

Р. 95
ИЯФ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи
УДК 539.1.074:539.12:531.75

РЫСКУЛОВ Николай Миржакифович

ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ
МАССЫ НЕЙТРАЛЬНОГО КАОНА

01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



НОВОСИБИРСК — 1987

+ ✓

Работа выполнена в Институте ядерной физики Сибирского отделения Академии Наук СССР.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Барков Лев Митрофанович — доктор физико-математических наук, профессор, академик АН СССР, Институт ядерной физики СО АН СССР, г. Новосибирск

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Граменицкий Игорь Михайлович — доктор физико-математических наук, Объединенный Институт ядерных исследований, г. Дубна

Курдадзе Лери Михайлович — доктор физико-математических наук, Тбилисский государственный университет, г. Тбилиси

Ведущая организация: Институт теоретической и экспериментальной физики, г. Москва.

Защита диссертации состоится « 4 » марта 1988 г. в « 10 » часов на заседании специализированного совета Д.002.24.01 при Институте ядерной физики СО АН СССР.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 11, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ СО АН СССР.

Автореферат разослан « 2 » февраля 1988 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
доктор физ.-мат. наук

 В.С. Фадин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Основные характеристики стабильных частиц и резонансов такие, как масса, время жизни, магнитный момент и другие, широко используются в физике элементарных частиц, и точному измерению этих величин всегда придается исключительное значение. Особенно важной задачей в метрологических экспериментах является применение независимых методов, которые позволяют исключить систематические ошибки, присущие каждому методу. Характеристики нейтральных каонов представляют особый интерес, поскольку эти частицы присутствуют в распадах многих открытых в последнее время частиц. Более точное знание параметров хотя бы одной из частиц позволяет с помощью законов сохранения улучшить точность характеристик ее партнеров в различных реакциях.

Значение разности масс нейтрального и заряженного каонов важно для правильного представления о внутреннем строении этих частиц. В настоящее время ошибка в величине разности масс нейтрального и заряженного каонов определяется точностью измерения массы нейтрального каона, поскольку значение массы заряженного каона известно с существенно лучшей точностью.

В настоящее время накопители со встречными электрон-позитронными пучками играют заметную роль в физике высоких энергий. Прецизионный метод измерения средней энергии пучков в электрон-позитронных накопителях с помощью резонансной деполаризации позволил провести целый ряд метрологических экспериментов. Использование этого метода в сочетании с возможностью получать на накопителе ВЭПП-2М медленные нейтральные каоны и наличием криогенного магнитного детектора с хорошим

пространственным разрешением и малым количеством вещества позволило провести прецизионный эксперимент по измерению массы нейтрального каона.

Основной детектирующей частью криогенного магнитного детектора является оптическая искровая камера с малым количеством вещества, помещенная в магнитное поле сверхпроводящего соленоида. Высокое пространственное разрешение 50—60 мкм достигнуто за счет увеличения давления газа и понижения температуры. Значительная часть диссертации посвящена описанию искровой камеры.

Целью работы является измерение массы нейтрального каона с малыми статистической и систематическими ошибками, что позволяет получить более точное значение разницы масс нейтрального и заряженного каонов, поскольку значение массы заряженного каона ранее было измерено с хорошей точностью.

Научная новизна работы. Для проведения экспериментов на накопителе ВЭПП-2М был разработан криогенный магнитный детектор. Максимальное магнитное поле в центре детектора составляет 32 кГс. Цилиндрическая оптическая искровая камера служит координатной частью детектора. Искровая камера с малым количеством вещества работает в трековом режиме при температуре 180 К и давлении газа 2,15 атмосферы. Полученное пространственное разрешение 50—60 мкм является очень высоким для регистрирующих систем такого объема. Это позволило провести ряд физических экспериментов с малыми систематическими ошибками.

В данной работе с помощью методики, отличной от традиционной, с высокой точностью измерена масса нейтрального каона. Используемая методика включает в себя два практически независимых способа определения массы нейтрального каона: посредством измерения углов разлета пионов при распаде нейтрального каона и по импульсному распределению каонов. Высокая точность полученных результатов связана как с реализацией этой методики, так и с возможностью получения медленных нейтральных каонов с хорошо измеряемой методом резонансной деполяризации энергией.

Практическая значимость результатов исследований. Измеренная величина массы нейтрального каона оказалась равной

$$M_{K^0} = 497,669 \pm 0,030 \text{ МэВ.}$$

Использование среднемирового значения массы заряженного каона и полученного в выполненной работе значения массы ней-

трального каона позволяет улучшить точность определения их разности, которая оказалась равной

$$M_{K^0} - M_{K^{\pm}} = 4,002 \pm 0,034 \text{ МэВ.}$$

Эти данные могут использоваться при анализе реакций с участием каонов и проверке правильности представлений о внутреннем строении нейтрального и заряженного каонов.

Криогенный магнитный детектор, с помощью которого получены экспериментальные данные, продемонстрировал возможность получения высокого пространственного разрешения и надежность в эксплуатации. Впервые в длительных физических экспериментах использовалась низкотемпературная искровая камера, работающая при повышенном давлении в трековом режиме.

Автор выносит на защиту следующие результаты работы:

1. В качестве основного элемента системы регистрации заряженных частиц в криогенном магнитном детекторе создана оптическая искровая камера с малым количеством вещества и с пространственным разрешением 50—60 мкм.

2. Измерена масса нейтрального каона с точностью, в четыре раза лучше существующей до этого точности среднемирового значения. Достигнутая точность величины массы нейтрального каона соизмерима с точностью измерений массы заряженного каона, что позволяет улучшить точность значения разности масс нейтрального и заряженного каонов.

Структура работы. Основной текст диссертации состоит из введения, четырех глав и заключения. Текст диссертации содержит 110 страниц, 31 рисунок и 11 таблиц. Список литературы содержит 46 наименований.

Апробация диссертационной работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Института ядерной физики СО АН СССР, сессиях Отделения ядерной физики АН СССР (1978—1986 гг.), Международных совещаниях по методике экспериментов на встречных пучках (Новосибирск, 1977 г.; Сан-Франциско, 1982 г.), Международном симпозиуме по взаимодействию фотонов и электронов при высокой энергии (Корнелл, США, 1983 г.), IX Международном симпозиуме по физике элементарных частиц (Варшава, 1986 г.), Международном рабочем совещании по ускорению и накоплению поляризованных пучков (Новосибирск, 1986 г.).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан обзор экспериментальных работ по измерению массы нейтрального каона, а также разности масс нейтрального и заряженного каонов. В обзоре показано, что результаты работ по определению массы нейтрального каона посредством измерения инвариантной массы пионов распада $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ не очень хорошо согласуются друг с другом. Из экспериментов по измерению разности масс нейтрального и заряженного каонов массу нейтрального каона можно определить с лучшей точностью, поскольку масса заряженного каона измерена с существенно меньшей ошибкой. Во введении описана идея эксперимента по измерению массы нейтрального каона на накопителе ВЭПП-2М, где используется возможность накопителя генерировать медленные нейтральные каоны с известной энергией.

Предложенная методика включает в себя два практически независимых способа определения массы нейтрального каона — посредством измерения углов разлета пионов при распаде нейтрального каона и по импульсному распределению каонов. Показано, что в этом случае систематическая ошибка в определении массы нейтрального каона из-за неточного знания магнитного поля в установке более чем на порядок меньше, в сравнении с экспериментами по определению массы нейтрального каона из инвариантной массы пионов распада. Показана необходимость хорошего пространственного разрешения детектора для достижения меньшей систематической ошибки в величине массы нейтрального каона. В этом разделе приводятся основные результаты проделанной работы.

Первая глава посвящена описанию цилиндрической искровой камеры в системе регистрации треков заряженных частиц криогенного магнитного детектора. В начале главы дается краткое описание криогенного магнитного детектора. Показано, что измеряемые в детекторе величины могут, в общем случае, отличаться от истинных на величину, пропорциональную квадратичной степени пространственного разрешения искровой камеры. Улучшение пространственного разрешения, в связи с этим, позволяет уменьшить не только статистическую ошибку, но и систематическую, связанную с правильным определением величины пространственного разрешения. Показана также желательность создания искровой камеры с возможно меньшим количеством вещества на пути заряженных частиц, регистрируемых в детекторе. Примененная в искровой

камере газовая смесь с небольшим содержанием CO_2 позволила уменьшить коэффициент диффузии тепловых электронов, образовавшихся вдоль трека заряженной частицы, пропорционально снижению температуры при неизменной плотности газа. Это стало возможно за счет роста сечения упругих столкновений тепловых электронов с молекулами CO_2 в результате понижения температуры самих электронов, а также уменьшения их скорости. В дополнение к этому диффузия электронов уменьшается из-за роста плотности газа при снижении температуры и повышении давления, а также при введении магнитного поля. Кроме этого, при повышенной плотности газа уменьшается снос искр в скрещенных электрическом и магнитном полях, увеличивается плотность электронов ионизации при прохождении заряженной частицы, улучшаются условия регистрации треков при разных углах наклона относительно электрического поля. Добавка CO_2 в силу малого коэффициента прилипания не связывает свободные электроны за время задержки высоковольтного импульса, в то же время к моменту последующего запуска в искровом зазоре не остается свободных электронов от предыдущего пробоя.

Далее описана конструкция шестизазорной искровой камеры, цилиндрические электроды которой выполнены из алюминиевой фольги толщиной 50 мкм. Количество материала на пути частиц внутри искровой камеры составляет 0,004 радиационной длины. Малая толщина электродов, помимо сложностей в изготовлении, потребовала соответствующего рассмотрения их устойчивости при возникновении внешних радиально направленных сил, возникающих из-за перепада давления в разных искровых зазорах, из-за наводимых в электродах токов при вводе магнитного поля. Кроме этого, были решены разного рода конструктивные вопросы, возникающие при переходе к пониженной температуре, равной 180 К. Внутренняя часть детектора также выполнена с малым количеством вещества 0,01 радиационной длины.

При восстановлении траекторий частиц учитывались свойства параметров оптических элементов детектора и зависимость от их температуры, а также от спектра искр при пробое в газе искровой камеры, знание которых требуется при переходе от тестовых измерений к рабочим условиям.

Полученное пространственное разрешение достигает, в конечном счете, 50—60 мкм в плоскости, перпендикулярной оси пучков. Вдоль оси пучков пространственное разрешение составляет 1,5 мм. Такие характеристики детектора позволяют достичь разрешения

около 1° по углу разлета пионов в распаде $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$. Импульсное разрешение для K_S^0 -мезонов, равно 5,6 МэВ/с в поле 25 кГс.

Вторая глава посвящена описанию постановки эксперимента по измерению массы нейтрального каона. После краткой характеристики ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2М значительное место уделено описанию контроля и стабилизации энергии встречных электрон-позитронных пучков. Для уменьшения влияния радиационных поправок на точность определения массы нейтрального каона значение энергии встречных электрон-позитронных пучков было фиксировано на левом склоне резонансной кривой ϕ -мезона.

При определении средней энергии встречных пучков использовался метод резонансной деполяризации, который был развит в Институте ядерной физики и позволил в данном эксперименте измерять абсолютную энергию частиц в накопителе с точностью до 10 кэВ. Для измерения энергии с такой точностью необходимо иметь степень поляризации частиц 50—60%, которая достигается за 3-4 часа радиационной поляризации электронов в накопителе при энергии ϕ -резонанса. В течение этого времени набор статистики не ведется.

Для поддержания постоянства средней энергии частиц в накопителе была введена коррекция на изменения его геометрии в промежутках между измерениями, обусловленные непостоянством температуры окружающей среды и другими причинами. Для учета изменения геометрии использовалась автоматическая система измерения смещений магнитов и линз накопителя. С помощью системы обратной связи для поддержания постоянства средней энергии пучка магнитное поле в накопителе менялось в зависимости от изменения среднего радиуса накопителя. Контрольные измерения энергии пучка, которые проводились примерно раз в сутки, показали, что средняя энергия частиц в накопителе поддерживалась постоянной с точностью 15 кэВ.

Далее приводятся выбранные значения магнитных полей в криогенном магнитном детекторе, интегралы светимости, время набора статистики, количество отснятых фотографий и число отобранных полезных событий в двух сеансах работы на накопителе. Кратко описаны условия запуска детектора и процедура обработки экспонированной фотопленки.

В третьей главе приводятся критерии отбора полезных событий. Поскольку для этого эксперимента важно качество восстановления кинематических характеристик частиц, в первую очередь от-

бирались события, у которых были обмерены искры на концах и в середине трека. Если это условие не выполнено, то угловое и импульсное разрешение детектора ухудшается в 1,5-2 раза. Кроме того, отбраковывались события с малым числом измеренных точек на треке, с пространственным разрешением, превышающим среднее разрешение в 3 раза, а также события, содержащие треки, расположенные слишком близко к краям зеркал.

Полезные события далее отбирались по сумме импульсов пионов, поскольку эта величина в распаде каона на два пиона находится в узком диапазоне значений вблизи 426 МэВ/с. Границы для отбора по этому параметру выбирались с учетом радиационных поправок и импульсного разрешения детектора.

Для уменьшения вклада фоновых процессов отбирались события, у которых угол расколлинearности в XU -плоскости, перпендикулярной оси пучков, был больше 10 градусов, а расстояние в XU -плоскости от точки распада каона до оси пучков превышало 1 мм. Координаты области взаимодействия электрон-позитронных пучков находились с помощью анализа событий электрон-позитронного рассеяния и процесса $e^+e^- \rightarrow 3\pi$.

Для дальнейшего анализа отбирались только те события, у которых точка распада каона находилась внутри вакуумной трубки ускорителя.

Рассмотрение возможного вклада фоновых процессов в отобранные таким образом события показывает, что наибольший вклад, менее 1%, дает процесс распада на лету внутри объема детектора одного из пионов на мюон и нейтрино, что учитывалось при обработке статистики.

Далее, рассматривается влияние радиационных поправок на величину средней энергии каонов в реакции $e^+e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0$. Найдена форма энергетического спектра рождающихся каонов.

При моделировании распадов $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ методом Монте-Карло начальная энергия каона разыгрывалась с учетом разброса в энергии электрон-позитронных пучков накопителя и радиационных поправок на излучение мягких фотонов. После этого определенные наугад кинематические параметры пионов, вылетающих из вакуумного промежутка накопителя, разыгрывались с учетом влияния пройденного частицей вещества, пространственного разрешения искровой камеры и расположения измеренных точек на треке, которое, в свою очередь, разыгрывалось согласно вероятностям пропадания точек трека в событиях, полученных в эксперименте.

Затем полученные после этого значения импульсов, энергий и

углов разлета пионов использовались для построения смоделированных гистограмм. Для этого отбирались события, прошедшие условия отбора, применяемые для полученных в эксперименте событий.

По смоделированным распределениям с помощью функции максимального правдоподобия определялись параметры аппроксимирующих их кривых, которые использовались впоследствии для сравнения с распределениями, полученными в эксперименте.

Для определения массы каона двумя независимыми методами, по импульсному распределению каонов и минимальному углу разлета пионов, события разбивались на две группы при каждой величине магнитного поля. При этом такие источники ошибок, как потери на ионизацию и рассеяние пионов в веществе, величина магнитного поля в детекторе, пространственное разрешение искровой камеры, дают различный вклад в точность определения массы каона по разным группам событий. При разделении событий на группы использовалось отношение измеренных импульсов заряженных пионов.

В первую группу включены события, у которых импульсы пионов отличались больше, чем на 10%.

Сравнением измеренной в детекторе суммарной энергии пионов с известной энергией пучка, с учетом поправок на излучение фотонов, контролируется абсолютная величина магнитного поля в установке и правильность восстановления импульсов заряженных частиц. Чувствительность контроля такова, что сдвиг суммарной энергии пионов на 356 кэВ соответствует изменению магнитного поля в детекторе на 0,1%, что приводит к поправке величины массы нейтрального каона на 24 кэВ, если масса определяется по импульсному распределению каонов.

Статистическую ошибку при определении массы первым способом, по импульсному распределению каонов, можно оценить, как

$$\sigma = (P/M) \cdot \Delta P = (P/M) \cdot \sigma_p / \sqrt{N} = 0,217 \cdot \sigma_p / \sqrt{N},$$

где N — число отобранных событий, а σ_p — разрешение детектора по импульсам нейтральных каонов.

Во вторую группу вошли события, у которых импульсы пионов отличались меньше, чем на 10%. Она содержит около 20% событий от полного числа распадов каона. Углы разлета пионов в событиях второй группы должны находиться в узкой области 0,56 градусов вблизи минимального угла разлета, приблизительно рав-

ного 150 градусам, однако, процессы с излучением мягких фотонов и конечное разрешение детектора по углам вполне предсказуемо увеличивают эту область.

Минимальный угол разлета соответствует случаю, когда пионы в системе центра инерции каона разлетаются перпендикулярно направлению его движения. Масса каона M связана с минимальным углом ψ_0 соотношением

$$M = \sqrt{E_K^2 \cdot \sin^2(\psi_0/2) + 4 m_\pi^2 \cdot \cos^2(\psi_0/2)}.$$

Зная массу пиона m_π , энергию нейтрального каона E_K , равную, с точностью до поправок на радиационное излучение, половине полной энергии встречных электрон-позитронных пучков, и, измерив минимальный угол разлета ψ_0 , можно определить массу нейтрального каона.

Статистическую ошибку при определении массы таким способом можно оценить как

$$\sigma = [(E_K^2 - 4m_\pi^2) \cdot \sin(\psi_0) / (4M)] \cdot (\pi/180) \cdot \Delta\psi_0 = 0,78 \cdot \sigma_\psi / \sqrt{N} \text{ МэВ/градус},$$

где N — количество отобранных событий с углом разлета пионов, близким к предельному, а σ_ψ — разрешение установки по углу разлета пионов.

Следует отметить, что при изменении массы каона на 100 кэВ средний импульс меняется на 460 кэВ, а среднее значение минимального угла на 0,128 градуса. Полученные в эксперименте распределения аппроксимировались кривыми, форма которых была найдена по соответствующим смоделированным распределениям. Дополнительно подгонялась равномерная фоновая подложка. Количество фоновых событий невелико и не превышает нескольких процентов. Из разности средних значений экспериментальных и смоделированных распределений находилась поправка к величине массы нейтрального каона, используемой при моделировании. Отсюда определялось окончательное значение массы нейтрального каона по разным группам событий.

В четвертой главе приведен анализ возможных систематических ошибок в определении массы каона. Правильность восстановления угловых характеристик треков контролируется с помощью пучковых коллинеарных событий в процессах $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $\mu^+\mu^-$, p^+p^- , а также частиц космических лучей, пролетающих на разных расстояниях от оси пучков. Правильность восстановления из-

пульсов заряженных частиц контролируется сравнением измеренной в детекторе суммарной энергии пионов с известной энергией пучка. Рассматривается влияние точности такого контроля на ошибку в величине массы нейтрального каона для разных групп событий.

Приведен учет вклада рассеяния и ионизационных потерь пионов в веществе детектора в ошибку определения массы каона. Показано, что, поскольку пионы разлетаются под достаточно большим углом $\sim 150^\circ$, вклад ионизационных потерь невелик.

Приводится таблица с ошибками различного характера для разных групп событий. Далее описана процедура усреднения величин массы нейтрального каона, определенных по разным группам событий с учетом корреляций между ними.

В конце главы проводится анализ внутренней согласованности результатов при дополнительных разбиениях событий на отдельные группы. Показано, что существует согласие с величиной массы каона, полученной из инвариантной массы пионов распада, хотя в этом случае ошибка много больше. Далее приводятся результаты двух сеансов, из которых состоял эксперимент.

В первом сеансе [3] по 780 событиям и при магнитном поле в центре детектора 15,071 кГс получено

$$M_{K^0} = 497,742 \pm 0,085 \text{ МэВ.}$$

Во втором сеансе [5] по 3713 событиям и при двух значениях магнитного поля в центре детектора: 14,926 и 24,69 кГс, получено

$$M_{K^0} = 497,661 \pm 0,033 \text{ МэВ.}$$

В первом сеансе ошибка определяется, в основном, разрешением установки и набранной статистикой. Усреднение этих двух результатов дает окончательное значение массы нейтрального каона:

$$M_{K^0} = 497,669 \pm 0,030 \text{ МэВ.}$$

Используя среднемировое значение массы заряженного каона, для разности масс нейтрального и заряженного каонов можно получить:

$$M_{K^+} - M_{K^0} = 4,002 \pm 0,034 \text{ МэВ.}$$

В заключении диссертации кратко перечислены основные результаты работы.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах автора:

1. Барков Л.М., Барышев В.Б., Блинов Г.А., Губанов Е.Н., Зайцев В.Н., Крупин Н.И., Рыскулов Н.М., Солодов Е.П., Хазин Б.И., Хорев В.М. Криогенный магнитный детектор для экспериментов на ВЭПП-2М. — Новосибирск, 1976, 13 с. — (Препринт/Ин-т ядерн. физики СО АН СССР, ИЯФ 76-121).
2. Barkov L.M., Blinov G.A., Ryskulov N.M. et al. A Cryogenic Magnetic Detector for Storage Ring Experiments. — Nucl. Instrum. Meth., 1983, v.204, N 213, p.379—383.
3. Барков Л.М., Блинов Г.А., Рыскулов Н.М. и др. Измерение массы нейтрального каона. — ЖЭТФ, Письма, 1985, т.42, № 3, с.113—116.
4. Barkov L.M., Vasserman I.B., Ryskulov N.M. et al. The Neutral Kaon Mass Measurement. — Proceedings of the IX Warsaw Symposium on Elementary Particle Physics. Warsaw, 1986, p.257—265.
5. Барков Л.М., Вассерман И.Б., Рыскулов Н.М. и др. Прецизионное измерение массы нейтрального каона. — Ядерная физика, 1987, т.46, № 4(10), с.1088—1094.

Подписано в печать 24.12 87 г. МН 08697
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,0 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 167

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на роталпримте Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*