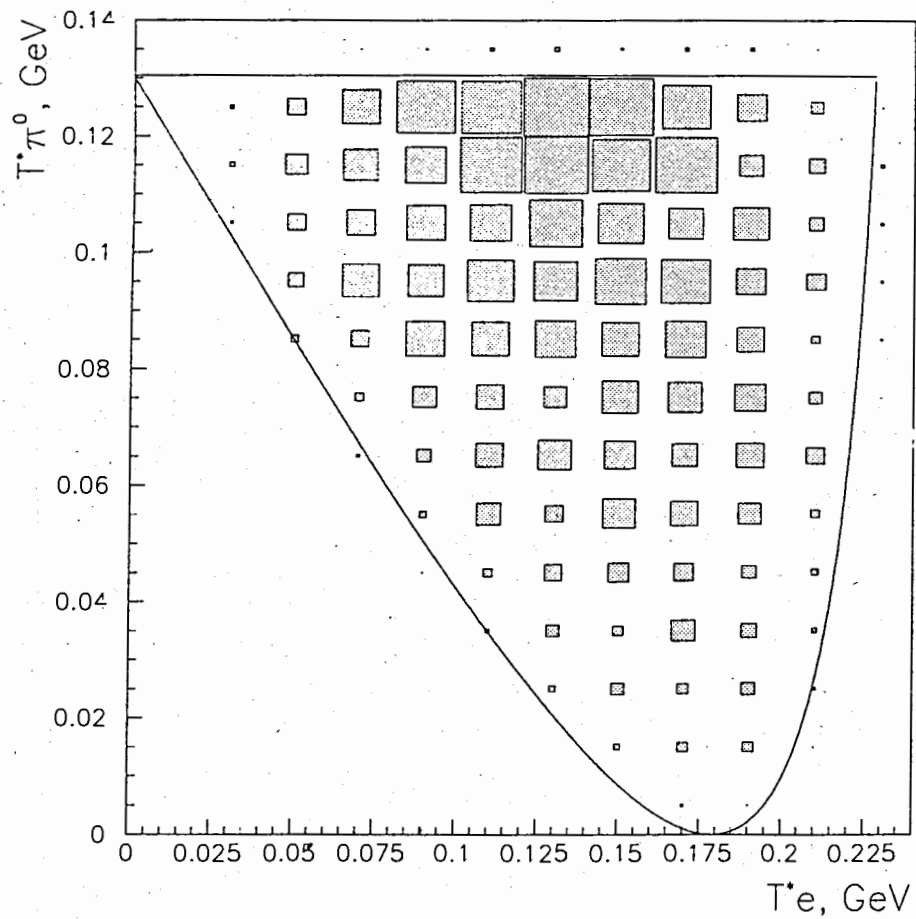


Рис. 4. Распределение событий на далитц-плоскости после вычета событий, прошедших фит на гипотезу  $K_{\pi 2}$

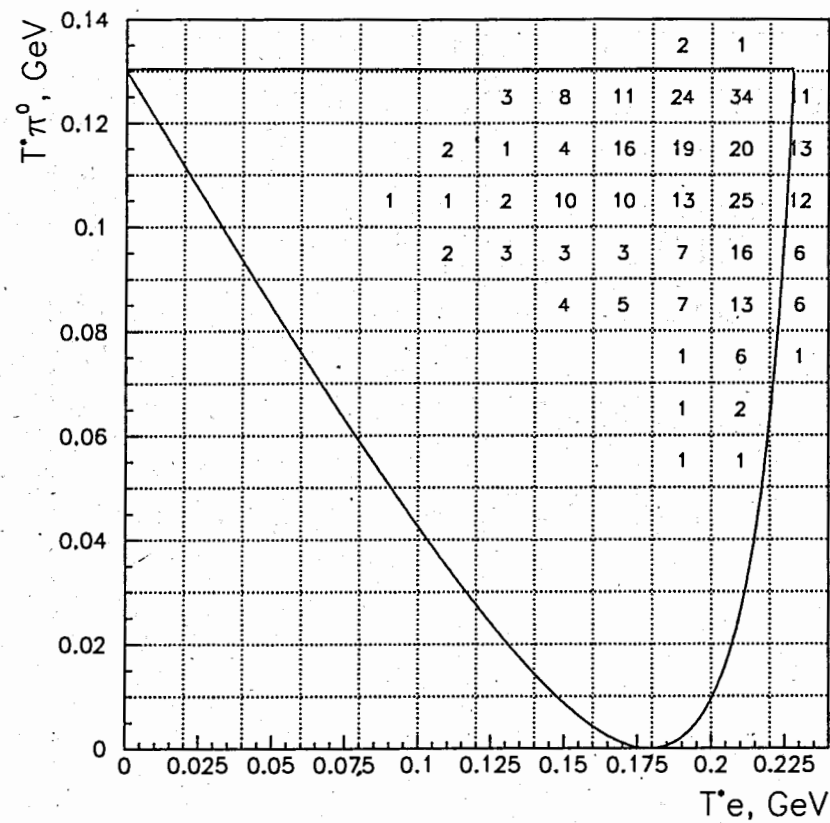


Рис. 5. Распределение смоделированных событий  $K_{e3}$ , прошедших фит на гипотезу  $K_{\pi 2}$

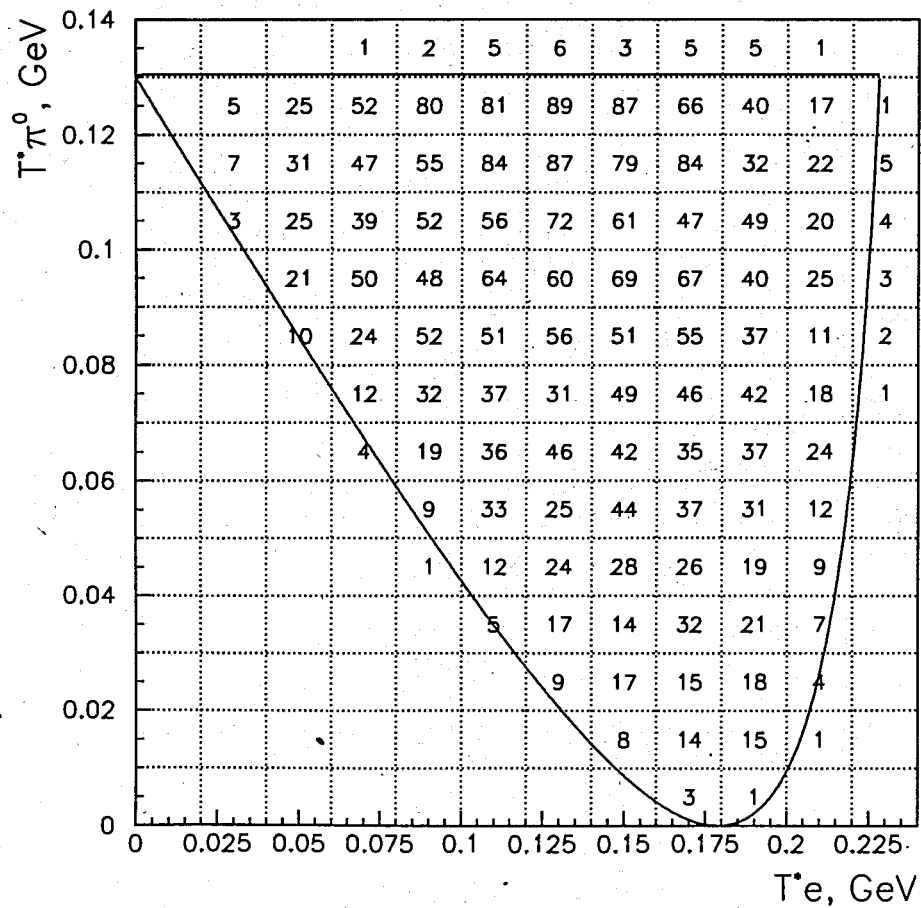


Рис. 6. Распределение событий на далиц-плоскости без поправки на акцептанс установки.

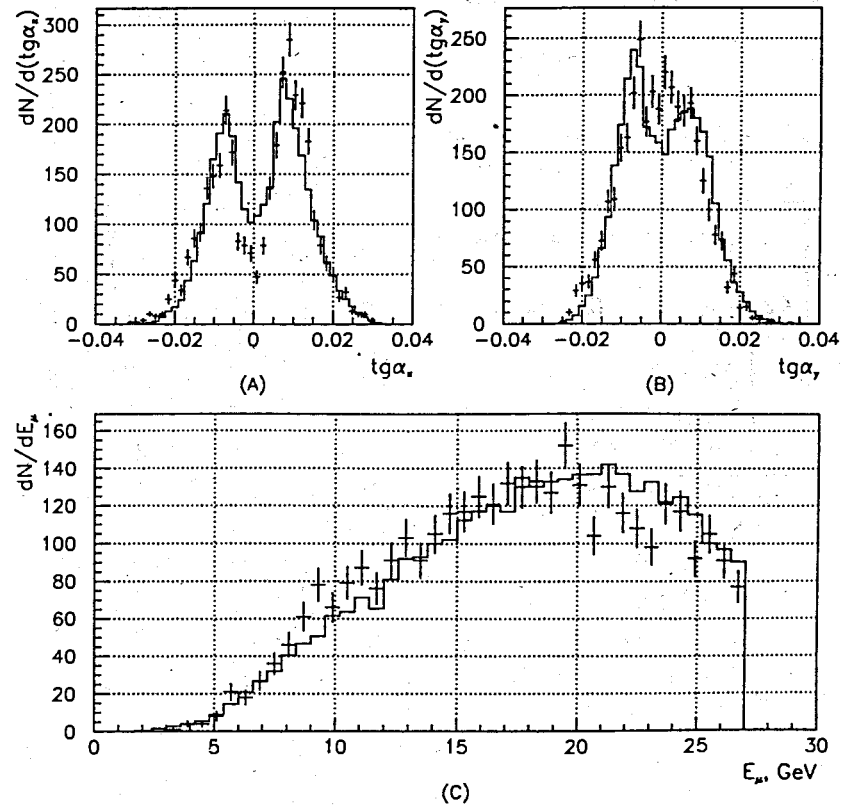


Рис. 7. Сравнение результатов, полученных с помощью программы моделирования с экспериментом. А, В - угловые распределения по X и Y соответственно; С - распределение по энергии мюона. Сплошная линия соответствует смоделированным данным.

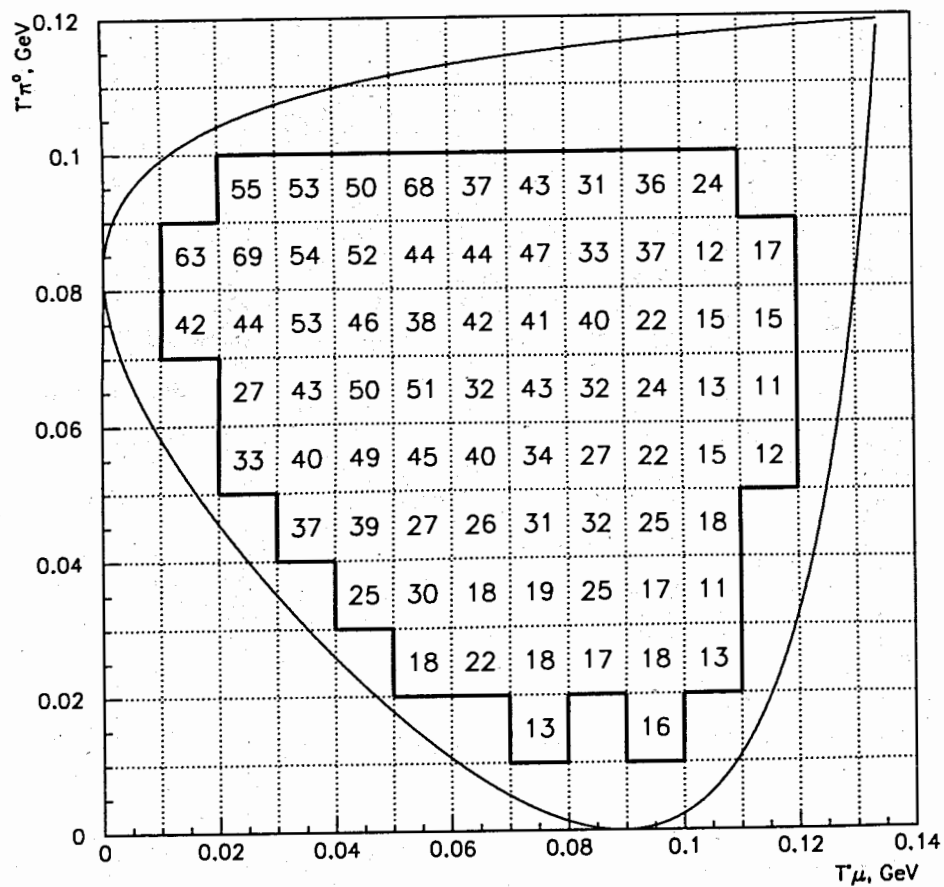


Рис. 8. Распределение событий  $K_{\mu 3}$ -распада, использованное при фите .

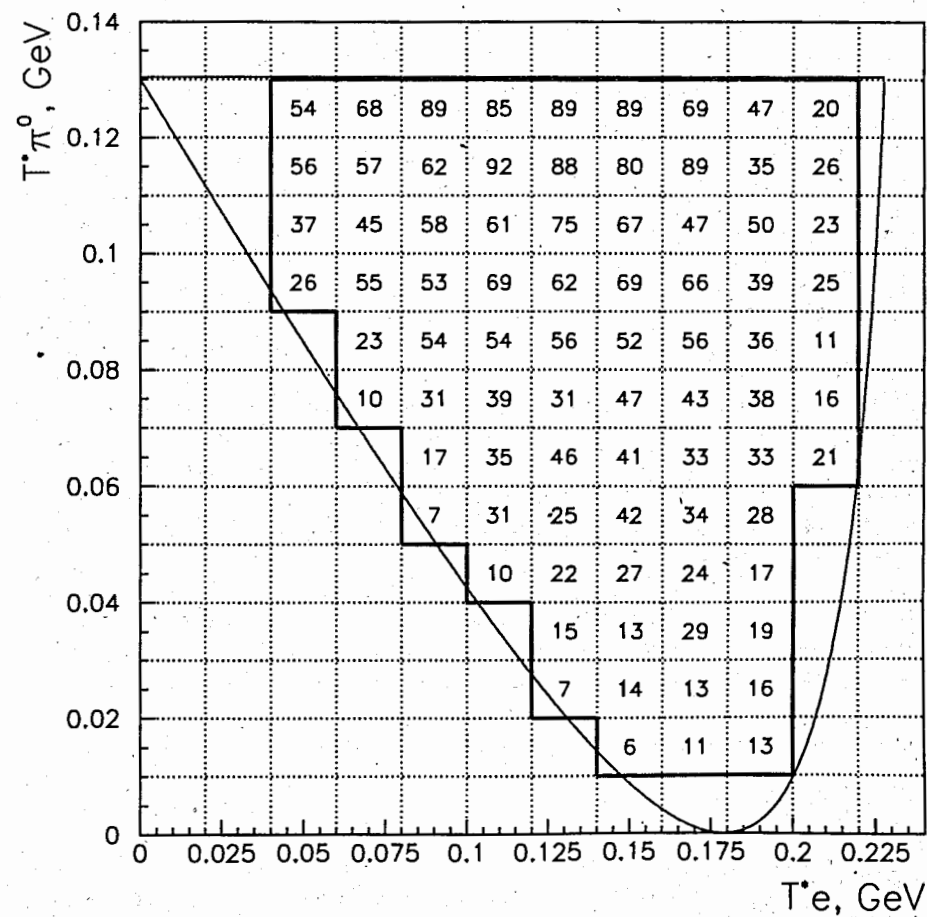


Рис. 9. Распределение событий  $K_{e 3}$ -распада, использованное при фите .



## 6 Заключение

Напомним, что PDG [15] приводит для параметров формфакторов следующие значения:

$$\lambda_+ = 0,033 \pm 0,008,$$

$$\lambda_0 = 0,004 \pm 0,007.$$

Значение  $\lambda_+$ , полученное нами, близко к среднему мировому значению, что касается  $\lambda_0$ , то оно больше данных PDG, правда, достаточно большая величина ошибки в нашем эксперименте не позволяет сделать жестких утверждений.

С другой стороны приводимые PDG данные экспериментов по  $\lambda_0$  для  $K_{\mu 3}^{\pm}$ -распада сильно отличаются друг от друга, что ставит вопрос о справедливости среднего значения  $\lambda_0$ . Кроме того,  $\lambda_0$ , полученное из распадов  $K_{\mu 3}^0$ , равно  $\lambda_0 = 0,025 \pm 0,006$

Можно, таким образом, сказать, что экспериментальная ситуация с параметром  $\lambda_0$  до сих пор не ясна, нужны более точные данные с хорошим знанием установки.

В настоящее время существует довольно большое количество теоретических работ, где даются оценки формфакторов в полупертоновых распадах  $K$ -мезонов. Если использовать линейное приближение формфакторов, то практически все они дают для  $\lambda_+$  значения, близкие к компиляции PDG. Что касается  $\lambda_0$ , то наблюдается довольно большой разброс значений. Например, J. Gasser [16] в рамках СНРТ дает значение

$$\lambda_0 = 0,017 \pm 0,004$$

В рамках модели [17], где сильные взаимодействия учтены точно с помощью системы интегральных уравнений и где соотношение Каллана-Треймана используется для регуляризации петлевых поправок, дается значение

$$\lambda_0 = 0,01.$$

В другой работе [18] в рамках кварковой модели получено практически нулевое значение  $\lambda_0$ .

В модели [19] с использованием техники суперпропагаторов получено значение  $\lambda_0 = 0,03$ .

В заключение авторы выражают признательность дирекции ЛЯП ОИЯИ, ИФВЭ, ИЯИ, ЕРФИ за помощь в проведении работ, сотрудникам служб ускорителя ИФВЭ, СНЭО ОИЯИ за помощь в подготовке и проведении эксперимента.

Данная работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант N95-02-05973).

## Литература

[1] Болотов В.Н. и др. Установка ИСТРА-М для исследования редких распадов заряженных легких мезонов, Препринт ИФВЭ 95-11, 1995

- [2] Болотов В. Н. и др. Экспериментальное изучение редких мод распада  $K^-$ :  $K^- \rightarrow \pi^0 \gamma e^- \bar{\nu}$ ,  $K^- \rightarrow \pi^0 \pi^0 e^- \bar{\nu}$ , ЯФ 44, вып 1(7), 1986(108); Изучение распада  $K^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0$ , ЯФ 44, вып 1(7), 1986, 117; Экспериментальное исследование структурного излучения в распаде  $K^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \gamma$ , ЯФ 45, вып 6, 1987, 1652; Наблюдение распада  $K^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \gamma$ , Письма в ЖЭТФ, том 42, вып 9, стр 390-392; Измерение формфактора распада  $K^- \rightarrow \pi^- \nu \gamma$ , Письма в ЖЭТФ, том 47, вып. 1, стр. 8-11;
- [3] А. Поблагуев, Экспериментальное изучение радиационного распада пиона  $\pi^- \rightarrow e^- \nu \gamma$ , Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Москва, 1994 г.
- [4] В.Н. Болотов, С.Н. Гниненко, Р.Н. Джилкибаев и др., Годоскопический черенковский спектрометр полного поглощения. Препринт ИЯИ АН СССР, П-0428, Москва, 1985.
- [5] С.Н. Гниненко, Ю.М. Клубаков, В.Е. Постоев, А.Н. Торопин, Калибровка 480-канального годоскопического черенковского спектрометра установки ИСТРА-М ИЯИ Препринт ИЯИ АН СССР, П-0485, Москва, 1986.
- [6] С. А. Волков, В. К. Семенов, Мюонная калибровка годоскопических счетчиков адронного калориметра установки ИСТРА, Препринт ИЯИ — 801/93, 1993
- [7] В. Н. Болотов, С. А. Волков, О. П. Гавришук, В. В. Исаков, В. Е. Постоев, В. К. Семенов: Годоскопический адронный калориметр с продольным секционированием. Препринт ИЯИ-802/93, Москва, 1993
- [8] В.М. Артемов и др.: Определение параметров формфакторов  $\lambda_+$  и  $\lambda_0$  в  $K_{\mu 3}$ -распаде, Препринт ОИЯИ P1-95-330, 1995
- [9] A. J. Ketikian, E. V. Komissarov, V. S. Kurbatov, I. N. Silin: Generalised Kinematical fit in event reconstruction, Nuclear Instruments and Methods. A314. (1992)572
- [10] A. J. Ketikian, E. V. Komissarov, V. S. Kurbatov, I. N. Silin: New algorithm for minimizing  $\chi^2$  functionals with constraints, Nuclear Instruments and Methods. A314 (1992)578
- [11] A. J. Ketikian, V. S. Kurbatov, I. N. Silin: New minimization algorithm with constraints, Proceedings of the International Conference on Computing in High Energy Physics' 92, CERN 92-07, 1992, p. 883
- [12] New method for minimizing regular functions with constraints on parameter region, Nuclear Instruments and Methods, A314, (1994)346

- [13] В. М. Артемов, В. Н. Болотов, А. Д. Волков, Е. Н. Гушин, Г. А. Емельяненко, Б. Ж. Залиханов, А. Ж. Кетикян, Е. В. Комиссаров, В. С. Курбатов, И. Н. Семенюк, В. В. Сердюк, В. В. Сидоркин, И. Н. Силин, С. В. Яценко: Калибровка спектрометрического магнита установки ИСТРА-М на физическом процессе. Дубна, P10-94-521, 1994.
- [14] L.M. Chounet et al. Phys. Rep. 4. no 5(1972), 199
- [15] *Review of Particle Properties*, Phys. Rev., D50 (1994)1530
- [16] Proceedings of the Physics and Detectors for DAΦNE, 1991, p. 291
- [17] Арбузов А.Б., Воскресенская О.О., Кураев Э.А., частное сообщение
- [18] Герасимов С.Б. ЯФ 29 (1979) 513
- [19] Volkov M.K. et al, PL B64 (1976)21

Рукопись поступила в издательский отдел  
31 декабря 1996 года.

Артемов В.М. и др.

P1-96-512

Определение параметров формфакторов  $\lambda_+$  и  $\lambda_0$   
в  $K_{\mu 3}$ - и  $K_{e 3}$ -распадах

Приводятся результаты анализа ~ 3000 событий распада  $K_{\mu 3}$  и ~ 3000 событий распада  $K_{e 3}$ , полученных на установке ИСТРА-М (У-70, Протвино).

В результате совместного фита в предположении  $\mu - e$ -универсальности получены следующие значения для параметров формфакторов:  $\lambda_+ = 0,017 \pm 0,006$ ,  $\lambda_0 = 0,057 \pm 0,017$ .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996

Перевод авторов

Artemov V.M. et al.

P1-96-512

Determination of Form Factor Parameters  $\lambda_+$  and  $\lambda_0$   
in  $K_{\mu 3}$ - and  $K_{e 3}$ -Decays

The results of the analysis of ~ 3000  $K^- \rightarrow \mu^- \nu \pi^0$  events and ~ 3000  $K^- \rightarrow e^- \nu \pi^0$  events from ISTRA-M setup (U-70, Protvino) are described.

The joint fit of both  $K_{\mu 3}$  and  $K_{e 3}$  decays under assumption of  $\mu - e$ -universality has given the following values form factor parameters:  $\lambda_+ = 0.017 \pm 0.006$ ,  $\lambda_0 = 0.057 \pm 0.017$ .

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1996