

Ш. 54
И ЯФ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи
УДК 539.126:621.384.665:539.1.074

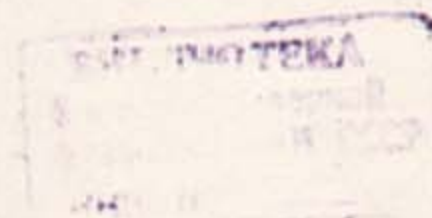
ШЕХТМАН Александр Исаевич

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ω -МЕЗОНА
НА НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-2М С ПОМОЩЬЮ
КРИОГЕННОГО МАГНИТНОГО ДЕТЕКТОРА

01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



✓
+
НОВОСИБИРСК — 1988

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:

Соловьев Михаил Иосифович — доктор физико-математических наук, ОИЯИ, г. Дубна

Грошев Владимир Романович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики СО АН СССР, г. Новосибирск

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

Защита диссертации состоится « 4 » марта 1988 г. в « 12 » 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. Установки со встречными электрон-позитронными пучками являются источником наиболее точной информации о параметрах векторных мезонов. Одной из таких установок является накопитель ВЭПП-2М с максимальной энергией пучков 2×700 МэВ. Высокая светимость накопителя и возможность прецизионного измерения энергии сталкивающихся пучков сделали возможным проведение ряда интересных экспериментов, в ходе которых были уточнены значения параметров ρ -, ω - и Φ -мезонов. Темой данной работы является эксперимент на накопителе ВЭПП-2М по изучению ω -мезона в реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, причем основное внимание было уделено точному измерению его массы.

Масса ω -мезона неоднократно измерялась как в экспериментах с неподвижной мишенью, так и на встречных электрон-позитронных пучках. Большая часть экспериментов на прямых пучках была выполнена с использованием водородных пузырьковых камер.

Одним из недостатков этой методики является большая аппаратная ширина, которая сравнима с шириной ω -мезона и даже превышает ее. Это приводит к возникновению систематических погрешностей порядка 1 МэВ в значениях массы и ширины ω -мезона из-за неточного знания аппаратной функции.

Существенное улучшение разрешения дает применение встречных электрон-позитронных пучков, где разброс энергии частиц в пучке составляет ~ 0.2 МэВ. Однако в выполненных ранее работах в Орсе и Новосибирске присутствуют систематические ошибки ~ 0.5 МэВ, связанные с неточностью калибровки и температурной нестабильностью энергии накопителя.

В связи с этим становится актуальным измерение массы ω -мезона на встречных электрон-позитронных пучках с использованием

метода резонансной деполяризации для абсолютной калибровки энергии пучков в накопителе, что позволяет получить значение массы со значительно меньшими систематическими погрешностями, чем в ранее опубликованных работах.

Эксперимент был выполнен с помощью криогенного магнитного детектора (КМД). Для регистрации заряженных частиц в КМД используется помещенная в магнитное поле оптическая искровая камера, обладающая высоким пространственным разрешением ~ 50 мкм. Треки частиц в искровой камере фотографируются на пленку с уменьшением в 18 раз, поэтому разрешение камеры соответствует 3 мкм на пленке. Использование фотографического съема информации привело к необходимости обработки большого числа фотоснимков и сделало актуальным создание для этой цели специализированного сканирующего автомата с точностью измерения координат на пленке ~ 1 мкм.

Цель проведенной работы состояла в следующем:

- Разработка сканирующего автомата для обработки фотоснимков с КМД, который позволил бы реализовать высокую координатную точность искровой камеры и проводить эксперименты, связанные с набором большой статистики $\sim 10^5 - 10^6$ фотоснимков.
- Измерение сечения реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в диапазоне энергий $2 \times 380 \div 2 \times 405$ МэВ и определение параметров ω -резонанса: массы, полной ширины, сечения в максимуме и бранчинга распада на электрон-позитронную пару.

Научная новизна работы. Разработан сканирующий автомат для обработки фотоснимков с цилиндрической искровой камеры КМД с точностью измерения координат на пленке 1 мкм и временем обработки одного кадра 1.5 секунды. Использование автомата позволило реализовать рекордно высокое разрешение искровой камеры (~ 50 мкм) в длительных физических экспериментах.

Впервые параметры ω -мезона измерены с использованием метода резонансной деполяризации для абсолютной калибровки энергии встречных электрон-позитронных пучков. Точность измерения массы ω -мезона в два раза выше среднемировой и в четыре раза выше, чем в лучшей опубликованной работе. Использование магнитного детектора с малым количеством вещества позволило устранить ошибки, связанные с моделированием эффективности регистрации частиц в детекторе и в 2 раза улучшить точность измерения сечения в максимуме резонанса и бранчинга распада $\omega \rightarrow e^+e^-$ по сравнению с предыдущими работами.

Значимость результатов исследования. Создание сканирующего автомата сделало возможным проведение с помощью КМД ряда интересных экспериментов, в ходе которых было получено 2 млн. фотоснимков.

Измеренные значения массы, полной ширины, сечения в максимуме ω -резонанса и бранчинга распада $\omega \rightarrow e^+e^-$ оказались равными:

$$M_\omega = 781.78 \pm 0.10 \text{ МэВ,}$$

$$\Gamma_\omega = 8.3 \pm 0.4 \text{ МэВ,}$$

$$\sigma_{\text{peak}} = 1549 \pm 57 \text{ нб,}$$

$$B_{\omega \rightarrow e^+e^-} = (7.2 \pm 0.3) \cdot 10^{-5}.$$

Полученное значение массы на 4 стандартных отклонения меньше принятого среднемирового значения, что может быть связано с систематическими ошибками в предыдущих измерениях, обусловленными неточным знанием аппаратурной функции и неточностью калибровки энергии пучков в накопителе. Полученное значение полной ширины ω -мезона также не согласуется со среднемировой величиной, но подтверждает результат эксперимента, выполненного на накопителе ВЭПП-2М с помощью Нейтрального Детектора.

Автор выносит на защиту следующие результаты работы:

1. Разработан сканирующий автомат для обработки фотоснимков с криогенного магнитного детектора с точностью измерения координат на пленке 1 мкм и временем обработки одного кадра 1.5 секунды.
2. С помощью КМД проведены измерения сечения реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в диапазоне энергий $2 \times 380 \div 2 \times 405$ МэВ с использованием метода резонансной деполяризации для калибровки энергии пучков в накопителе.

3. В результате обработки экспериментальных данных найдены параметры ω -мезона: масса, полная ширина, сечение в максимуме резонанса и бранчинг распада на электрон-позитронную пару.

Структура работы. Основной текст диссертации состоит из введения, трех глав и заключения. Текст диссертации содержит 114 страниц, 31 рисунок и 4 таблицы. Список литературы содержит 53 наименования.

Апробация диссертационной работы. Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались на семинарах Института ядерной физики СО АН СССР и на сессиях Отделения ядерной физики (1980, 1986 гг.)

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан краткий обзор экспериментальных работ по измерению массы ω -мезона и проанализированы причины возникновения систематических ошибок в этих экспериментах. Отмечаются преимущества методики встречных электрон-позитронных пучков и обосновывается актуальность проведения измерений массы ω -мезона с помощью детектора КМД с использованием метода резонансной деполяризации для калибровки энергии пучков в накопителе. В связи с использованием в КМД фотографического съема информации с искровой камеры обсуждается задача автоматической обработки фотоснимков. Приводится краткий обзор существующих автоматических сканирующих устройств и обосновывается необходимость разработки для КМД специализированного сканирующего автомата. Аксиальная симметрия КМД позволяет использовать в качестве измерительного элемента равномерно вращающийся диск с отверстиями, который осуществляет сканирование фотоснимка по окружностям фиксированного радиуса. В конце введения представлены основные результаты, полученные в диссертации.

Первая глава посвящена постановке эксперимента. Описана конструкция криогенного магнитного детектора и приведены его основные параметры. Для регистрации треков заряженных частиц в КМД используется оптическая искровая камера с цилиндрическими электродами, помещенная в магнитное поле около 32 кГс. С помощью системы зеркал цилиндрический объем искровой камеры просматривается с одного торца кинокамерой, которая снимает треки частиц на 35-миллиметровую киноплёнку. Координаты искр в направлении оси искровой камеры определяются с помощью системы призм, сдвигающих изображение искры пропорционально расстоянию от искры до призмы. Для запуска КМД используются две цилиндрические многопроволочные пропорциональные камеры, расположенные внутри и снаружи искровой камеры.

Подробно описаны конструкция оптической системы детектора и методы устранения искажений, возникающих при фотографировании. Описана система реперных знаков, необходимых для восстановления положения искр в пространстве искровой камеры по измеренным координатам на пленке. Конструкция и расположение реперных знаков выбирались таким образом, чтобы координаты их изображений на пленке было удобно измерять с помощью сканирующего автомата. При фотографировании изображение двух по-

ловин искровой камеры создается двумя отдельными системами зеркал. При этом на пленке получается единое изображение искры $\bar{4}$ камеры, что очень важно для работы сканирующего автомата. Подробно описана методика юстировки оптической системы детектора. Сформулированы требования к юстировке, обеспечивающие сведение к минимуму искажений при фотографировании. Приводятся результаты изучения свойств элементов оптической системы.

Кратко изложена идея метода резонансной деполяризации для точной калибровки энергии пучков в накопителе и особенности применения этого метода в области ω -мезона. Для контроля за энергией пучков в процессе эксперимента использовались измерения магнитного поля в накопителе по ЯМР, а также среднего радиуса накопителя с помощью автоматической системы измерения смещений магнитов и линз. Поддержание постоянной энергии пучка обеспечивала система обратной связи, которая регулировала магнитное поле при изменении размеров накопителя. Зависимость частоты ЯМР от энергии пучка калибровалась с помощью метода резонансной деполяризации. В работе приведены результаты калибровок, разброс которых соответствует точности измерения энергии пучка порядка 15 кэВ.

Для нахождения параметров ω -мезона измерялось сечение реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в 15 точках по энергии в диапазоне $2 \times 380 \div 2 \times 405$ МэВ, причем в 10 из них измерения проводились дважды. Для нормировки использовался процесс $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, который регистрировался тем же детектором, что и основной процесс. Логика запуска требовала наличия двух заряженных частиц с углом между ними в азимутальной плоскости больше 67.5 градуса. Это требование было необходимо для уменьшения числа фоновых запусков от частиц, выбывающих из пучка в соседних промежутках накопителя. Полный набранный интеграл светимости составил около 50 нб^{-1} , при этом было получено 310 тыс. фотоснимков. При оцифровке фотоснимков на сканирующем автомате отбрасывались только те кадры, которые вообще не содержат треков. Всего было оцифровано и записано на первичную магнитную ленту 130 тыс. событий.

Вторая глава посвящена описанию конструкции сканирующего автомата для обработки фотоснимков. Сформулированы требования к сканирующему автомату и обоснованы преимущества выбранного метода сканирования изображения по окружностям фиксированных радиусов.

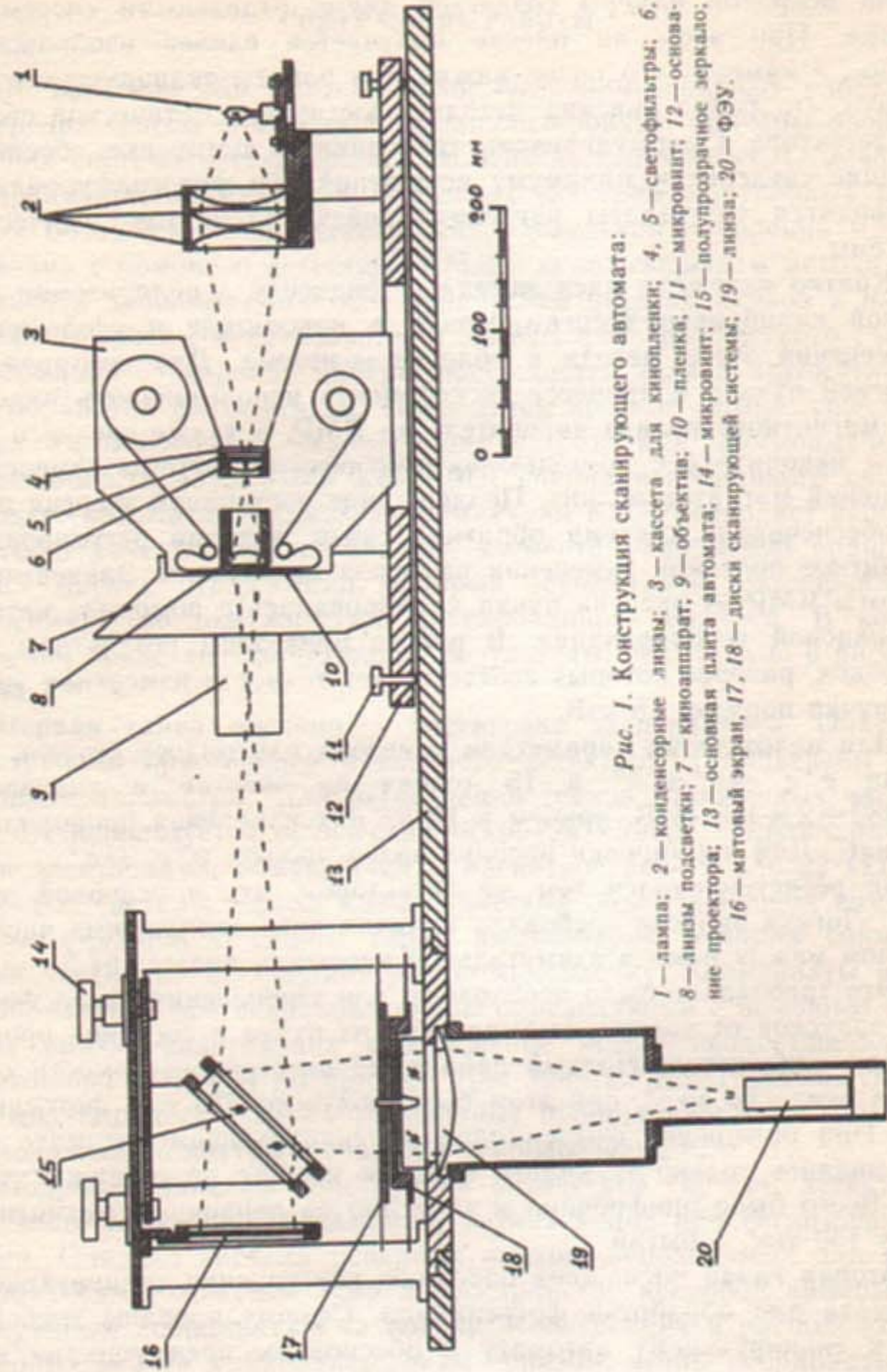


Рис. 1. Конструкция сканирующего автомата:

1—лампа; 2—конденсорные линзы; 3—кассета для киноплёнки; 4, 5—светофильтры; 6, 8—линзы подсветки; 7—киноаппарат; 9—объектив; 10—плёнка; 11—микролинза; 12—основание проектора; 13—основная плита автомата; 14—микролинза; 15—полупрозрачное зеркало; 16—матовый экран; 17, 18—диски сканирующей системы; 19—линза; 20—ФЭУ.

На рис. 1 приведена конструкция сканирующего автомата. Пунктирные линии показывают прохождение световых лучей через оптическую систему. На плите 12 размещены элементы 1—9 проектора, изготовленного на базе кинокамеры 7 типа «КОНВАС-АВТОМАТ». Эта кинокамера аналогична применяемой для фотографирования событий с КМД. Для использования камеры в качестве проектора вместо обычной кассеты с плёнкой была изготовлена специальная кассета 3. В ней установлены линзы 6, 8, обеспечивающие равномерное освещение кадра, и светофильтры 4, 5 для поглощения длинноволновой части спектра, к которой нечувствителен фотоумножитель. Источником света служит лампа накаливания 1, размещенная вместе с конденсорными линзами 2 на отдельной подставке для уменьшения влияния тепла на всю систему. Изображение события с пленки 10 с помощью объектива 9 и полупрозрачного зеркала 15 проецируется на сканирующую систему из двух вращающихся дисков 17, 18. Свет, прошедший через отверстия в сканирующих дисках, с помощью линзы 19 собирается на фотоумножитель 20.

Диски 17, 18 реализуют сканирование спроецированного на них изображения по 20 окружностям фиксированного радиуса. Для этого в нижнем диске сделаны 20 отверстий диаметром 100 мкм. Каждое из них удалено от центра диска на расстояние, равное радиусу соответствующей окружности сканирования. В верхнем диске на тех же расстояниях от центра сделаны дугообразные щели шириной 1 мм. Щели ориентированы вдоль окружностей сканирования и имеют угловой размер 18° . Они разнесены по углу таким образом, что при любом взаимном развороте дисков только одно из 20 отверстий в нижнем диске находится под соответствующей щелью и открыто для прохождения света. При работе сканирующей системы верхний и нижний диски вращаются с угловыми скоростями, которые близки к 20 об/с. Скорость нижнего диска превышает на 3% скорость верхнего диска. Это обеспечивает последовательное открывание отверстий в нижнем диске в порядке уменьшения расстояния до центра.

С помощью ФЭУ измеряется интенсивность света, проходящего через открытое в данный момент сканирующее отверстие. В результате получается сигнал, отражающий распределение яркости изображения вдоль сканируемой окружности. Импульсы в этом сигнале соответствуют пересечению треков со сканируемой окружностью. Время прихода центра импульса определяет угловую координату точки трека.

Подробно описана конструкция сканирующей системы. Для получения требуемой точности измерения координат величина отклонения диска от равномерного вращения не должна превышать 10^{-4} радиан в течение оборота. Чтобы выполнить это условие, диски вращаются с помощью электромагнитного привода, представляющего собой вариант асинхронного электродвигателя, ротором которого является сам вращающийся диск. Чтобы отверстия в измерительном диске открывались в правильной последовательности, вращение дисков синхронизируется с помощью электронной системы, управляющей скоростью верхнего диска.

Описана работа электроники, измеряющей времена прихода импульсов с ФЭУ. Она позволяет с точностью 1 мкс определить время прихода центра импульса, имеющего колоколообразную форму с шириной на полувысоте 50 мкс. Поскольку амплитуда импульсов может изменяться в десятки раз из-за колебания яркости искр, используются 4 независимых канала измерения с соотношением коэффициентов усиления 1:3:9:27. Для уменьшения систематических погрешностей вводятся поправки, учитывающие искажения формы импульса из-за интегрирования в усилителе.

Описана методика юстировки оптической системы автомата для устранения искажений, возникающих при проецировании изображения на сканирующую систему. Приведены результаты измерения статистических и систематических погрешностей автомата. Описано программное обеспечение для управления автоматом и ввода информации в ЭВМ.

В третьей главе обосновываются критерии отбора для событий процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Основными источниками фона являются процессы $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$, $\pi^+\pi^-\gamma$, $\mu^+\mu^-\gamma$.

Для их отделения использовались условия на угол расколлинearности в плоскости, перпендикулярной оси пучков $|\Delta\varphi| > 15^\circ$ и на отношение среднего импульса к энергии пучка $0.45 < (|p_1| + |p_2|)/2E < 0.725$. Для отделения событий космического фона накладывалось условие на расстояние от оси пучка до ближайшего из двух треков $|l| < 1$ мм. Интеграл светимости в каждой энергетической точке определялся по числу зарегистрированных событий реакции $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$. Для этого с помощью условий на углы расколлинearности в плоскостях: перпендикулярной оси пучков $|\Delta\varphi| < 6^\circ$ и содержащей ось пучков $|\Delta\theta| < 10^\circ$ — и по параметру $|p_1 - p_2|/(p_1 + p_2) < 0.15$ выделялись события, близкие к коллинеарным, с одинаковыми импульсами у обеих частиц. В их число дают вклад процессы $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $\pi^+\pi^-$, $\mu^+\mu^-$. Кратко

описывается разделение этих событий методом функций максимального правдоподобия по двумерным распределениям: средний импульс пары заряженных частиц в событии — угол вылета отрицательной частицы относительно оси пучков в накопителе. Эта методика разделения эффективно учитывает различия в угловом распределении продуктов трех разделяемых процессов.

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ определялось по формуле

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0} = \frac{N_{\pi^+\pi^-\pi^0}}{L \epsilon_{\pi^+\pi^-\pi^0} \cdot (1 + \delta_{\pi^+\pi^-\pi^0})},$$

где $N_{\pi^+\pi^-\pi^0}$ — число найденных 3π -событий, $\delta_{\pi^+\pi^-\pi^0}$ — радиационная поправка, L — интеграл светимости, $\epsilon_{\pi^+\pi^-\pi^0}$ — эффективность регистрации 3π -событий. Эффективность определялась численным моделированием и оказалась равной $12.9 \pm 0.1\%$. Полученные значения сечения приведены на рис. 2. Резонансная кривая аппроксимировалась формулой

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0} = \sigma_{peak} \cdot \frac{M_\omega^2 \Gamma_\omega^2}{(S - M_\omega^2)^2 + S \Gamma_\omega^2(S)} \cdot \frac{F(S)}{F(M_\omega^2)},$$

$$\Gamma(S) = \Gamma_\omega \cdot \frac{S^{3/2}}{M_\omega} \cdot \frac{F(S)}{F(M_\omega^2)}, \quad S = 4E^2,$$

где $F(S)$ — фактор, описывающий энергетическую зависимость фазового объема для трех пионов в конечном состоянии с учетом механизма перехода $\omega \rightarrow \rho\pi \rightarrow 3\pi$. $F(S)$ определялся численным интегрированием дифференциального сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \gamma_{virt} \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Вблизи ω -резонанса отношение $F(S)/F(M_\omega^2)$ аппроксимировалось линейной зависимостью от \sqrt{S} :

$$\frac{F(S)}{F(M_\omega^2)} = 1 + 10 \left(\frac{\sqrt{S} - M_\omega}{M_\omega} \right).$$

В качестве свободных параметров использовались масса M_ω , полная ширина Γ_ω и величина сечения в пике σ_{peak} , а также величина нерезонансного фона. Кривая на рис. 2 соответствует оптимальным значениям параметров ω -мезона:

$$M_\omega = 781.78 \pm 0.10 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_\omega = 8.3 \pm 0.4 \text{ МэВ},$$

$$\sigma_{peak} = 1549 \pm 57 \text{ нб.}$$

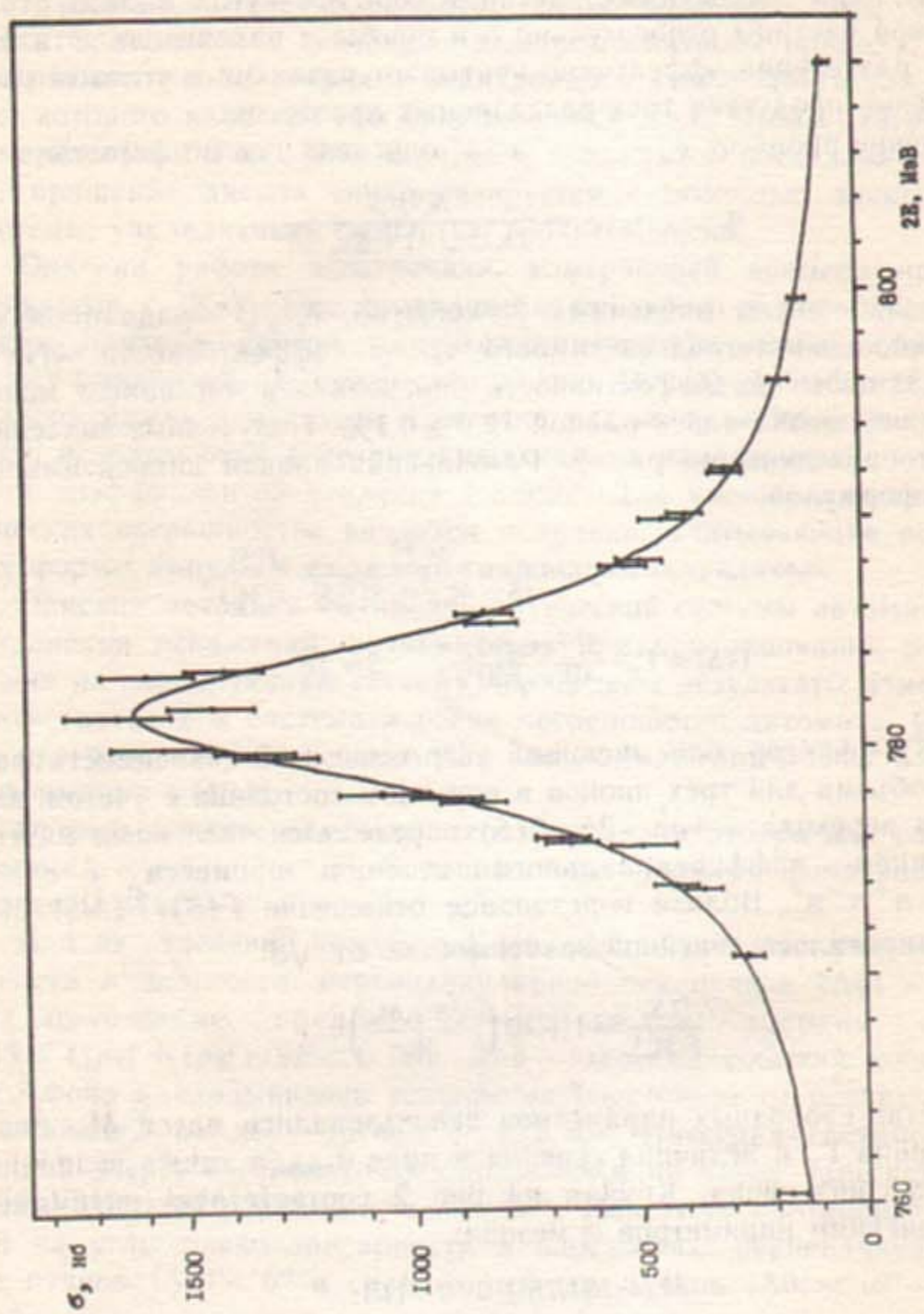
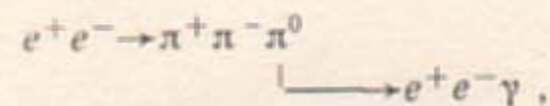


Рис. 2. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Сплошная линия — аппроксимация с оптимальными значениями параметров.

и фону 69 ± 9 нб. При этом $\chi^2 = 27.3$ при 24 степенях свободы, что соответствует, согласно теории с экспериментом, 30%. В величину σ_{peak} введена поправка 3.5% на ядерное взаимодействие пионов с веществом стенки внешней пропорциональной камеры (3 мм меди), а также 1.2% на процесс



события которого отбрасывались при отборе. Из соотношения

$$\sigma_{peak} = (12\pi/M_\omega^2) \cdot B_{\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0} \cdot B_{\omega \rightarrow e^+e^-}$$

и табличного значения

$$B_{\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0} = 0.896 \pm 0.005,$$

получено значение бранчинга

$$B_{\omega \rightarrow e^+e^-} = (7.2 \pm 0.3) \cdot 10^{-5}.$$

Далее проводится анализ возможных систематических погрешностей, связанных с непостоянством эффективности искровой камеры. Показано, что эти погрешности устраняются при включении в обработку событий с одним зарегистрированным треком, доля которых от общего числа 3л-событий составляет 6%. Проверена независимость полученных параметров ω -мезона от условий отбора.

В заключении приводятся основные результаты и выводы проведенной работы.

Основные результаты работы опубликованы в следующих работах автора:

1. *Barkov L.M., Blinov G.A., Shekhtman A.I. et al.* A Cryogenic Magnetic Detector for Storage Ring Experiments. — Nucl. Instr. and Meth., 1983, v.204, p.379—383.
2. *Барков Л.М., Смахтин В.П., Солодов Е.П., Хазин Б.И., Шехтман А.И.* Сканирующий автомат для обработки фотоснимков с цилиндрической искровой камеры. — Новосибирск, 1987, 35 с. — (Препринт/Институт ядерной физики СО АН СССР, 87-161).
3. *Барков Л.М., Вассерман И.Б., Шехтман А.И. и др.* Измерение параметров ω -мезона с помощью криогенного магнитного детектора. — Письма в ЖЭТФ, 1987, т.46, вып.4, с.132—134.
4. *Барков Л.М., Вассерман И.Б., Шехтман А.И. и др.* Измерение параметров ω -мезона с помощью криогенного магнитного детектора. — Новосибирск, 1987, 23 с. — (Препринт/Институт ядерной физики СО АН СССР, 87-95).

Подписано в печать 11 января 1988 г. МН 08012
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,1 печ.л., 0,9 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 2

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