



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи  
2005–38

Козелов Александр Владимирович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РАСПАДОВ  
 $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  НА УСКОРИТЕЛЕ ИФВЭ**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Протвино 2005

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Протвино).

Научный руководитель – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук С.П. Денисов.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В.Н. Ройнишвили (ОИЯИ, г. Дубна), доктор физико-математических наук В.А. Уваров (ИФВЭ, г. Протвино).

Ведущая организация – Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва).

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2005 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142284, г.Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 034.02.01

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Институт физики высоких энергий, 2005

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Распады каонов уже многие годы являются одной из интереснейших проблем, исследуемых в физике элементарных частиц. В частности, это связано с тем, что распады каонов позволяют проверять фундаментальные физические положения, лежащие в основе современного понимания природы взаимодействия и распадов элементарных частиц. Действительно, в их амплитуды дают вклад процессы, идущие на малых расстояниях, которые могут быть обусловлены как электрослабыми взаимодействиями, так и новой физикой за пределами Стандартной Модели (СМ). Поэтому результаты исследований распадов каонов могут быть использованы как для уточнения параметров СМ, так и для поисков новых взаимодействий. Однако для этого необходимо учитывать и вклад сильных взаимодействий на больших расстояниях. Так как до сих пор не известен механизм конфайнмента, используются феноменологические схемы, самой популярной из которых является киральная теория возмущений (КТВ). Эту теорию можно использовать для параметризации экспериментальных данных с помощью ограниченного числа параметров, являющихся важными феноменологическими величинами, значения

которых в настоящее время известны с недостаточной точностью. Поэтому вычисление амплитуд различных процессов (в частности, распадов  $K^\pm \rightarrow 3\pi$ ) в рамках КТВ и сравнение их с экспериментальными данными могут как уточнить значения этих параметров, так и проверить КТВ как универсальную феноменологическую схему.

Обнаружение прямого нарушения CP-симметрии в распадах нейтральных каонов дает основание для поиска этого эффекта в распадах заряженных  $K$ -мезонов. Он может, например, проявляться как зарядовая асимметрия параметров диаграммы Далитца для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ . Теоретические оценки зарядовой асимметрии линейного параметра наклона диаграммы Далитца для этих распадов весьма неопределенны и находятся в пределах от  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$ . Анализ имеющихся экспериментальных данных для этих распадов приводит к оценке величины зарядовой асимметрии  $\sim 5 \cdot 10^{-2}$ . Вряд ли можно ожидать нарушения CP-инвариантности на таком уровне, и указанное значение асимметрии, скорее всего, связано с недооценкой систематических погрешностей экспериментов, в каждом из которых исследовались распады каонов только одного знака. Значительно уменьшить систематическую ошибку возможно только путем измерения распадов каонов обоих знаков в одном эксперименте. Таким образом, экспериментальное исследование распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  является **актуальной** задачей физики высоких энергий.

**Целью диссертационной работы** является экспериментальное исследование распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ , включая разработку методики и создание программного обеспечения для реконструкции данных установки “Комплекс меченых нейтрино” (КМН) и анализ полученных результатов. Диссертация основана на результатах исследований, выполненных автором в 1994–2005 гг. в Отделе нейтринной физики Института физики высоких энергий (ИФВЭ).

#### **Научная новизна и практическая ценность**

В ходе выполнения диссертационной работы была разработана и реализована система реконструкции событий и анализа результатов на установке КМН. Проведены новые измерения параметров

диаграмм Далитца для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ . Получены оценки разности параметров диаграмм Далитца для распадов  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$  и  $K^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0$ . Частая смена знака заряда пучка позволила минимизировать систематические погрешности измерения зарядовой асимметрии и получить наиболее точную оценку зарядовой асимметрии  $A_g$  параметра наклона диаграммы Далитца для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  на сегодняшний день. Результаты измерения параметров диаграмм Далитца указывают на существенный вклад перерасеяния  $\pi^+ \pi^- \rightarrow \pi^0 \pi^0$  в матричные элементы распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  вблизи порогового значения инвариантной массы пары  $\pi^0 \pi^0$ .

Разработанные методы обработки результатов измерений и on-line и off-line анализа данных могут быть использованы в других экспериментах в области физики высоких энергий. Результаты измерений параметров диаграммы Далитца и их зарядовой асимметрии могут быть использованы для проверки современных теоретических представлений о структуре и взаимодействиях частиц, в частности, киральной теории возмущений. Все это определяет практическую ценность диссертационной работы.

**Автор защищает:**

- создание программного обеспечения и алгоритмов, позволяющих обрабатывать и проводить анализ данных экспериментов, осуществляемых на установке КМН;
- создание программы моделирования установки КМН, адекватно описывающей работу детекторов;
- результаты измерения параметров диаграмм Далитца для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ ;
- результаты измерения зарядовой асимметрии параметров диаграмм Далитца для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ .

**Апробация работы и публикации**

Апробация диссертации прошла в ГНЦ ИФВЭ 10 октября 2005 года. Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в виде препринтов ИФВЭ, в журналах "Ядерная физика", "Приборы и техника эксперимента" и "European Physics Journal-[1-7]. Они докладывались на конференции "Frontier Science – Charm,

Beauty and CP" (Фраскати, Италия, 2002 г.), сессиях Отделения ядерной физики Российской академии наук, а также на семинарах ИФВЭ.

### Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 81 странице печатного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения, содержит 35 рисунков, 10 таблиц и список цитируемой литературы, включающий 53 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность изучаемых проблем. Изложены цель исследования, научная новизна и практическая ценность работы, представлены положения, выносимые на защиту, а также кратко описана структура диссертации.

В **первой главе** диссертации дан обзор современного состояния расчетов матричных элементов распадов  $K \rightarrow 3\pi$  и возможных эффектов нарушения CP-инвариантности.

Традиционно квадрат модуля матричного элемента для распадов  $K^\pm \rightarrow 3\pi$  представляется в виде разложения по степеням инвариантных переменных

$$|M(u, v)|^2 \propto 1 + gu + hu^2 + kv^2 + \dots, \quad (1)$$

где  $u = (s_3 - s_0)/m_{\pi^+}^2$ ;  $v = (s_2 - s_1)/m_{\pi^+}^2$ ;  $s_i = (P_K - P_i)^2$ ;  $s_0 = \frac{1}{3} \sum_i^3 s_i$ ;  $p_K$  и  $p_i$  — 4-импульсы каона и  $i$ -ого пиона; 3 — индекс “нечетного” пиона.

Для описания реакций с участием мезонов, состоящих из легких кварков ( $u, d, s$ ), при энергиях до  $\sim 1$  ГэВ используется киральная теория возмущений (КТВ), которая представляет собой регулярную схему разложения амплитуд реакций с участием псевдоскалярных мезонов, фотонов и лептонных токов в ряд по малым импульсам и массам частиц. Как и всякая неперенормируемая теория поля,

КТВ включает в себя бесконечно много параметров, однако в подавляющем большинстве случаев достаточно знать 12 параметров, с помощью которых можно описать вклад сильных взаимодействий с точностью, достаточной для того, чтобы извлечь из данных по распадам мезонов информацию о взаимодействиях на малых расстояниях.

Другими словами, КТВ можно использовать для параметризации экспериментальных данных с помощью ограниченного числа параметров. В частности, можно провести совместный фит данных по распадам  $K \rightarrow 2\pi$  и  $K \rightarrow 3\pi$  и вычислить значения вышеупомянутых параметров, на основе которых можно получить “уточненные” оценки измеряемых величин. В диссертации приведены результаты подобных расчетов CP-четных параметров диаграммы Далитца распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ , полученные в результате вычислений в порядке  $O(p^4)$  КТВ.

Обнаружение прямого нарушения CP-симметрии в распадах нейтральных каонов дает основание для поиска этого эффекта в распадах заряженных  $K$ -мезонов. К числу возможных эффектов CP-нарушения относятся зарядовые асимметрии вероятности распада

$$A_\Gamma = \frac{\Gamma(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0) - \Gamma(K^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0)}{\Gamma(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0) + \Gamma(K^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0)}$$

и параметра наклона диаграммы Далитца

$$A_g = \frac{g^+ - g^-}{g^+ + g^-} = \frac{\Delta g}{g^+ + g^-} .$$

Отличие величин  $A_\Gamma$  и  $A_g$  от нуля становится возможным благодаря наличию в амплитуде слагаемых с разной динамической структурой и взаимодействию  $\pi$ -мезонов в конечном состоянии.

В диссертации приведены оценки величины зарядовой асимметрии параметра наклона диаграммы Далитца  $A_g$ , полученные различными авторами. Они находятся в пределах от  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$ .

Перерасеяние образовавшихся пионов не только делает возможным наблюдение эффектов CP-нарушения, но и приводит к

появлению дополнительных сингулярных вкладов в амплитудах распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ . Исходя из аналитичности и унитарности  $S$ -матрицы, можно получить разложение матричных элементов распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  и  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^+ \pi^-$  по степеням длин  $\pi\pi$ -рассеяния. В диссертации приведены результаты таких расчетов, выполненных Кабиббо и Исидори.

**Во второй главе** дано описание экспериментальной установки КМН. Здесь же приведены основные характеристики детекторов установки и рассмотрены системы отбора событий и сбора данных.

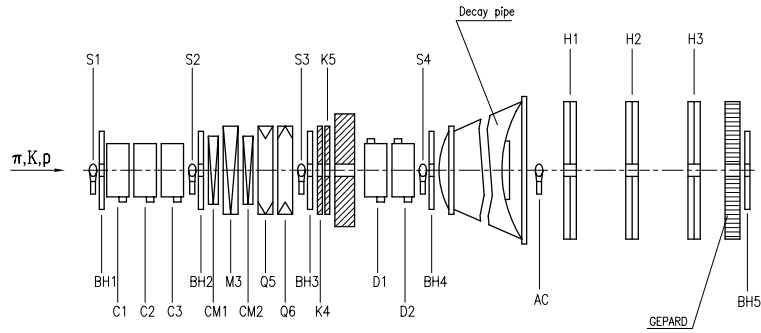


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (М — магниты; Q — квадрупольные линзы; CM — корректирующие магниты; K — коллиматоры).

Установка, общий вид которой приведен на рис. 1, имела в своем составе следующие основные элементы:

- пучковые сцинтилляционные (S) и черенковские (C, D) счетчики,
- пучковые сцинтилляционные годоскопы (BH1–BH5),
- распадную трубу длиной 58.5 м,
- счетчик антисовпадений (AC),
- сцинтилляционные годоскопы (H1–H3),
- электромагнитный калориметр типа “сэндвич” (GEPARD).



Триггер первого уровня формировался в соответствии с логической формулой

$$T1 = S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot S4 \cdot (D1 + D2) \cdot \overline{C1} \cdot \overline{C2} \cdot \overline{C3} \cdot \overline{AC} .$$

Триггер второго уровня анализировал энерговыделение в калориметре, используя аналоговые суммы сигналов со 144 ячеек. Для его срабатывания требовалось, чтобы по крайней мере в трех триггерных каналах сигнал превышал амплитуду, соответствующую энерговыделению  $\sim 0.8$  ГэВ.

Система сбора данных, использующая автономные контроллеры считывания и буферную память, позволяла принимать до 6500 событий в секунду.

**Третья глава** посвящена моделированию установки, которое осуществлялось методом Монте-Карло с помощью пакета GEANT 3.21. Наряду с детальным описанием геометрии установки учитывались данные, полученные в эксперименте: калибровочные коэффициенты для каждого канала электромагнитного калориметра, зависимости эффективности регистрации частиц сцинтилляционными годоскопами от их координат, корреляции между пространственными и угловыми координатами и импульсом каонов.

Особое внимание уделялось моделированию электромагнитного калориметра. Структура каждой его ячейки описана максимально подробно. В частности, учтены размеры и чередование слоев свинца и сцинтиллятора, расположение и размеры световода и стального защитного кожуха, окружающего ячейку. При моделировании отклика калориметра учитывалась его неоднородность, связанная с черенковским светом, излучаемым при прохождении частиц через световод. На рис. 2 показаны измерения неоднородности калориметра, полученные в тестовом сеансе, и результаты моделирования.

При моделировании прохождения частиц через установку были включены все механизмы взаимодействия, предусмотренные в пакете GEANT. Все нестабильные частицы могли распадаться, и продукты распада, а также все вторичные частицы, рожденные при взаимодействиях с веществом установки, прослеживались до их остановки

или распада. Были выбраны низкие электромагнитные и адронные пороги, что обеспечило адекватное описание развития ливней в калориметре.

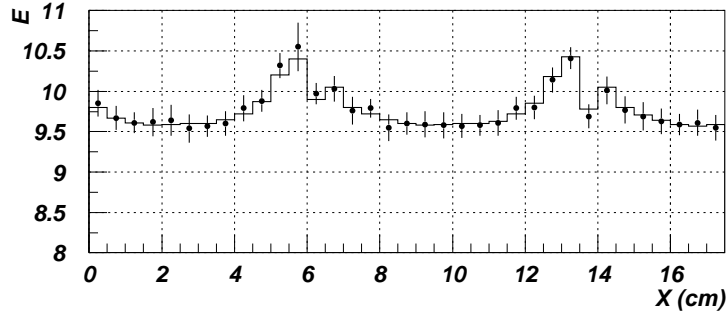


Рис. 2. Оклик электромагнитного калориметра  $E$  (ГэВ) в зависимости от координаты попадания электрона  $X$ , измеренной годоскопом (гистограмма — результат моделирования; точки — экспериментальные данные).

Программа моделирования позволяла записывать результаты в формате, совпадающем с форматом экспериментальных данных. Благодаря этому их обработка проводилась теми же программами реконструкции и анализа, что и для реальных данных.

Для проверки корректности описания установки удобно использовать распады  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ . С одной стороны, эти распады характеризуются простой кинематикой и высокой вероятностью. С другой стороны, в их конечном состоянии находятся  $\pi^\pm$ - и  $\pi^0$ -мезоны, как и в распадах  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ , изучению которых посвящена эта работа.

На рис. 3 представлены распределения по эффективной массе  $\gamma$ -квантов из распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ , энергия которых была измерена с помощью электромагнитного калориметра ГЕПАРД. Калибровка калориметра проводилась двумя способами: облучением каждой ячейки электронным пучком с энергией 10 ГэВ в начале набора статистики и анализом реконструированных событий распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$  в течение эксперимента. Разрешение по массе  $\pi^0$ -мезона оказалось равным 12.3 МэВ.

На рис. 4 сравниваются распределения экспериментальных и моделированных событий для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ . Из рисунка следует, что программа моделирования удовлетворительно описывает процессы, происходящие в реальной установке.

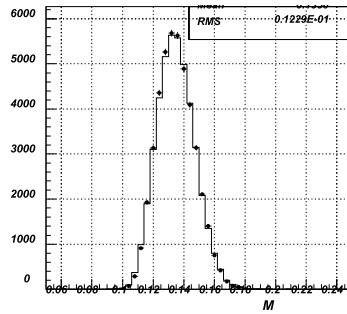


Рис. 3. Распределение событий по эффективной массе пары  $\gamma$ -квантов для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$  (гистограмма — моделированные события; точки — экспериментальные данные).

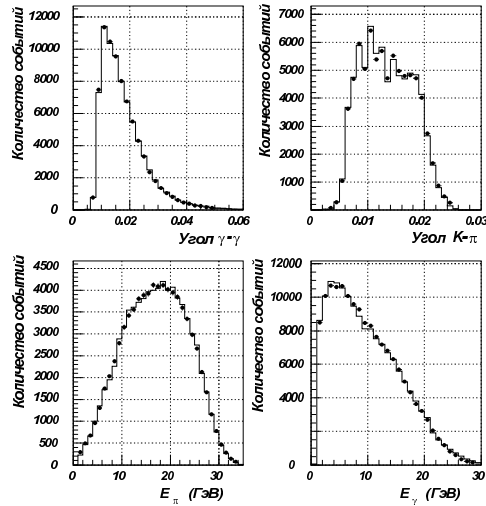


Рис. 4. Распределения событий по некоторым кинематическим переменным для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$  (точки — экспериментальные данные; гистограмма — результат моделирования).

**Четвертая глава** посвящена изучению зарядовой асимметрии параметров диаграммы Далитца для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ . Описаны процедуры реконструкции треков и кластеров энерговыделения, кинематического фита, сформулированы критерии отбора событий, а также изложена методика измерения зарядовой асимметрии и представлены экспериментальные результаты, включая оценки систематических погрешностей.

В обработке участвовали только те события, в которых гипотеза о пересечении вторичного трека с осью пучка имела уровень достоверности более 5%, а сама вершина лежала внутри объема распадной трубы, и которые удовлетворяли одному из следующих критериев:

- в калориметре восстановлены пять кластеров с энерговыделением более 1 ГэВ, и каждый из восстановленных треков проходит через один из этих кластеров;
- в калориметре найдены четыре кластера с энерговыделением более 1 ГэВ, и один из треков не связан с этими кластерами.

Последние два критерия связаны с тем, что есть заметная вероятность конверсии  $\gamma$ -кванта от распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  в  $e^+e^-$ -пару в выходном фланце распадной трубы, а заряженный пион может выделить в калориметре значительную энергию.

События, прошедшие такой предварительный отбор, подвергались кинематическому фиту, позволяющему учесть априорную информацию о распаде, разрешить комбинаторные неопределенности (например, ассоциировать один из реконструированных треков с  $\pi^\pm$ -мезоном) и вычислить кинематические переменные  $u$  и  $v$ .

Окончательная статистика составила  $N^+ = 278398$  и  $N^- = 341015$  событий. В табл. 1 приведена доля событий, оставшихся после применения указанных выше критериев, от полного числа триггеров и количества событий после предыдущего этапа.

Несмотря на тщательную селекцию событий, в отобранной для физического анализа статистике распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  имеется примесь фоновых событий. Источниками фона могут являться другие моды распада каонов, взаимодействие частиц с элементами установки и наложение событий из-за ограниченного временного разрешения аппаратуры.

Таблица 1. Отбор событий.

Критерий отбора событий	от предыд.	от полн.
Реконструировано $\geq 1$ трека в Н1–Н3	95.6%	95.6%
Вершина распада находится в объеме распадной трубы	68.8%	65.7%
Количество кластеров и треков соответствует распадам $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$	6.81%	4.48%
Прошло кинематический фит с $\chi^2 < 20$	17.8%	0.80%
Уровень значимости $P(\chi^2)$ кинематического анализа $> 0.1$	73.6%	0.59%
Выполнено условие программного триггера второго уровня	99.8%	0.59%

Моделирование различных процессов взаимодействия и распадов частиц показало, что при использованных критериях отбора основными источниками фона являются распады  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$  (0.12%), и  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^+ \pi^-$  (0.03%), вклад которых не зависит от знака заряда каона и, следовательно, не может привести к ложной зарядовой асимметрии графиков Далитца. Уровень фона от других источников не превышает 0.01%. На рис. 5 показаны распределения фоновых событий по переменным  $|v'|$  и  $u'$ .

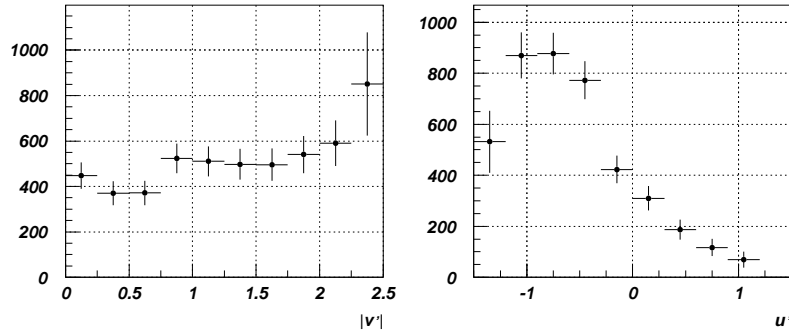


Рис. 5. Распределения фоновых событий по переменным Далитца, нормированные на фазовый объем.

Следует отметить, что конечное разрешение калориметра приводит к заметной ( $\sim 10\%$ ) вероятности “перепутывания”  $\gamma$ -квантов, рожденных в распадах  $\pi^0$ -мезонов, а неэффективность годоскопов — к возможности восстановления ложного трека ( $\sim 5\%$ ). Однако эти эффекты учитываются при моделировании событий и не зависят от знака заряда частиц, а потому не вносят заметной погрешности в конечный результат.

Вследствие конечного разрешения по переменным  $u$  и  $v$  их “измеренные” значения  $u'$ ,  $v'$  могут отличаться от истинных как для экспериментальных, так и для смоделированных событий. Поэтому для определения разности параметров диаграмм Далитца использовался метод взвешивания смоделированных событий. При адекватном описании установки в программе моделирования этот метод автоматически учитывает разрешение детекторов, а также не требует поправок на эффективность регистрации, отбора и акцептанс установки.

Для определения разности параметров диаграмм Далитца распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  минимизировался функционал

$$\chi^2(\Delta g, \Delta h, \Delta k) = \sum_{i,j} \frac{(r_{ij} - 1 - \alpha_{ij}\Delta g - \beta_{ij}\Delta h - \gamma_{ij}\Delta k)^2}{\sigma_{ij}^2},$$

где  $r_{ij} = \frac{n_{ij}^+/N^+}{n_{ij}^-/N^-}$ ;  $\sigma_{ij}^2 = r_{ij}^2 \cdot \left( \frac{1}{n_{ij}^+} + \frac{1}{n_{ij}^-} \right)$ ;  $n_{ij}^\pm$  — количество событий в бинах диаграмм Далитца с измеренными координатами  $u'_i$ ,  $v'_j$ , а коэффициенты  $\alpha_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$ ,  $\gamma_{ij}$  определяются в соответствии с формулами из Приложения на событиях, полученных методом Монте-Карло. В результате минимизации функционала были получены следующие оценки  $\Delta g$ ,  $\Delta h$  и  $\Delta k$  и элементов корреляционной матрицы:

$$\begin{cases} \Delta g = -0.0009 \pm 0.0067, \\ \Delta h = -0.0007 \pm 0.0062, \\ \Delta k = -0.0014 \pm 0.0017, \end{cases} \quad \begin{pmatrix} 1.00 & 0.93 & 0.35 \\ & 1.00 & 0.32 \\ & & 1.00 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Приведенные ошибки — статистические. Величина  $\chi^2$  на одну степень свободы составляет  $\chi^2/ndf = 319/(279 - 3) = 1.16$ .

На рис. 6 показаны отношения нормированных распределений зарегистрированных распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  отдельно по переменным  $|v'|$  и  $u'$ .

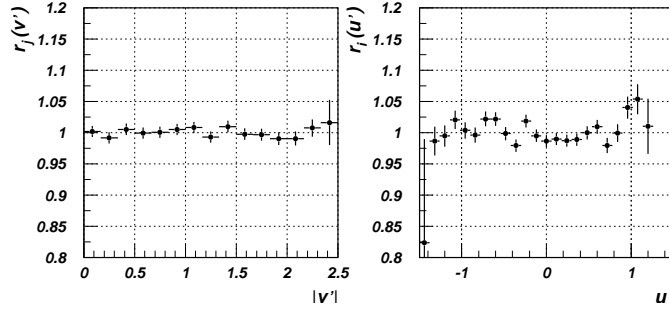


Рис. 6. Отношения нормированных распределений событий для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ , спроектированные на оси  $|v'|$  и  $u'$ .

Так как некоторые теоретические модели связывают возможное нарушение СР-инвариантности в распадах  $K^\pm \rightarrow 3\pi$  только с зарядовой асимметрией параметра  $g$ , была также получена оценка  $\Delta g$  в предположении  $\Delta h = \Delta k \equiv 0$ , что не противоречит нашим результатам. Такой подход дает оценку

$$\Delta g = 0.0002 \pm 0.0024 \quad \text{при} \quad \chi^2/ndf = 319/(279 - 1) = 1.15. \quad (3)$$

В пределах статистической ошибки приведенные результаты свидетельствуют о неотличимости значений параметров  $g$ ,  $h$  и  $k$  для каонов разных знаков, но это не гарантирует идентичности распределений событий на соответствующих диаграммах Далитца. Для проверки идентичности распределений событий по  $u'$ ,  $|v'|$  и  $(u', |v'|)$  без привязки к конкретному виду матричного элемента (1) был использован непараметрический критерий Колмогорова, который показал, что распределения по  $u'$ ,  $|v'|$  и  $(u', |v'|)$  совпадают с вероятностями 0.32, 0.85 и 0.55 соответственно. Для сравнения распределений по  $(u', |v'|)$  применялся модифицированный критерий Колмогорова из пакета *HBOOK*, работающий с событиями, сгруппированными в гистограмму.

Стабильность параметров пучка и детекторов тщательно контролировались во время набора статистики. Для уменьшения систематической погрешности в определении зарядовой асимметрии параметров диаграммы Далитца знак заряда частиц пучка менялся каждые сутки.

Хотя принимались все меры, чтобы обеспечить идентичность характеристик пучков положительно и отрицательно заряженных каонов, средние значения углов их входа в установку могли отличаться на  $\Delta A_X = 5$  мкрад. и  $\Delta A_Y = 7$  мкрад., а средние энергии — на 50 МэВ. Связанные с этими неопределенностями систематические ошибки были оценены методом Монте-Карло и оказались равными

$$\begin{aligned} \delta_A(\Delta g) &= 0.0004, & \delta_A(\Delta h) &= 0.0003, & \delta_A(\Delta k) &= 0.0001, \\ \delta_E(\Delta g) &= 0.0006, & \delta_E(\Delta h) &= 0.0004, & \delta_E(\Delta k) &= 0.0001. \end{aligned}$$

Анализируются и другие возможные источники систематической погрешности: временная нестабильность калибровки электромагнитного калориметра и эффективностей сцинтилляционных годоскопов, влияние магнитного поля Земли на пучки частиц разных знаков, разница сечений взаимодействия  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов с веществом, различия в составе и интенсивности положительного и отрицательного пучков. Суммарный вклад этих факторов в систематическую ошибку не превышает  $1 \cdot 10^{-4}$ .

Было показано, что полученные результаты стабильны относительно вариаций критериев отбора событий: минимальной энергии  $\gamma$ -квантов, минимальной и максимальной энергий заряженного  $\pi$ -мезона, уровня значимости  $\chi^2$  при кинематическом анализе и числа восстановленных треков. Они также не менялись, если из анализа данных исключались события в бинах, расположенных на границах диаграмм Далитца. Наконец,  $\Delta g$ ,  $\Delta h$  и  $\Delta k$  находились путем минимизации функционала для разности диаграмм Далитца для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ . Полученные таким способом результаты согласуются с оценками (2) и (3).

Оценки систематических погрешностей с учетом перечисленных выше факторов составляют

$$\delta(\Delta g) = 7 \cdot 10^{-4}, \quad \delta(\Delta h) = 5 \cdot 10^{-4}, \quad \delta(\Delta k) = 1.4 \cdot 10^{-4}.$$



Используя  $g^+ \approx g^- = 0.638$ , можно вычислить зарядовую асимметрию  $A_g$ :

$$A_g = \Delta g / (g^+ + g^-) = 0.0002 \pm 0.0018 \text{ (stat)} \pm 0.0005 \text{ (syst)},$$

что значительно точнее оценки  $A_g = 0.0019 \pm 0.0125$ , полученной в единственном более раннем эксперименте, где изучались распады как  $K^+$ , так и  $K^-$ .

**В пятой главе** описано измерение параметров диаграммы Далитца для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ .

Результаты, полученные в предыдущей главе, позволяют для определения параметров  $g$ ,  $h$ ,  $k$  воспользоваться объединенной статистикой положительно и отрицательно заряженных каонов.

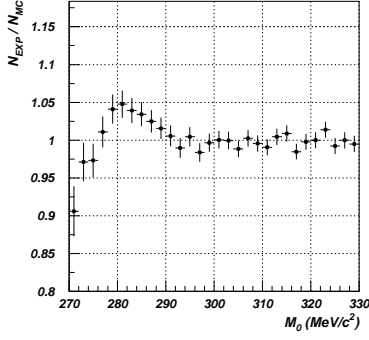
Параметры диаграммы Далитца вычислялись в результате минимизации функционала:

$$\chi^2(g, h, k) = \sum_i^{Nbin} \frac{(n_i - C \cdot m_i)^2}{\sigma_i^2},$$

где  $n_i$  — количество событий в  $i$ -ом бине экспериментальной диаграммы Далитца;  $m_i \equiv m_i(g, h, k) = \sum_j w_{ij}$  ( $w_{ij} = 1 + g \cdot u_j + h \cdot u_j^2 + k \cdot v_j^2$ ) — сумма взвешенных событий Монте-Карло в том же бине;  $C = \sum n_i / \sum m_i$  — нормировочный множитель, а  $\sigma_i^2 = n_i + C^2 \cdot \sum_j w_{ij}^2$  учитывает ограниченную статистику событий Монте-Карло. В результате минимизации были получены следующие значения параметров  $g$ ,  $h$ ,  $k$  и элементов корреляционной матрицы:

$$\begin{cases} g = 0.6259 \pm 0.0043, \\ h = 0.0551 \pm 0.0044, \\ k = 0.0082 \pm 0.0011, \end{cases} \quad \begin{pmatrix} 1.00 & 0.90 & 0.41 \\ & 1.00 & 0.33 \\ & & 1.00 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Ошибки здесь только статистические, величина  $\chi^2/ndf$  составляет  $506/430 = 1.18$ , а вероятность  $P(\chi^2)$  такого значения равна 0.0066.



**Рис. 7:** Отношение распределений по инвариантной массе  $\pi^0\pi^0$  для экспериментальных и смоделированных событий.

аналитическими членами в матричном элементе, связанными с перерасеянием  $\pi^+\pi^- \rightarrow \pi^0\pi^0$ . Такого рода эффекты играют важную роль в области  $M_0 \sim 2m_{\pi^\pm}$  и могут быть подавлены введением дополнительного обрезания  $M_0 > M_T$ .

Добавление в разложение  $|M(u, v)|^2$  членов более высокого порядка:  $l \cdot u^3$  и/или  $m \cdot uv^2$  незначительно улучшает качество фита (см. табл. 2). Более детальное изучение показало, что неудовлетворительное качество фита связано с различием распределений экспериментальных и смоделированных с использованием параметризации (1) данных при малых значениях  $u'$ , что соответствует значениям эффективной массы  $M_0$  пары  $\pi^0$ -мезонов вблизи порога (рис. 7). По-видимому, это различие вызвано не-

**Таблица 2.** Результаты фита с учетом в уравнении (1) членов более высокого порядка.

$g$	$0.6259 \pm 0.0043$	$0.6151 \pm 0.0051$	$0.6284 \pm 0.0048$	$0.6129 \pm 0.0063$
$h$	$0.0551 \pm 0.0044$	$0.0782 \pm 0.0073$	$0.0556 \pm 0.0044$	$0.0795 \pm 0.0077$
$k$	$0.0082 \pm 0.0011$	$0.0080 \pm 0.0011$	$0.0070 \pm 0.0015$	$0.0087 \pm 0.0016$
$l$	—	$0.0273 \pm 0.0069$	—	$0.0292 \pm 0.0076$
$m$	—	—	$-0.0027 \pm 0.0024$	$0.0016 \pm 0.0027$
$\chi^2$	506.1	490.2	504.8	489.8
$\chi^2/ndf$	1.18	1.14	1.17	1.14
$P(\chi^2)$	$6.6 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$	$7.4 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$

Вычисления при различных значениях  $M_T$  показали, что при  $M_T \geq 290$  МэВ/ $c^2$  параметры диаграммы Далитца не зависят от  $M_T$ , а качество фита становится при этом вполне удовлетворительным. В этом случае введение в (1) членов более высокого порядка не влияет на параметры  $g$ ,  $h$ ,  $k$  и величину  $\chi^2$ .

Фит с обрезанием  $M_T = 290$  МэВ/ $c^2$  приводит к следующим результатам:

$$\begin{cases} g = 0.6339 \pm 0.0046, \\ h = 0.0593 \pm 0.0088, \\ k = 0.0083 \pm 0.0013, \end{cases} \quad \begin{pmatrix} 1.00 & 0.52 & 0.43 \\ & 1.00 & 0.16 \\ & & 1.00 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

и  $\chi^2/ndf = 1.04$ ,  $P(\chi^2) = 0.3$ .

Сравнение матриц в (4) и (5) показывает, что использование данного обрезания существенно уменьшает корреляции между  $g$ ,  $h$  и  $h$ ,  $k$ . Рис. 8 подтверждает хорошее согласие между экспериментальными и смоделированными данными при  $M_T = 290$  МэВ/ $c^2$ .

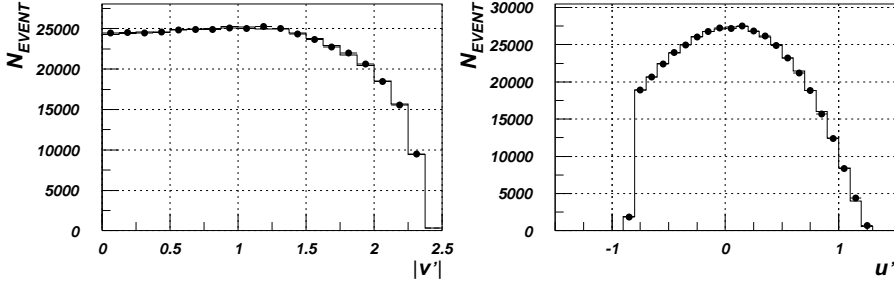


Рис. 8. Распределения событий, спроектированные на оси  $|v'|$  и  $u'$ . (гистограмма — результат моделирования; точки — экспериментальные данные).

Для оценки систематической погрешности параметров диаграммы Далитца была проверена стабильность результатов при изменении критериев отбора событий. Оценки параметров оказались наиболее чувствительными к изменению минимальной энергии  $\gamma$ -квантов с 1 до 2 ГэВ ( $\Delta g = -0.0057$ ,  $\Delta h = -0.0047$ ,  $\Delta k = -0.0006$ ) и минимальной энергии пиона с 1 до 8 ГэВ ( $\Delta g = 0.0048$ ,  $\Delta h = 0.0051$ ).

и  $\Delta k = 0.0011$ ). Увеличение/уменьшение ширины бина в два раза и исключение граничных бинов диаграммы Далитца приводят к  $\Delta g = 0.0012$ ,  $\Delta h = 0.0045$ , и  $\Delta k = 0.0004$ . Неопределенности импульса каонов, профиля и углового расхождения пучка практически не влияют на параметры. Вклад фоновых событий пренебрежимо мал. Оценка систематической погрешности с учетом всех перечисленных факторов составляет:  $\delta g = 0.0093$ ,  $\delta h = 0.0086$ ,  $\delta k = 0.0014$ .

На рис. 9 показаны результаты (4) в сравнении с предыдущими измерениями параметров диаграммы Далитца. Ошибки приведенных данных включают в себя как статистические, так и систематические погрешности.

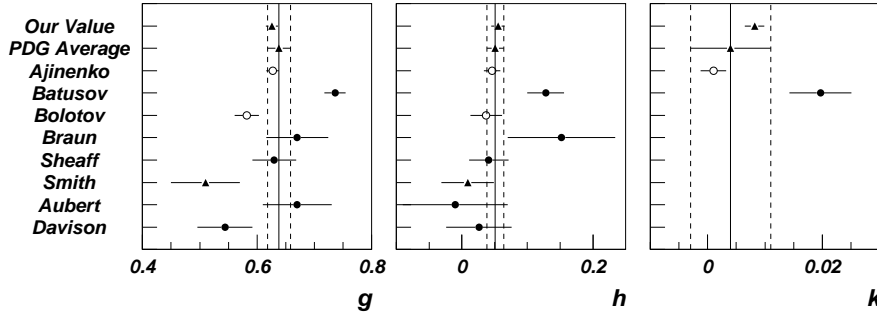


Рис. 9. Параметры диаграммы Далитца  $g$ ,  $h$  и  $k$  для распадов  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0$  (точки),  $K^- \rightarrow \pi^-\pi^0\pi^0$  (кружки) и  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm\pi^0\pi^0$  (треугольники). Вертикальные сплошные и пунктирные линии соответствуют средним значениям и ошибкам, приведенным в PDG.

**В Заключение** перечислены основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана и система программ реконструкции и анализа данных установки КМН. Система включает в себя приложения, позволяющие осуществлять геометрическую привязку детекторов установки и реконструировать треки вторичных частиц и ливни в электромагнитном калориметре. Для поиска треков используются алгоритмы полного перебора, обеспечивающие максимальную эффективность реконструкции. Процедуры

кинематического фита позволяют надежно восстанавливать кинематические переменные. Значительная часть системы была задействована во время набора данных, что позволило контролировать работу установки по физическим распределениям.

2. Разработан и реализован пакет программ для моделирования установки КМН методом Монте-Карло. Пакет детально описывает геометрию, материалы и свойства различных элементов установки. При моделировании учитываются корреляции угловых и пространственных переменных, описывающих адронный пучок. Учет реальных характеристик детекторов (эффективности сцинтилляционных годоскопов и неоднородности электромагнитного калориметра) позволяет получить адекватное описание установки.
3. В эксперименте на установке КМН измерены параметры диаграмм Далитца для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ . Исследования проводились на пучках положительных и отрицательных адронов с импульсом 35 ГэВ/с ускорителя ИФВЭ. Частая смена знака заряда пучка позволила минимизировать систематические погрешности измерения зарядовой асимметрии.
4. Получены следующие оценки разностей параметров диаграмм Далитца для распадов  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$  и  $K^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0$ :

$$\begin{aligned}\Delta g &= -0.0009 \pm 0.0067 (stat) \pm 0.0007 (syst), \\ \Delta h &= -0.0007 \pm 0.0062 (stat) \pm 0.0005 (syst), \\ \Delta k &= -0.0014 \pm 0.0017 (stat) \pm 0.0001 (syst).\end{aligned}$$

5. Для разности параметров наклона  $\Delta g$  в предположении  $\Delta h = \Delta k = 0$  найдена оценка

$$\Delta g = 0.0002 \pm 0.0024 (stat) \pm 0.0007 (syst),$$

что позволило получить для зарядовой асимметрии  $A_g$  значение

$$A_g = \Delta g / (g^+ + g^-) = 0.0002 \pm 0.0018 (stat) \pm 0.0005 (syst).$$

Это наиболее точная оценка  $A_g$  для распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  на настоящий день.

6. Анализ данных с помощью непараметрического критерия Колмогорова показал, что распределения событий по переменным Далитца  $u$  и  $v$  для распадов  $K^{+-}$  и  $K^{-}$ -мезонов неотличимы при имеющемся количестве событий.
7. Представлены новые результаты измерения параметров диаграммы Далитца для распадов  $K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm}\pi^0\pi^0$ , полученные при использовании объединенной статистики распадов  $K^{+}$  и  $K^{-}$ . Без обрезания по инвариантной массе пары  $\pi^0\pi^0$  в результате фита получены следующие значения:

$$\begin{aligned} g &= 0.6259 \pm 0.0043 (stat) \pm 0.0093 (syst), \\ h &= 0.0551 \pm 0.0044 (stat) \pm 0.0086 (syst), \\ k &= 0.0082 \pm 0.0011 (stat) \pm 0.0014 (syst). \end{aligned}$$

Качество этого фита далеко от удовлетворительного:  $\chi^2/ndf = 506/430 = 1.18$ ,  $P(\chi^2) = 0.0066$ . Включение кубических членов в разложение квадрата матричного элемента не улучшает качество фита.

8. Исследованы зависимости параметров диаграммы Далитца и качества фита от обрезания  $M_T$  по инвариантной массе пары  $\pi^0$ -мезонов. При обрезании  $M_T \geq 290$  МэВ/ $c^2$  качество фита становится удовлетворительным:  $\chi^2/ndf = 1.04$ ,  $P(\chi^2) = 0.3$ . В этом случае добавление членов более высокого порядка в разложение квадрата матричного элемента не влияет на параметры  $g$ ,  $h$ ,  $k$  и величину  $\chi^2/ndf$ . Эти результаты могут рассматриваться как проявление существенного вклада перерасеяния  $\pi^+\pi^- \rightarrow \pi^0\pi^0$  в матричный элемент распада  $K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm}\pi^0\pi^0$  вблизи порогового значения инвариантной массы пары  $\pi^0\pi^0$ . При  $M_T = 290$  МэВ/ $c^2$  получены следующие значения параметров диаграммы Далитца:

$$\begin{aligned} g &= 0.6339 \pm 0.0046 (stat) \pm 0.0093 (syst), \\ h &= 0.0593 \pm 0.0088 (stat) \pm 0.0086 (syst), \\ k &= 0.0083 \pm 0.0013 (stat) \pm 0.0014 (syst). \end{aligned}$$

В **Приложении** приведены формулы для расчета разностей параметров диаграмм Далитца.

## Список литературы

- [1] G.A. Akopdzhanov, V.B. Anikeev, V.A. Bezzubov, S.P. Denisov, A.A. Durum, Yu.V. Gilitsky, S.N. Gurzhiev, V.M. Korablev, V.I. Koreshev, **A.V. Kozelov**, E.A. Kozlovsky, V.I. Kurbakov, V.V. Lipaev, V.A. Onuchin, A.M. Rybin, Yu.M. Sapunov, A.A. Schukin, M.M. Soldatov, D.A. Stoyanova, K.I. Trushin, I.A. Vasilyev, V.I. Yakimchuk, S.A. Zvyagintsev.  
“Measurements of the charge asymmetry of the Dalitz plot parameters for  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  decays”. *Eur. Phys. J. C* **40** (2005) 343 [arXiv:hep-ex/0406008].
- [2] Г.А. Акопджанов, В.Б. Аникеев, В.А. Беззубов, И.А. Васильев, Ю.В. Гилицкий, С.Н. Гуржиев, С.П. Денисов, А.А. Дурум, С.А. Звягинцев, **А.В. Козелов**, Е.А. Козловский, В.М. Кораблев, В.И. Корешев, В.И. Курбаков, В.В. Липаев, В.А. Онучин, А.М. Рыбин, Ю.М. Сапунов, М.М. Солдатов, Д.А. Стоянова, К.И. Трушин, А.А. Шукин, В.И. Якимчук.  
“Измерение зарядовой асимметрии параметров диаграмм Далитца распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ ”. *ЯФ*. **86** (2005) 986.
- [3] А.В. Козелов, А.А. Лебедев, И.З. Манджавидзе, С.А. Медведь, Ю.В. Михайлов.  
“Триггерная электроника станции мечения комплекса меченых нейтрино”. *ПТЭ*, 1994, №2, С. 43.
- [4] А.В. Козелов, А.А. Лебедев, С.А. Медведь, Ю.В. Михайлов.  
“Интенсиметр и его применение на КМН”. *ПТЭ*, 1994, №2, С.53.
- [5] G.A. Akopdzhanov, V.B. Anikeev, V.A. Bezzubov, S.P. Denisov, A.A. Durum, Yu.V. Gilitsky, V.M. Korablev, V.I. Koreshev, **A.V. Kozelov**, E.A. Kozlovsky, V.I. Kurbakov, V.V. Lipaev, A.M. Rybin, A.A. Shchukin, M.M. Soldatov, D.A. Stoyanova, K.I. Trushin, I.A. Vasilyev.  
“Measurements of the Dalitz plot parameters for  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  decays”. Препринт ИФВЭ 2005-37, Протвино, 2005. [arXiv:hep-ex/0509017].

- [6] G.A. Akopdzhanov, V.B. Anikeev, V.A. Bezzubov, S.P. Denisov, A.A. Durum, Yu.V. Gilitsky, S.N. Gurzhiev, V.M. Korablev, V.I. Koreshev, **A.V. Kozelov**, E.A. Kozlovsky, V.I. Kurbakov, V.V. Lipaev, V.A. Onuchin, A.M. Rybin, Yu.M. Sapunov, A.A. Schukin, M.M. Soldatov, D.A. Stoyanova, K.I. Trushin, I.A. Vasilyev, V.I. Yakimchuk, S.A. Zvyagintsev.  
 “Search for CP-violation in charged kaon decays” in Proceedings of the First International Workshop on Frontier Science — Charm, Beauty, and CP, Frascati, 2002, Ed. by L. Benussi *et al.* (LNF, Frascati, 2002) p. 229.
- [7] В.В. Аммосов, В.Б. Аникеев, А.А. Асеев, А.Г. Афонин, А.В. Базилевский, С.В. Беликов, В.В. Брызгалов, А.Н. Галяев, В.А. Гапиенко, Г.С. Гапиенко, Ю.В. Гилицкий, Ю.П. Горин, С.Н. Гуржиев, А.Г. Денисов, С.П. Денисов, А.А. Дурум, В.Г. Заец, В.Н. Запольский, В.Г. Заручейский, А.А. Иванилов, **А.В. Козелов**, В.М. Кораблев, В.И. Корешев, В.И. Кочетков, В.И. Курбаков, В.В. Липаев, Г.П. Макаров, А.В. Максимов, В.Н. Михайлин, В.Л. Михалев, В.А. Онучин, А.В. Попов, А.М. Рыбин, Ю.М. Свиридов, В.К. Семенов, В.А. Сенько, Д.А. Стоянова, А.Н. Сытин, В.В. Сытник, Г.В. Тишин, Н.Н. Федякин, В.И. Шелихов, А.А. Бельков, В.В. Вицев, А.Н. Иванченко, А.В. Ланев, Г.И. Ланциков, А.А. Мошкин, Ю.П. Петухов, И.А. Савин, С.Я. Сычков, Н.Ф. Фурманец, Г. Бом, Ю. Бэр, А. Шаале, А. Швиндт.  
 “Поиск CP-нарушения и исследование распадов заряженных каонов на станции мечения Комплекса меченых нейтрино (Предложение эксперимента)”. Препринт ИФВЭ 98-2 (1998).

*Рукопись поступила 28 октября 2005 г.*



А.В. Козелов.

Экспериментальное изучение распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  на ускорителе ИФВЭ.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X**.

Редактор Н.В.Ежела.

---

Подписано к печати 31.10.2005. Формат 60 × 84/8.  
Офсетная печать. Печ.л. 1,29. Уч.-изд.л. 1,15. Тираж 100. Заказ 113.  
Индекс 3649.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2005–38, И Ф В Э, 2005

---