

B-271

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-92-492

ВЕЛЕВ  
Георги Веселинов

УДК 539.12  
539.123  
539.124.6  
539.126.345

ИЗМЕРЕНИЕ ФОРМФАКТОРОВ  
РАСПАДА  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$

Специальность: 01.04.16 — физика ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1992

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук  
профессор

В. Б. Флягин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
профессор

В. Н. Болотов

доктор физико-математических наук  
профессор

И. М. Граменицкий

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт физики высоких энергий, г. Протвино.

Защита диссертации состоится "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1992 г.  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании специализированного Совета Д-047.01.03  
при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных  
исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1992 г.

Ученый секретарь специализированного Совета  
доктор физико-математических наук

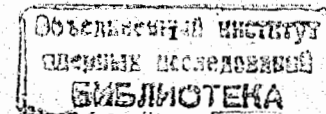
Ю. А. Батусов

Актуальность проблемы. Начиная с экспериментального открытия мод  $K_{S^*}$ -распада (общепринятое обозначение для группы каонных распадов  $K^+ \rightarrow \pi^0 \ell^+ \nu_\ell$ ,  $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \ell^+ \bar{\nu}_\ell (\nu_\ell)$  и их зарядово-сопряженных, где  $\ell = e, \mu$ ), интерес к ним был постоянным и отражается в большом количестве работ, содержащих как экспериментальные результаты, так и теоретическую интерпретацию и предсказания. Характерным для этих экспериментов является широкая по охвату научная программа, от проверки основных положений теории (например, V-A структура тока) слабых взаимодействий, до определения формфакторов как функции переданного четырехимпульса между K- и  $\pi$ -мезонами. Теоретический интерес определяется еще и тем фактом, что  $K_{S^*}$ -распады являются хорошим средством проверки идей о природе K- $\pi$  адронного тока при малых значениях переданного четырехимпульса. Часть этих идей продолжает жить и развиваться вследствие неполноты и даже противоречий в экспериментальных результатах, которые основаны на различных статистических выборках, зависящих от метода регистрации.

В последние годы с развитием кирально-пертурбативной теории и ее приложений в низкоэнергетической мезонной физике интерес к K-распадам значительно возрос. Это связано с возможностью проведения важных тестов КХД при энергиях  $\sqrt{s} < (500 \text{ МэВ})^2$  с использованием предсказаний киральной симметрии. При этом становится возможным изучать основную структуру сильных взаимодействий в режиме относительно точных и на сегодняшний день возможных экспериментов. Одним из таких экспериментов является исследование полулептонных  $K_{S^*}$ -распадов, в которых легко можно выделить эффекты сильного взаимодействия K- и  $\pi$ -мезонов.

Вместе с этим, важным фактором для постановки новых экспериментов является развитие физики детекторов. Создание в середине 70-ых годов электромагнитных калориметров на базе свинцового стекла, регистрирующих с относительно большой точностью энергии  $\gamma$ -квантов, открыло возможность для более детального изучения низкоэнергетических распадов с нейтральными продуктами в конечном состоянии и, в частности, постановки данного эксперимента.

Работа посвящена исследованию полулептонного распада  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$  ( $K_{S^*}$ ). Эксперимент проводился на установке ГИПЕРОН, расположенной на 18-ом канале ускорителя ИФВЭ, Серпухов.



Цель работы может быть сформулирована следующим образом: определение на большой статистике в распаде  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$  значения параметра наклона в линейном разложении векторного формфактора, а также изучение возможных вкладов скалярного и тензорного членов в матричный элемент распада и получение величины отношения скалярного к векторному, тензорного к векторному формфакторов и относительной фазы между скалярным и векторным формфакторами.

Научная новизна и практическая ценность работы. Новизна работы заключается в том, что в диссертации впервые были получены самые точные оценки величины отношения скалярного к векторному, тензорного к векторному формфакторов и относительной фазы между скалярным и векторным формфакторами в распаде  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ . Из анализа экспериментальных данных модельно независимым образом определено значение параметра наклона  $\lambda$  в линейном разложении векторного формфактора  $f(q^2)$ . С использованием вышеуказанного результата получено значение для элемента  $V_{us}$  матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава, которое является одним из двух самых точных в мире.

Достигнутые результаты вносят существенный вклад в изучение полупертоновых распадов  $K^+$ -мезонов, а накопленный опыт составил основу дальнейшего развития физической программы исследований каонных процессов на модернизированной установке ГИПЕРОН.

Апробация работы и публикации. Диссертация написана на основе научных работ, выполненных с участием автора в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в период с 1986 по 1992 гг. Результаты, изложенные ниже, докладывались на рабочих совещаниях сотрудничества ГИПЕРОН, научных семинарах ЛЯП, ЛВТА, ИФВЭ (Протвино) и Софийского университета им. Климента Охридского. Данные, полученные в работе, внесены в справочник Review of Particle Properties 1992г.

По результатам диссертации опубликовано 6 работ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и четырех приложений. Полный ее объем - 128 страниц, включая 48 рисунков и 6 таблиц. Список цитируемой литературы включает 116 наименований.

Во введении отмечается важность и актуальность изучения распадов  $K$ -мезонов для проведения низкоэнергетических тестов КХД. Коротко обоснован выбор исследования полупертонового распада  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$  для проверки идей о природе  $K$ - $\pi$  адронного тока при малых значениях переданного четырехимпульса  $s < (500 \text{ МэВ})^2$ .

В заключительной части введения сформулирована цель работы и коротко перечислены по главам основные результаты, полученные в диссертации.

В первой главе рассмотрены основные вопросы  $K_{e3}^+$ -формфакторов. В предположении  $V-A$  связи единственным параметром, который можно определить при изучении  $K_{e3}^+$ -распадов, является наклон  $\lambda$  в линейном разложении векторного формфактора. Коротко представлены некоторые модели низкоэнергетических мезонных процессов и даны полученные в них оценки для  $\lambda$ . Рассмотрены причины возникновения возможного несоответствия описания экспериментальных данных с помощью  $V-A$  структуры адронного матричного элемента  $K_{e3}^+$ -распадов. В конце главы представлено развитие методики и коротко обсуждены все проведенные эксперименты по изучению  $K_{e3}^+$ -распадов.

Вторая глава посвящена изучению характеристик годоскопического черенковского калориметра электромагнитных ливней (ЛГД) для регистрации позитронов (электронов) и  $\gamma$ -квантов, который является основным детектором экспериментальной установки. Исследования проводились в пучках позитронов с импульсами от 3 до 8 ГэВ/с и  $\pi^+$ -мезонов с импульсами 4 + 11 ГэВ/с. Рассмотрен новый эффективный метод восстановления параметров электромагнитных ливней на базе аппроксимации энерговыделений в ячейках калориметра специальной функцией, которая определена на базе калибровочных измерений. Программная реализация метода позволила на порядок уменьшить время обработки экспериментального материала, не ухудшая точности восстановления энергии и координаты точки попадания частиц в ЛГД.

Показано, что использование индивидуальных жестяных кожухов приводит к  $\approx 25\%$  потерям энергии в зазорах между радиаторами калориметра. Получена двумерная функция коррекции, зависящая от координаты попадания частиц, и определены значения ее параметров, которые можно рассматривать постоянными в интервале от 3 до 8 ГэВ. С использованием результатов поправок к регистрируемой в ЛГД

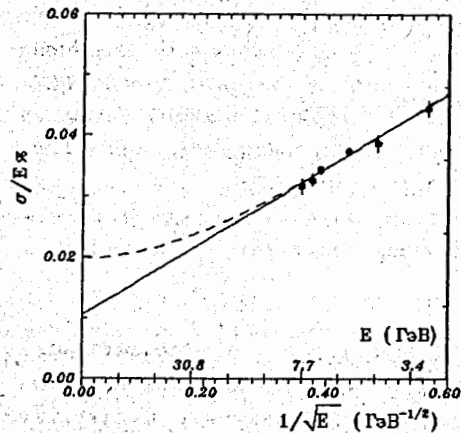


Рис.1 Энергетическое разрешение ЛГД в случае развития ливня в одной ячейке.

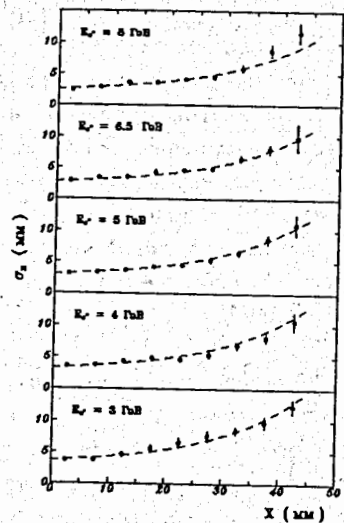


Рис.2 Пространственное разрешение ЛГД как функции координаты точки попадания частицы и ее энергии

энергии определена зависимость энергетического разрешения детектора от количества ячеек, участвующих в восстановлении электромагнитного ливня. На рис.1 представлено измеренное энергетическое разрешение калориметра. Аппроксимация распределения проводилась стандартным образом функциями  $\sigma_E/E = (1,0 \pm 0,2) + (6,0 \pm 0,6)/\sqrt{E [\text{ГэВ}]} \%$  (сплошная линия) и  $\sigma_E/E = (2,0 \pm 0,2) + (7,1 \pm 0,5)/\sqrt{E [\text{ГэВ}]} \%$  (пунктирная линия). Рассмотрены случаи, когда электромагнитный ливень развивался в двух и четырех ячейках ЛГД. По достигнутому значению энергетического разрешения в области 3 + 8 ГэВ использованный нами детектор является сравнимым с лучшими калориметрами подобного типа.

Пространственное разрешение детектора  $\sigma_x$ , показанное на рис.2, рассматривалось в зависимости от координаты точки попадания (x) и энергии (E) частиц и было параметризовано двумерной функцией  $\sigma_x = (b_1 + b_2/\sqrt{E [\text{ГэВ}]}) (1 + c_1 \exp(c_2 x))$  [мм] этих переменных (пунктирная линия, рис.2). Большой поперечный размер ячейки ( $10 \times 10 \text{ см}^2$ ) определяет значительный разброс в точности определения координат оси электромагнитного ливня и изменяется в пределах от 3 до 17 мм при средней энергии регистрируемых частиц 3 ГэВ.

Из анализа экспериментальных данных получен общий вид функции, описывающей распределение интенсивности черенковского света,

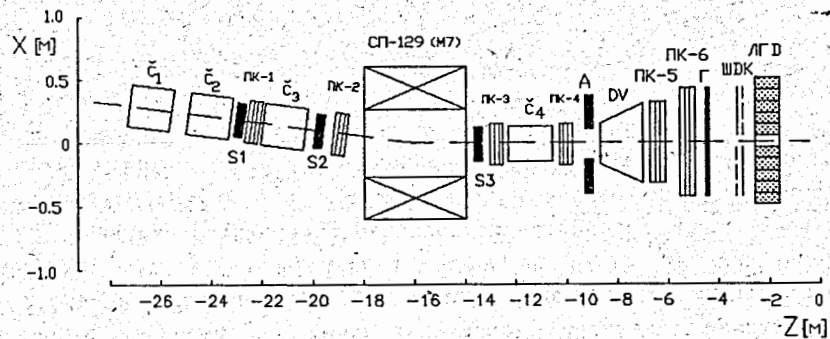


Рис.3 Установка для исследования  $K^+$ -распадов.  $S_1 + S_3$  - сцинтилляционные счетчики, А - счетчик антисовпадений,  $C_1 + C_4$  - пороговые черенковские счетчики, ПК<sub>1</sub>+ПК<sub>6</sub> - пропорциональные камеры, Г - годоскоп, ШДК - широкозонарные дрейфовые камеры, ЛГД - ливневый годоскопический черенковский детектор полного поглощения, DV - распадный объем, SP-129 - отклоняющий магнит пучкового спектрометра

вызванного  $\pi^+$ -мезонами с импульсами 4 + 11 ГэВ/с в радиаторе из свинцового стекла. С ее помощью оценена вероятность того, что энергетический эквивалент черенковского излучения в калориметре от заряженных пионов с определенным импульсом был больше заданного энергетического порога. Приведенные результаты использовались в процессе моделирования эффективности системы запуска установки в эксперименте по изучению распада  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ .

В конце первой главы излагается разработанная нами методика восстановления параметров электромагнитных ливней при попадании  $e^\pm$  и  $\gamma$ -квантов под углом относительно нормали к передней поверхности ЛГД. Полученные результаты позволяют исключить систематические ошибки при реконструкции координат и энергий частиц, которые быстро растут при увеличении угла входа позитронов (электронов) и  $\gamma$ -квантов, и подтверждаются экспериментом.

В третьей главе описаны постановка, проведение, моделирование и система обработки результатов эксперимента по изучению полуплеетонного распада  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ .

Экспериментальная установка расположена на пучке положительных частиц с энергиями 3 + 15 ГэВ ускорителя У-70 ИФВЭ, Протвино. Общая схема детекторов в данном эксперименте показана на рис.3.

Пучковая часть спектрометра (до счетчика антисовпадений А, рис.3) использовалась для идентификации частиц и определения их траекторий. Сцинтилляционные счетчики  $S_1 + S_3$  служили для

мониторирования пучка. Заряженный  $K^+$ -мезон идентифицировался с помощью четырех пороговых газовых черенковских счетчиков  $C_1 + C_4$ . Определение направления импульса пучковых частиц обеспечивалось пропорциональными камерами, объединенными в 4 блока ( $PK_1 + PK_4$ ). По значению угла отклонения пучковых частиц в электромагните СП-129 (100 мрад) контролировалось постоянство их среднего импульса. Блоки пропорциональных камер  $PK_5 + PK_6$ , годоскоп (Г) и две плоскости широкоазорных дрейфовых камер (ШДК) использовались для реконструкции траекторий заряженных продуктов распада. Распадный объем DV был заполнен гелием и работал как пороговый черенковский счетчик для выделения вторичных позитронов;  $\gamma$ -кванты и  $e^+$  от распадов  $K^+$ -мезонов регистрировались с помощью ЛГД.

Сбор информации с детекторов установки реализован в режиме on-line с ЭВМ ЕС-1010, которая через систему сбора данных осуществляла контроль за аппаратурой, накопление и запись данных на магнитные ленты.

Эксперимент проводился при импульсе пучковых частиц 10,7 ГэВ/с с разбросом  $\Delta P/P \leq 2\%$ . Количество  $K^+$ -мезонов в пучке составляло  $5 \pm 6\%$ .

Условие триггерного запуска установки было следующим:

$$\text{Tr}(K_{e3}^+) = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot A \cdot \text{ЛГД} (\geq 3 \text{ групп}). \quad (1)$$

Среднее количество принимаемых и записываемых на магнитную ленту событий за цикл ускорителя равно 50. Общее количество триггеров, записанных на магнитные ленты, составляет порядка 1 млн.

С помощью сцинтилляционных  $S_1 + S_3$ , veto А и черенковских  $C_1 + C_4$  счетчиков, включенных в комбинации совпадений и антисовпадений, как показано в формуле (1), генерировался сигнал прохождения  $K^+$ -мезона через установку. Основное триггерное условие вырабатывалось электроникой, связанной с ЛГД. С целью определения числа  $\gamma$ -квантов и позитронов, попавших в электромагнитный калориметр, ЛГД был разделен на 7 групп. Сигналы с последних динодов фотоумножителей счетчиков, входящих в состав группы, линейно складывались, и результирующий импульс подавался на вход амплитудного дискриминатора. Установкой порога дискриминатора определялось минимальное значение энергосодержания в каждой группе. Обязательным условием для выработки триггерного сигнала являлась необходимость запуска не менее 3 групп (в формуле (1) это условие представлено обозначением ЛГД ( $\geq 3$  групп)).

Описанная в формуле (1) организация запуска установки обеспечивала отбор событий на уровне  $\sim 10^{-3}$  от полного числа

проходящих через установку частиц. Например, уровень триггера при суммарном пороге на группах в ЛГД 1,0 ГэВ составлял  $0,96 \times 10^{-3}$ .

Приведено описание системы обработки экспериментальных данных. Созданный программный комплекс, обеспечивающий все ее этапы - от реконструкции событий до получения физических параметров, содержит около 18 тысяч строк текста (в основном на языках FORTRAN и С) и работает на ЭВМ CDC-6500 и IBM - совместимых персональных компьютерах типа AT-286/386/486.

Основное внимание на начальном этапе обработки экспериментального материала уделено геометрической привязке детекторов и калибровке энергетического отклика ЛГД. При этом получена зависимость нелинейности отклика детектора как функции регистрируемой в нем энергии и проведена процедура дополнительной калибровки элементов калориметра по восстановленным распадам  $\pi^0$ -мезона на два  $\gamma$ -кванта.

Подробно рассмотрена процедура реконструкции регистрируемых событий. Она включает ряд последовательных шагов, которые можно объединить в два основных направления: геометрическая реконструкция и обработка данных ЛГД.

Для первоначального разделения  $K_{e3}^+$ -событий от фона в нашем случае использовались следующие топологические и кинематические критерии отбора:

- минимальное расстояние между реконструированными траекториями  $K^+$ -мезона и единственной заряженной частицы после распадного объема не превышало 5 мм;
- наличие трех электромагнитных ливней с энергиями больше 1,0 ГэВ и с поперечными размерами не более  $2 \times 2$  соседних ячеек калориметра;

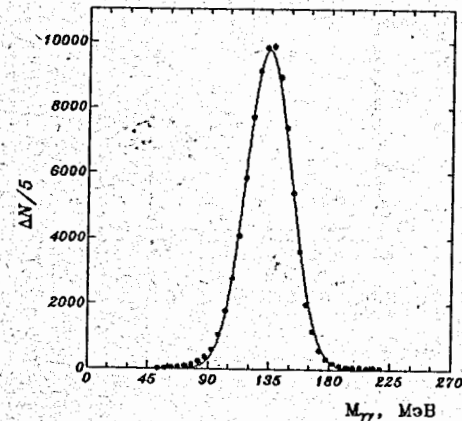


Рис. 4 Спектр эффективных масс пары  $\gamma$ -квантов от распадов  $\pi^0$ -мезонов. Нейтральный пион рождается в  $K^+$ -распадах (например,  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$  и др.)

- расстояние между точкой пересечения трека распадной заряженной частицы с фронтальной плоскостью ЛГД и центром тяжести ближайшего ливня в калориметре не более 60 мм.

Для событий, удовлетворяющих вышеописанным критериям, построен спектр эффективных масс пары  $\gamma$ -квантов (рис. 4). Пик имеет среднее значение  $M = (134,1 \pm 0,4)$  МэВ, которое согласуется с табличным значением массы  $\pi^0$ -мезона, а его среднеквадратичное отклонение составляет  $\sigma_M = (16,9 \pm 0,1)$  МэВ. Относительно малое значение фона под пиком ( $\approx 1\%$ ) указывает на то, что процедура обработки событий выделяет на уровне  $\approx 10^{-2}$  конечное состояние с одним  $\pi^0$ -мезоном и одной заряженной частицей.

Основным фоном для исследуемого процесса  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$  являлись распады  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ , в которых вследствие адронных взаимодействий  $\pi^+$ -мезонов в свинцовом стекле ЛГД развивался ливень, имитирующий ливень позитрона. Разделение этих двух распадов было осуществлено с помощью процедуры кинематического фита. Экспериментальные события проверялись на двух гипотезах. Сначала события, удовлетворяющие гипотезе  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$  (4С - фит, 5 уравнений связи и неизвестный модуль импульса  $\pi^+$ -мезона) с  $\chi^2 \leq 13.25$  (99% уровень достоверности, рис. 5а), отбрасывались. Из оставшихся событий отбирались те, которые удовлетворяют гипотезе  $K_{\text{ез}}^+$ -распада (2С - фит, тоже 5 уравнений связи и неизвестный импульс нейтрино) с  $\chi^2 \leq 5.95$  (95% уровень достоверности, рис. 5б). После отбора событий по указанным критериям были построены распределения по эффективным массам ( $\gamma\gamma$ ) и

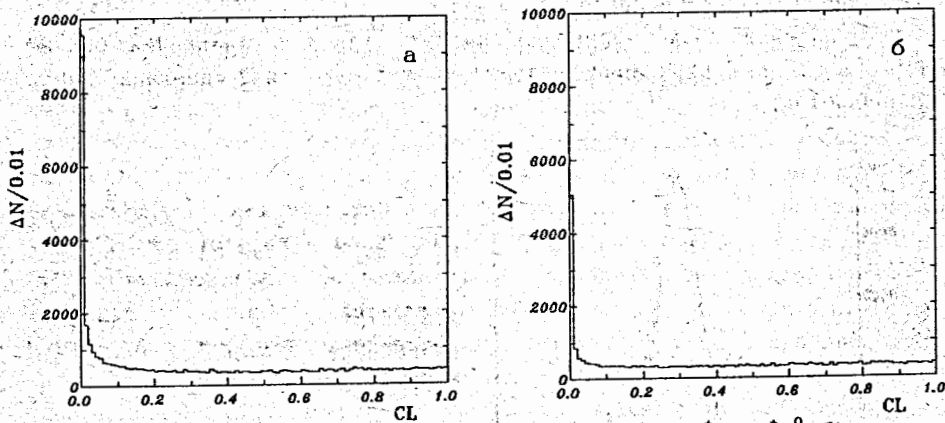


Рис 5 а) Уровень достоверности гипотезы  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ . б) уровень достоверности гипотезы  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$

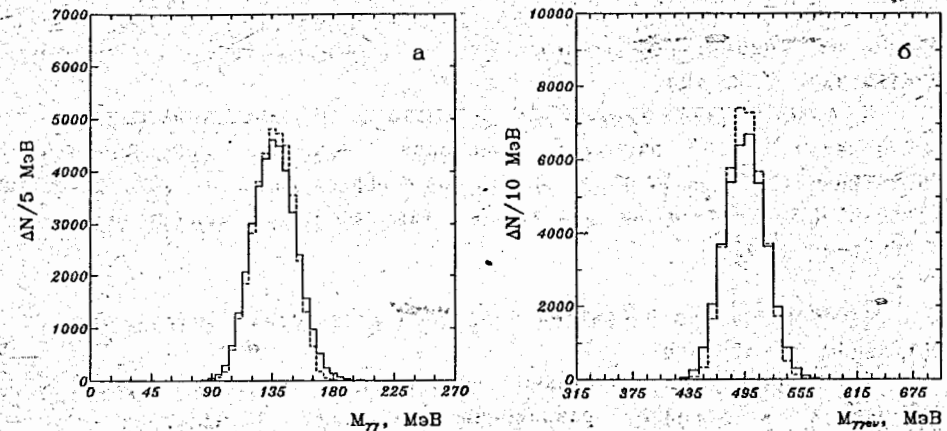


Рис. 6 Спектр эффективных масс: а)  $\gamma\gamma$  и б)  $\gamma\gamma e^+ \nu$  (сплошная линия). Распределения, полученные методом Монте-Карло, представлены на рисунке пунктирной линией

( $\gamma\gamma e^+ \nu$ ), которые показаны на рис. 6а, б (сплошная линия). Видно, что положения максимумов совпадают с табличными значениями масс  $\pi^0$ - и  $K^+$ -мезонов. Ширина на полувысоте для спектра ( $\gamma\gamma$ ) составляет 35 МэВ, а для спектра ( $\gamma\gamma e^+ \nu$ ) - 45 МэВ. Она обусловлена разрешением установки и согласуется со значениями, полученными при моделировании методом Монте-Карло -- рис. 6а, б (пунктирная линия).

В результате отбора по вышеописанным критериям осталось  $3,2 \times 10^4$  экспериментальных событий, идентифицированных как распад  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ . Для них строились распределения по разным кинематическим переменным (например, распределение по стандартной переменной разложения векторного формфактора  $K_{\text{ез}}^+$ -распада  $q^2/m_\pi^2$ ,

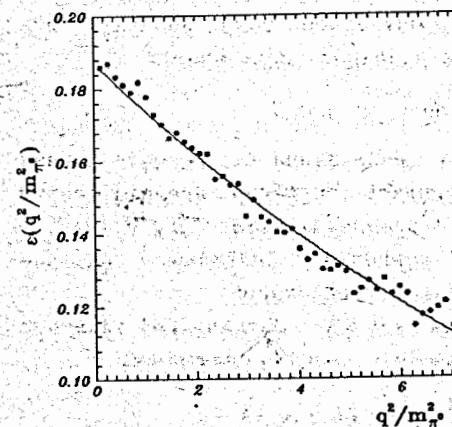


Рис. 7 Эффективность регистрации распада  $K_{\text{ез}}^+$  в зависимости от кинематической переменной  $q^2/m_\pi^2$

где  $q$  - переданный лептонной паре ( $e^+ \nu$ ) четырехимпульс) и диаграмма Далица по энергиям позитрона ( $E_{e^+}$ ) и  $\pi^0$ -мезона ( $E_{\pi^0}$ ) в системе центра масс  $K^+$ -мезона.

В конце главы приводятся результаты моделирования методом Монте-Карло  $15 \times 10^6$  распадов  $K^+$ -мезонов. Получены значения для геометрической, триггерной и полной эффективностей установки, которая представлена на рис. 7., в зависимости от кинематической переменной  $q^2/m_{\pi^0}^2$ .

Четвертая глава посвящена получению физических результатов и сравнению с теорией.

Для определения модельно независимым способом параметра наклона  $\lambda_+$  в линейном разложении векторного формфактора  $f_+$  необходимо реализовать следующую процедуру: поделить значения экспериментального распределения по кинематической переменной  $q^2$  в интервале  $\Delta q^2$  на количество событий смоделированного распределения в том же интервале и вычислить квадратный корень этого отношения:

$$\frac{f_+(q^2)}{f_+(0)} = \left[ \frac{N_{\text{Эксп}}(q_1^2)}{N_{\text{Мод}}(q_1^2)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где  $q^2 \in [q_1^2 - \Delta q^2/2, q_1^2 + \Delta q^2/2)$ .

Конечный результат обработки показан на рис. 8. Значение параметра наклона векторного формфактора определялось аппроксимацией зависимости (2) линейной функцией  $1 + \lambda_+ q^2/m_{\pi^0}^2$  (рис. 8, сплошная линия) и равно  $\lambda_+ = 0,0284 \pm 0,0027$  ( $\chi^2 = 27$  для 22 степеней свободы,  $P(\chi^2) = 21\%$ ). Систематическая погрешность, оцененная по зависимости величины  $\lambda_+$  от условий отбора событий, не превышает 0,002. Таким образом, полученное нами значение для параметра  $\lambda_+$  (без учета радиационных поправок) составляет:

$$\lambda_+ = 0,0284 \pm 0,0027 \pm 0,0020.$$

Кроме стандартного линейного разложения дополнительная аппроксимация отношения (2) проводилась полюсным представлением векторного формфактора в модели  $K^*$ -доминантности  $f_+(q^2)/f_+(0) = M_{K^*}^2 / (M_{K^*}^2 - q^2)$ . В результате подгонки получено значение  $M_{K^*} = 871,6 \pm 37,5$  МэВ для массы векторного резонанса.

Интегрируя по всем переменным квадрат матричного элемента  $K_{e^3}^+$ -распада, получаем соответствующую его полную вероятность

$$\Gamma(K_{e^3}^+) = \frac{G_F^2 |V_{us}|^2}{768\pi^3} |f_+(0)|^2 M_{K^*}^5 (0,58 + 2,14 \lambda_+).$$

Величина  $f_+(0)$  входит в это выражение в комбинации  $f_+(0) |V_{us}|$ .

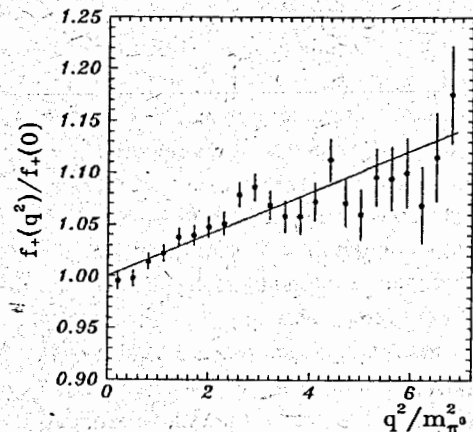


Рис. 8 Отношение  $f_+(q^2)/f_+(0)$  для распада  $K_{e^3}^+$ . Сплошной линией показан результат линейного фита

Используя значения для  $\Gamma(K_{e^3}^+) = (4,82 \pm 0,06) \cdot 10^{-2} \Gamma_{\text{total}}$  ( $\Gamma_{\text{total}}$  - вероятность распада  $K^+$ -мезона) и  $\lambda_+ = 0,0284 \pm 0,0027 \pm 0,002$  (линейный фит), получаем  $f_+(0) |V_{us}| = 0,1546 \pm 0,0011$ . Подставляя значения для  $f_+(0) = (0,982 \pm 0,008) / \sqrt{2}$  из теоретической работы [1] мы получили значение для элемента матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава  $|V_{us}| = 0,2226 \pm 0,0024$ .

Далее в четвертой главе приводятся результаты статистического анализа плотности событий на диаграмме Далица (рис. 9). В этом анализе независимым способом определено значение  $\lambda_+ = 0,0283 \pm 0,0026$  (уровень достоверности составляет  $P(\chi^2) = 9\%$ ), которое хорошо согласуется с результатом  $\lambda_+ = 0,0284 \pm 0,0027$ , полученным нами ранее из линейного фита зависимости  $f_+(q^2)/f_+(0)$  (рис. 8). Показано, что учет радиационных поправок к диаграмме Далица в соответствии с работой [2] приводит к возрастанию значения наклона  $\lambda_+$  до величины  $\lambda_+ = 0,0296 \pm 0,0029$ .

При использовании  $K_{e^3}^+$ -матричного элемента общего вида, включая члены скалярного и тензорного типа, и линейной параметризации  $f_+(q^2)/f_+(0) = 1 + \lambda_+ q^2/m_{\pi^0}^2$ , вновь проведена аппроксимация плотности событий на диаграмме Далица (рис. 9) и получены значения отношений  $|f_S/f_+(0)| = 0,070 \pm 0,016$ ,  $|f_T/f_+(0)| = 0,53_{-0,10}^{+0,09}$  и значение относительной фазы  $\phi_{ST} = 0,00 \pm 0,49$  между скалярным и

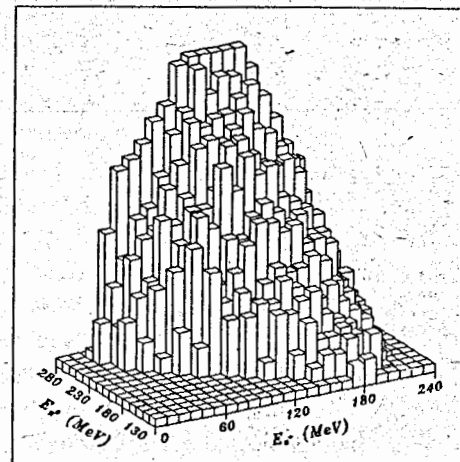


Рис. 9 Диаграмма Далица по переменным  $E_{e^+}$  и  $E_{\pi^0}$  для распада  $K_{e^3}^+$

тензорным формфакторами. Уровень достоверности аппроксимации составляет  $P(\chi^2) = 16\%$ . Систематические ошибки, оцененные по зависимости величины параметров фита от условий отбора событий, не превышают статистические, которые указаны выше.

В конце главы приведено сравнение экспериментального результата, полученного для наклона  $\lambda$  векторного формфактора, с предсказанием в рамках моделей низкоэнергетических мезонных процессов (рис. 10). На рис. 10 сплошной линией показано определенное нами значение для  $\lambda = 0,0284$ , а пунктирными - коридор ошибки. Видно, что оценки, реализованные на основе кирально-пертурбативной теории, в целом согласуются с результатом нашего эксперимента (точки 4а, 4в и 4г). При этом хорошее совпадение (в рамках ошибок), которое наблюдается с рассчитанным нами значением  $\lambda = 0,031 \pm 0,003$  (рис. 10, точка 4г) с использованием экспериментальных результатов для зарядового радиуса пиона, указывает на существующее согласование предсказаний в случаях рассмотрения процессов с участием и без участия странного кварка.

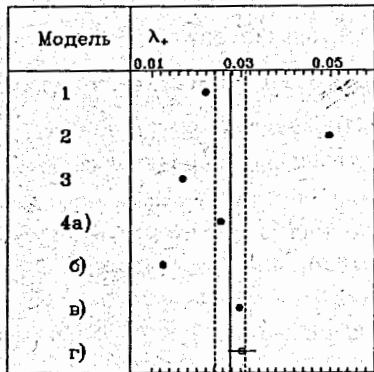


Рис. 10 Сопоставление результатов эксперимента с предсказаниями теоретических моделей для параметра наклона  $\lambda$  в линейном разложении векторного формфактора  $f$ . Сплошной линией показано полученное нами значение, а пунктирными - коридор ошибок. Номера 1, 2 и 3 соответствуют результатам, полученным в работах /3-5/. Величина  $\lambda$  в случае 4а) + 4в) определена из разных киральных моделей /6/.

В заключении кратко сформулированы основные результаты исследования.

1. Создан и описан алгоритм восстановления данных при использовании годоскопического черенковского калориметра электромагнитных ливней (ЛГД) на установке ГИПЕРОН. Предложено аналитическое решение задачи подгонки модельного распределения энерговыделений в ячейках ЛГД к реальным данным. Программная

реализация метода позволила на порядок уменьшить время обработки экспериментального материала, не ухудшая точности восстановления координат и энергии частиц.

Изучены характеристики калориметра при облучении пучком позитронов с энергиями от 3 до 8 ГэВ:

- получена функция коррекции энергетических потерь в зависимости от координат попадания частиц;

- определена зависимость энергетического разрешения ЛГД от количества элементов калориметра, участвующих в восстановлении электромагнитного ливня; его разрешение является сравнимым с характеристиками аналогичных калориметров;

- полученное пространственное разрешение ЛГД  $\sigma_x$  параметризовано двумерной функцией от энергии частиц и ее координаты попадания в детектор. При средней энергии регистрируемых частиц  $E = 3$  ГэВ,  $\sigma_x$  изменяется в пределах от 3 до 17 мм.

2. Получен общий вид функции, описывающей экспериментальное распределение интенсивности черенковского света, вызванного  $\pi^+$ -мезонами с импульсами  $4 + 11$  ГэВ/с, в радиаторе ЛГД. Результаты использованы в процессе моделирования эффективности системы запуска установки в эксперименте по изучению распадов  $K^+$ -мезонов.

3. Изучено распределение энерговыделения между элементами ливневого годоскопического детектора в зависимости от координат и угла входа позитронов с энергией 5 ГэВ. Разработан метод, учитывающий угол входа  $e^+$  и  $\gamma$ -квантов, который позволяет определить координаты попадания в ЛГД с точностью не хуже  $\sigma \approx 11$  мм и восстановить энергию частицы с относительной ошибкой  $\sigma_E/E \approx 6\%$ . Метод дает возможность исключить систематические ошибки в реконструкции координат и энергий.

4. Создан комплекс программ реконструкции экспериментальных событий, их анализа, получения физических распределений и вычисления полной эффективности экспериментальной установки для регистрации распада  $K_{e3}^+$ . На базе процедуры кинематического фита реализован высокоэффективный алгоритм отделения распада  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$  от основных фоновых процессов  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$  и  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$ . В результате отбора по всем критериям восстановлено  $3,2 \times 10^4$   $K_{e3}^+$ -событий. Высокая степень автономности разработанных программных модулей дает возможность их применения для изучения других  $K^+$ -мезонных распадов.

5. Модельно независимым образом определено значение параметра наклона векторного формфактора  $K_{e3}^+$ -распада  $\lambda = 0,0284 \pm 0,0027$  (стат.)  $\pm 0,0020$  (сист.). Независимая аппроксимация экспериментальных данных полюсным представлением



векторного формфактора в модели  $K^*$ -доминантности дает значение для массы векторного резонанса  $M_{K^*} = 871,6 \pm 37,5$  МэВ. Определен элемент  $V_{us}$  матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава  $|V_{us}| = 0,2226 \pm 0,0024$ . Полученное значение для  $\lambda$  согласуется с результатами предыдущих экспериментов и является одним из двух самых точных в мире.

6. Независимым способом при анализе распределения плотности событий на диаграмме Далица для  $K^*_s$ -распадов получено значение для  $\lambda = 0,0283 \pm 0,0026$ , которое хорошо согласуется с результатом линейной аппроксимации (пункт 5). Показано, что учет радиационных поправок к диаграмме Далица приводит к возрастанию значения наклона  $\lambda$  до величины  $\lambda = 0,0296 \pm 0,0029$ . При использовании матричного элемента общего вида примерно на том же уровне достоверности, что и для линейной аппроксимации, определены значения отношений формфакторов  $|f_s/f_+(0)|$ ,  $|f_t/f_+(0)|$  и относительной фазы  $\phi_{st}$  между скалярным и тензорным формфакторами. Полученные экспериментальные значения величин  $|f_s/f_+(0)| = 0,070 \pm 0,016(\text{стат.}) \pm 0,016(\text{сист.})$  и  $|f_t/f_+(0)| = 0,53^{+0,09}_{-0,10}(\text{стат.}) \pm 0,10(\text{сист.})$  свидетельствуют о возможном их отклонении от предсказаний теории электрослабых взаимодействий. Они являются наиболее точными из имеющихся на настоящее время в мире и внесены в справочник Review of Particle Properties 1992г. наряду с параметром  $\lambda$  (пункт 5).

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. N.I.Chernov, G.A.Ososkov, N.A.Russakovich, G.Velev, A.N.Zakharchenko, A method for reconstruction of electromagnetic shower parameters in a calorimeter with a rectangular cellular structure. JINR Preprint, E11-89-262, Dubna, 1989.

2. Г.В.Велев, В.В.Глаголев, С.Н.Малюков, И.А.Минашвили, Н.А.Русакович, Н.Л.Русакович, Г.А.Члачидзе, Энергетическая зависимость интенсивности черенковского излучения от адронных ливней, вызванных  $\pi^+$ -мезонами в электромагнитном калориметре. Приборы и техника эксперимента, 1991, № 5, 1991, с. 65-68.

3. S.A.Akimenko, V.I.Belousov, G.S.Bitsadze, A.M.Blick, Yu.A.Budagov, I.E.Chirikov-Zorin, G.A.Chlachidze, Yu.I.Davydov, V.P.Dzhelepov, A.A.Feshchenko, V.B.Flyagin, V.V.Glagolev, V.Hlinka, D.I.Hubua, A.B.Jordanov, Yu.N.Kharzhev, E.Kladiva, V.N.Kolosov, V.M.Kut'in, L.B.Litov, Yu.F.Lomakin, L.K.Lytkin, S.N.Malyukov, V.M.Maniev, I.A.Minashvili, A.A.Oleynik, V.I.Romanovskiy, N.A.Russakovich, N.L.Russakovich, A.A.Semenov, S.V.Sergeev,

B.Sitar, A.S.Soloviev, J.Spalek, R.V.Tsenov, G.V.Velev, V.B.Vinogradov, A.G.Volodko, Measurement of the  $K^* \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$  form factors. Physics Letters B, 1991, v.259, pp.225-228.

4. G.S.Bitsadze, Yu.A.Budagov, V.V.Glagolev, Yu.F.Lomakin, L.K.Lytkin, S.N.Maljukov, A.A.Oleinik, N.A.Russakovich, N.L.Russakovich, S.V.Sergeev, G.V.Velev, A.G.Volodko, G.A.Chlachidze, D.I.Hubua, I.A.Minashvili, E.V.Aslanjan, A.B.Jordanov, L.Litov, Reconstruction of the coordinate and energy of the Lead glass hodoscope calorimeter at different entrance angles of 5 GeV positrons. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1992, v.A311, pp.472-478.

5. Ju.A.Budagov, G.A.Chlachidze, I.P.Liba, S.N.Malyukov, I.A.Minashvili, N.A.Russakovich, N.L.Russakovich, G.V.Velev. A study of a 260-channel lead glass calorimeter. Preprint JINR, E13-92-219, Dubna, 1992.

6. Велев Г.В., Русакович Н.Л. Анализ информации в эксперименте по изучению распада  $K^* \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$  на установке "ГИПЕРОН". Сообщение ОИЯИ, P1-92-376, Дубна, 1992.

Литература:

1. Lautwyler H. and Ross M., Z. Phys. C, Particles and Fields, 1984, Vol.25, P.91.

2. Ginsberg E.S., Phys. Rev., 1967, Vol.162, P.1570.

3. Dennery P. and Primakoff H., Phys. Rev., 1963, Vol.131, P.1334.

4. Chounet L.-M. et al., Phys. Rep. C, 1972, Vol.4, P.199.

5. Lee T.D. et al., Phys. Rev. Letters, 1967, Vol.18, P.1029.

6. Donoghue J.F. and Holstein B.R., Phys. Rev. D, 1989, Vol.40, P.2378.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 ноября 1992 года.