

## ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ НЕЙТРАЛЬНОГО КАОНА

БАРКОВ Л. М., ВАССЕРМАН И. Б., ВОРОБЬЕВ П. В., ИВАНОВ П. М.,  
КЕЗЕРАШВИЛИ Г. Я., КООП И. А., ЛЫСЕНКО А. П., МИХАЙЛИЧЕНКО А. А.,  
ОХАПКИН В. С., ПЕРЕВЕДЕНЦЕВ Е. А., ПОЛУНИН А. А., РЕДИН С. И.,  
РЫСКУЛОВ Н. М., СКРИНСКИЙ А. Н., СМАХТИН В. П., СОЛОВЕВ Е. П.,  
ХАЗИН Б. И., ШАТУНОВ Ю. М., ШЕХТМАН А. И.

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

(Поступила в редакцию 14 марта 1987 г.)

Описан эксперимент по измерению массы нейтрального каона, выполненный на накопителе ВЭПП-2М. Нейтральные каоны, рождающиеся в реакции  $e^+e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0$ , регистрировались по распаду  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  в оптической цилиндрической искровой камере криогенного магнитного детектора. Для определения массы каона проводились измерения средней энергии начальных частиц в накопителе методом резонансной деполяризации, а также импульсов и углов разлета пионов. Значение массы нейтрального каона получено из анализа 3713 событий и оказалось равным  $497,661 \pm 0,033$  МэВ. Этот результат позволяет уточнить разность масс заряженного и нейтрального каонов.

### Введение

Прямые измерения массы нейтрального каона по величине инвариантной массы пионов в распаде  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  проводились несколькими группами [1–4]. Среднее значение, вычисленное по результатам этих работ, составляет  $M = 497,87 \pm 0,32$  МэВ. Приведенная ошибка включает в себя масштабный множитель 1,5, который указывает на значительное расхождение в результатах экспериментов.

Накопитель со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М [5] при работе в области энергий  $\phi$ -резонанса является хорошим источником сравнительно медленных нейтральных каонов в реакции  $e^+e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0$ . Развитие метода резонансной деполяризации [6, 7] позволило измерять среднюю энергию пучков в накопителе с высокой точностью и, следовательно, с учетом радиационных поправок точно знать энергию каонов. Измеряя их импульс или минимальный угол разлета пионов в распаде  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ , можно определить массу каона. При этом малая кинетическая энергия каонов позволяет достичь высокой точности определения массы каждым из этих практически независимых способов. Кроме того, такая постановка эксперимента в отличие от традиционной, когда начальная энергия каонов неизвестна и масса каона определяется по инвариантной массе пионов распада, позволила уменьшить вклад неопределенности в величине магнитного поля в установке в точность определения массы каона более чем на порядок.

В нашей предыдущей работе [8] с использованием обоих этих способов в реакции  $e^+e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0 \rightarrow K_L^0 \pi^+\pi^-$  было получено значение  $M = 497,742 \pm \pm 0,085$  МэВ.

В настоящей работе приведены результаты нового эксперимента по определению массы нейтрального каона в реакции  $e^+e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0 \rightarrow K_L^0 \pi^+\pi^-$  на накопителе со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М с помощью детектора КМД [9].

## Детектор КМД

Криогенный магнитный детектор (КМД) представляет собой систему из сверхпроводящего соленоида, внутри которого соосно размещены шестизазорная цилиндрическая оптическая искровая камера и две цилиндрические пропорциональные камеры. Оси искровой камеры и соленоида совпадают с направлением движения встречных электрон-позитронных пучков в накопителе ВЭПП-2М. Вблизи торцов основного соленоида и соосно с ним размещены две сверхпроводящие компенсирующие катушки с магнитным полем, направленным противоположно полю основного соленоида. Неоднородность поля в рабочем объеме  $<15\%$  и учитывается при обработке событий.

Пропорциональные камеры, одна из которых расположена между искровой камерой и вакуумной трубкой накопителя, а другая — снаружи искровой камеры, служат для запуска детектора и предварительного отбора событий по углам и импульсам. Система искровой и пропорциональных камер позволяет регистрировать события в телесном угле  $0,6\text{--}4\text{ л. ср.}$

Искровая камера с алюминиевыми электродами толщиной 50 мкм работает в трековом режиме при температуре 180 К и давлении 2 атм. Наружный диаметр искровой камеры 26 см, длина рабочей области 22 см. Изображения треков заряженных частиц с помощью системы зеркал выводятся за пределы корпуса детектора и сводятся на кинокамеру.

Количество вещества, которое проходит частица от места встречи до попадания в искровую камеру, составляет 0,01 рад. ед. Количество материала на пути частицы внутри искровой камеры от ее внутреннего электрода до наружного с учетом газового наполнения камеры составляет 0,004 рад. ед.

Благодаря наличию магнитного поля, низкой температуре и повышенному давлению газовой смеси в искровой камере, а также применению автомата для обработки снимков в перпендикулярной оси пучков  $XU$ -плоскости получено пространственное разрешение  $\sim 60$  мкм. Вдоль оси  $Z$ , параллельной оси пучков, пространственное разрешение составляет 1,5 мм. Влияние многократного рассеяния пионов на точность восстановления импульсов сравнимо с вкладом пространственного разрешения детектора. Направление вылета частиц в  $XU$ -плоскости восстанавливается с точностью  $0,37^\circ$ , а угол между траекторией частицы и осью  $Z$  определяется с точностью  $1,7^\circ$ . Такие характеристики детектора позволяют достичь разрешения  $\sim 1^\circ$  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.

### Постановка эксперимента

Для уменьшения влияния радиационных поправок на точность определения массы нейтрального каона значение энергии пучков в течение эксперимента фиксировалось на левом склоне резонансной кривой  $\phi$ -мезона и было равно  $2E = 1018,64 \pm 0,03$  МэВ.

Для измерения энергии с точностью  $\sim 10$  кэВ методом резонансной деполяризации пучка необходимо иметь степень поляризации частиц 50—60%, которая достигается за 3—4 ч радиационной поляризации электронов в накопителе при энергии  $\phi$ -резонанса. Для поддержания постоянства средней энергии частиц в накопителе надо учитывать изменение его геометрии в промежутках между измерениями из-за непостоянства температуры окружающей среды и других причин. Изменение геометрии накопителя оказывает основное воздействие на стабильность энергии частиц в пучке. Для учета изменения использовалась автоматическая система измерения смещений магнитов и линз накопителя [10].

Перед началом эксперимента с помощью метода резонансной деполяризации была получена зависимость энергии пучка от показаний датчиков системы радиальных смещений магнитов. При этом магнитное поле в накопителе, контролируемое с помощью ЯМР, поддерживалось постоянным. Как оказалось, изменение среднего радиуса накопителя на 10 мкм соответ-

ствуется уходу энергии пучка на 13 кэВ. Для компенсации этого эффекта в ходе эксперимента магнитное поле в накопителе изменялось с учетом коэффициента обратной связи между показаниями датчика ЯМР, контролирующего магнитное поле в накопителе, и изменениями среднего радиуса накопителя. Кроме того, в течение эксперимента, продолжавшегося около двух недель, примерно раз в сутки проводились контрольные измерения средней энергии пучка методом резонансной деполяризации. Результаты этих измерений учитывались при обработке статистики. Полученные значения энергии пучка  $E$  в зависимости от изменения среднего радиуса накопителя  $\Delta\bar{R}$  с включенной обратной связью представлены на рис. 1 отдельно для разных значений магнитного поля в детекторе. Из результатов

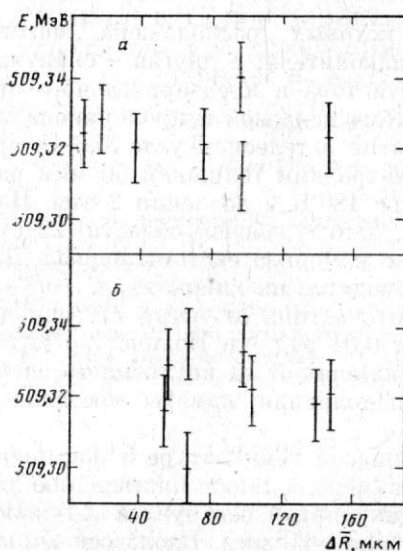


Рис. 1. Значения энергии пучка в контрольных измерениях с включенной обратной связью. По оси абсцисс — изменения среднего радиуса накопителя.  $a$  —  $H=14,93$  кГс,  $b$  —  $H=24,70$  кГс

контрольных измерений следует, что средняя энергия частиц в пучке в ходе эксперимента поддерживалась постоянной с точностью 15 кэВ.

Нейтральные каоны, рождающиеся в реакции  $e^+e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0$ , вылетают из места встречи пучков преимущественно перпендикулярно оси пучков и имеют среднюю длину пробега до распада 5,8 мм для  $K_S^0$ -мезонов и 3,4 м для  $K_L^0$ -мезонов. Распределение пионов в распаде  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  по углу разлета в л.с. имеет максимум при минимальном угле разлета  $\psi_0 \approx 150^\circ$ . Импульс каонов равен  $\sim 108,3$  МэВ/с.

При значениях магнитного поля в объеме детектора 14,93 и 24,70 кГс был набран интеграл светимости 17,7 и 35,3 обратных нбн соответственно. При этом такие источники ошибок, как рассеяние в веществе, пространственное разрешение искровой камеры, снос искр в скрещенных электрическом и магнитном полях, дают различный вклад в точность определения массы каона для разных значений магнитного поля в детекторе.

В эксперименте использовались условия запуска, при которых регистрировались двухчастичные события с углом расколлинearности в  $XU$ -плоскости от 0 до  $90^\circ$ . Эффективность регистрации процесса  $e^+e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0 \rightarrow K_L^0 \pi^+\pi^-$  составила  $\sim 20\%$ . В эксперименте получено  $\sim 80$  тыс. фотографий с двухчастичными событиями. Большую часть зарегистрированных событий составляют частицы космических лучей, пролетающие в стороне от центра пучка, и частицы, вылетающие из места встречи в процессах  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ,  $\pi^+\pi^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ . По этим коллинеарным событиям контролировалась правильность угловых характеристик восстановленных траекторий частиц.

### Отбор событий

Полезные события в первую очередь отбирались по сумме импульсов пионов ( $p_1+p_2$ ), 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 и составили

$$380 < (p_1 + p_2) < 472 \text{ МэВ/с в поле } 14,93 \text{ кГс}$$

и

$$400 < (p_1 + p_2) < 448 \text{ МэВ/с в поле } 24,70 \text{ кГс.}$$

Для уменьшения вклада фоновых процессов отбирались события, у которых угол расколлинearности в  $XU$ -плоскости  $> 10^\circ$ , а расстояние в  $XU$ -

плоскости от точки распада каона до оси пучков  $>1$  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. Отбраковывались события с малым числом измеренных точек на треке, с пространственным разрешением, превышающим среднее разрешение в 3 раза, а также с треками, расположенными слишком близко к краям зеркала. По указанным критериям было отобрано 3713 событий.

Рассмотрение возможного вклада фоновых процессов в отобранные таким образом события показывает, что наибольший вклад ( $\sim 0,6\%$ ) дает процесс распада на лету внутри объема детектора одного из пионов на мюон и нейтрино, что учитывалось при обработке статистики.

## Результаты

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, абсолютная 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  $10\%$ . Она содержит 968 событий, набранных при магнитном поле  $14,93$  кГс, и 2057 событий, набранных при магнитном поле  $24,70$  кГс.

Сравнением измеренной в детекторе суммарной энергии пионов (рис. 2) с известной энергией пучка с учетом поправок на излучение фотонов контролируются абсолютная величина магнитного поля в установке и правильность восстановления импульсов заряженных частиц. Полученная неопределенность в суммарной энергии пионов позволила контролировать магнитное поле в детекторе с точностью  $0,1\%$ .

По импульсному распределению каонов в событиях первой группы, представленному на рис. 3, с помощью метода максимального правдоподобия определялась масса нейтрального каона. Расчетное распределение каонов по импульсам в реакции  $e^+e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0 \rightarrow K_L^0 \pi^+ \pi^-$  получено моделированием методом Монте-Карло с учетом свойств детектора. Радиационные поправки учитывались согласно работе [11].

Статистическую ошибку при определении массы таким способом можно оценить, как  $\sigma = (p/M) \Delta p = (p/M) \sigma_p / \sqrt{N} = 0,217 \sigma_p / \sqrt{N}$ , где  $N$  — число отобранных событий, а  $\sigma_p$  — разрешение детектора по импульсам нейтральных каонов, равное  $8,3$  и  $5,6$  МэВ/с при магнитном поле в детекторе  $H = 14,93$  и  $24,7$  кГс соответственно. Такая оценка дает  $\sigma \approx 60$  и  $\approx 30$  кэВ для событий, отобранных при различных магнитных полях в детекторе.

В результате анализа экспериментальных данных масса нейтрального каона оказалась равной  $M = 497,602 \pm 0,074$  МэВ для событий первой группы, набранных при магнитном поле  $14,93$  кГс, и  $M = 497,657 \pm 0,046$  МэВ для событий первой группы, набранных при магнитном поле  $24,70$  кГс.

Приведенная ошибка складывается из статистической ошибки, равной  $59$  и  $27$  кэВ для полей  $14,93$  и  $24,70$  кГс соответственно, а также ошибок, связанных с оптическими искажениями и сносом искр в электрическом и магнитном полях, с учетом радиационных поправок, с неточностью калибровки магнитного поля в детекторе и неточностью знания энергии пучка. Кроме того, учитывался вклад в ошибку из-за рассеяния и потерь на ионизацию при прохождении пионов в веществе детектора. Так, неопределенность в величине магнитного поля  $0,1\%$  дает вклад в ошибку определения массы таким способом  $24$  кэВ. Что касается потерь на ионизацию,

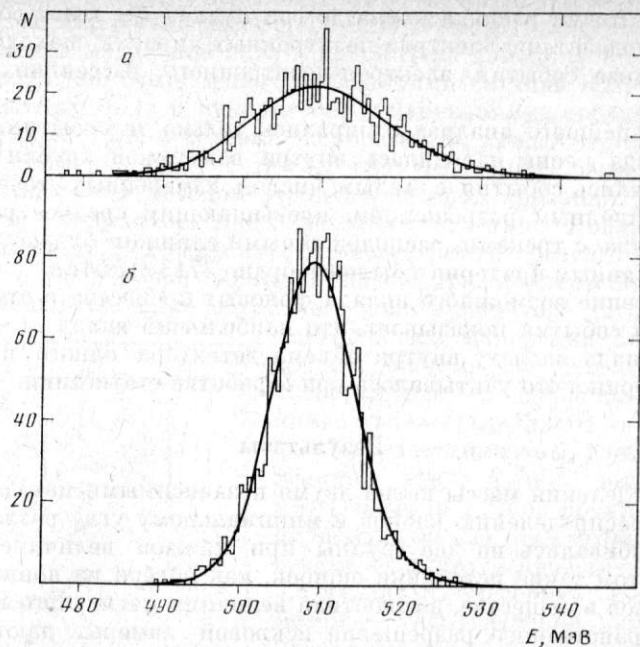


Рис. 2. Распределение событий первой группы по суммарной энергии пионов. Сплошная кривая — расчет с энергией пучка 509,32 МэВ.  $a$  —  $H=14,93$  кГс,  $b$  —  $H=24,70$  кГс

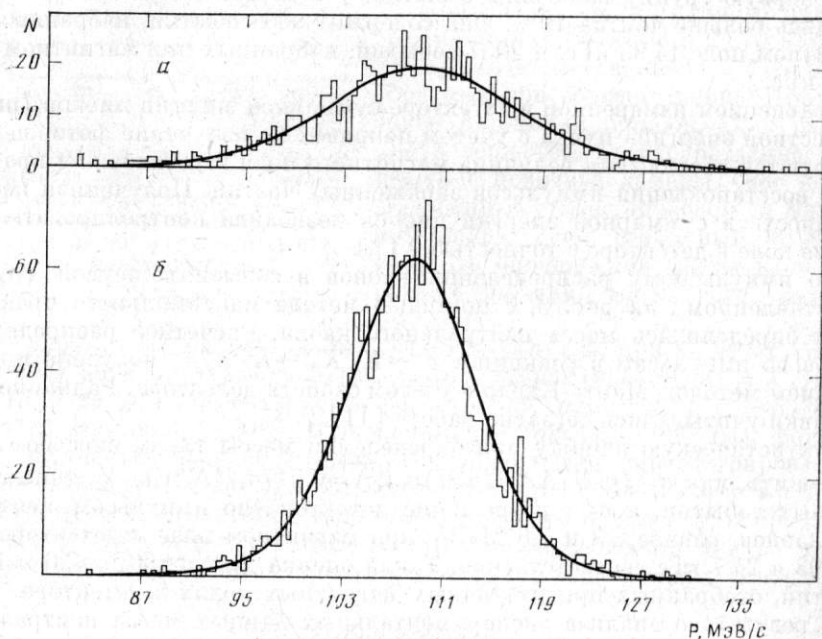


Рис. 3. Распределение событий первой группы по импульсам каонов. Сплошная кривая — расчет.  $a$  —  $M=497,602$  МэВ,  $H=14,93$  кГс;  $b$  —  $M=497,657$  МэВ,  $H=24,70$  кГс

то, хотя они и составляют  $\sim 700$  кэВ для каждого пиона, импульс нейтрального каона меняется из-за этого на небольшую величину, поскольку пионы разлетаются под тупым углом, и даже 20%-ная неопределенность в количестве вещества приводит к сдвигу массы нейтрального каона только на 13 кэВ.

Во вторую группу вошли события, у которых импульсы пионов отличались меньше чем на 10%. Она содержит 224 события, набранных при

магнитном поле 14,93 кГс, и 464 события, набранных при магнитном поле 24,70 кГс.

Углы разлета пионов в событиях второй группы должны находиться в узкой области  $0,56^\circ$  вблизи минимального угла разлета, равного  $\sim 150^\circ$ , однако процессы с излучением мягких фотонов и конечное разрешение детектора по углам увеличивают эту область.

Минимальный угол разлета соответствует случаю, когда пионы в системе центра инерции каона разлетаются перпендикулярно направлению

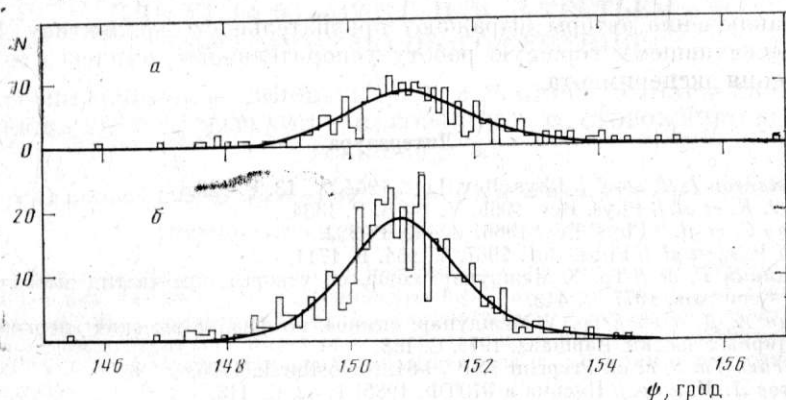


Рис. 4. Распределение событий второй группы по углам разлета пионов. Сплошная кривая — расчет. *a* —  $M=497,719$  МэВ,  $H=14,93$  кГс; *b* —  $M=497,657$  МэВ,  $H=24,70$  кГс

его движения. Масса каона  $M$  связана с минимальным углом  $\psi_0$  соотношением

$$M = [E_K^2 \sin^2(\psi_0/2) + 4m_\pi^2 \cos^2(\psi_0/2)]^{1/2}.$$

Зная массу пиона  $m_\pi$ , 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  $\psi_0$ , можно определить массу нейтрального каона.

Статистическую ошибку при определении массы таким способом можно оценить как

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

где  $N$  — количество отобранных событий с углом разлета пионов, близким к предельному, а  $\sigma_\psi$  — разрешение установки по углу разлета пионов, которое составляет в эксперименте величину  $1,1^\circ$ . Такая оценка дает  $\approx 60$  и  $\approx 40$  кэВ для событий, отобранных при различных магнитных полях в детекторе.

Из экспериментально полученных распределений по углам разлета пионов событий второй группы, представленных на рис. 4, методом максимального правдоподобия получено  $M=497,719 \pm 0,068$  МэВ для событий, набранных при магнитном поле 14,93 кГс, и  $M=497,657 \pm 0,048$  МэВ для событий, набранных при магнитном поле 24,70 кГс.

Приведенная ошибка складывается из статистической ошибки (62 и 41 кэВ для полей 14,93 и 24,70 кГс соответственно) и ошибок, связанных с учетом оптических искажений, сноса искр в скрещенных электрическом и магнитном полях, неточности определения энергии пучка и учета радиационных поправок. Приведенное на рис. 4 расчетное распределение по углам разлета пионов в событиях второй группы получено моделированием методом Монте-Карло с учетом свойств детектора.

Значения масс, полученные в приведенных выше четырех измерениях, хорошо согласуются друг с другом и по ним с учетом корреляции между ошибками найдено  $M=497,661 \pm 0,033$  МэВ.

Это значение согласуется с результатом  $M=497,742 \pm 0,085$  МэВ, приведенным в нашей предыдущей работе [8], с усредненной величиной  $M=$

$=497,67 \pm 0,13$  МэВ, полученной по результатам работ других авторов [1—4, 12—15], а также с современным средним [16]  $M=497,718 \pm 0,069$  МэВ, куда включен результат [8].

Если использовать среднемировое значение массы заряженного каона  $593,667 \pm 0,014$  МэВ [16] и новое усредненное значение массы нейтрального каона  $M=497,672 \pm 0,030$  МэВ, найденное по результатам настоящей работы и всех предыдущих [1—4, 8, 12—15], то можно получить величину разности масс нейтрального и заряженного каона  $\Delta M=4,005 \pm 0,033$  МэВ.

В заключение авторы выражают признательность коллективу ВЭПП-2М, обеспечившему хорошую работу ускорительного комплекса во время проведения эксперимента.

### Литература

1. Christenson J. H. et al. // Phys. Rev. Lett. 1964. V. 13. P. 138.
2. Kim J. K. et al. // Phys. Rev. 1965. V. 140B. P. 1334.
3. Baltay C. et al. // Phys. Rev. 1966. V. 142. P. 932.
4. Fitch V. L. et al. // Phys. Rev. 1967. V. 164. P. 1711.
5. Тумайкин Г. М. // Тр. X Междунар. конф. по ускорителям частиц высоких энергий. Серпухов, 1977. С. 443.
6. Букин А. Д. и др. // Тр. V Междунар. симпоз. по физике высоких энергий и элементарных частиц. Варшава, 1975. С. 138.
7. Derbenev Ya. S. et al. Preprint INP 76-64. Novosibirsk, 1976.
8. Барков Л. М. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 42. С. 113.
9. Barkov L. M. et al. // Nucl. Instr. and Meth. 1983. V. 204. P. 379.
10. Баклаков Б. А. и др. // Тр. VII Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1980. С. 338.
11. Азимов Я. И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 21. С. 378.
12. Rosenfeld A. H. et al. // Phys. Rev. Lett. 1959. V. 2. P. 110.
13. Crawford F. S. et al. // Phys. Rev. Lett. 1959. V. 2. P. 112.
14. Burnstein R. A. et al. // Phys. Rev. 1965. V. 138B. P. 895.
15. Hill D. G. et al. // Phys. Rev. 1968. V. 168. P. 1534.
16. Part. Data Group. Rev. Part. Prop. // Phys. Lett. 1986. V. 170B.

### THE PRECISION NEUTRAL KAON MASS MEASUREMENT

BARKOV L. M., VASSERMAN I. B., VOROB'EV P. V., IVANOV P. M., KEZERASHVILI G. Ya., KOPI I. A., LYSENKO A. P., MIKHAILICHENKO A. A., OKHAPKIN V. S., PEREVEDENTSEV E. A., POLUNIN A. A., REDIN S. I., RYSKULOV N. M., SKRINSKY A. N., SMAKHTIN V. P., SOLODOV E. P., KHAZIN B. I., SHATUNOV Yu. M., SHEKHTMAN A. I.

The experiment on the neutral kaon mass measurement at VEPP-2M storage ring is described. Neutral kaons from the reaction  $e^+e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0$  were detected via  $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  decay with the help of the optical cylindrical spark chamber of the cryogenic magnetic detector. Average energy of the initial particles in the storage ring was determined by the resonance depolarization method. The momenta and the emission angles of the pions were also measured. The value of the neutral kaon mass is found to be  $497.661 \pm 0.033$  MeV by the analysis of 3713 events. This result allows to determine the  $(K^0) - (K^\pm)$  mass difference with better accuracy.