

*Е. А. Гудзовский, В. Д. Кекелидзе,
Д. Т. Мадигожин, Ю. К. Потребеников*

Последние результаты и перспективы программы каонных распадов

В 2003–2004 гг. в эксперименте NA48/2 [1] с участием ОИЯИ накоплена в сеансе ускорителя SPS ЦЕРН наибольшая в мире статистика распадов заряженных каонов. Главной целью этого эксперимента был поиск прямого CP-нарушения в распадах $K^\pm \rightarrow 3\pi$ [2]. В сеансах 2007 и 2008 гг. в эксперименте NA62 (фаза R_K) набраны данные с применением модифицированной пучковой линии. Его главной целью было изменение отношения вероятностей распадов $K^\pm \rightarrow l^\pm \nu$ ($l = e, \mu$). Большая статистика в обоих экспериментах позволила также изучить несколько редких мод распадов K^\pm . Основная стадия эксперимента NA62, которая предполагает начало получения физических данных в 2014 г., имеет целью измерение вероятности распада $K^\pm \rightarrow \pi^+ \nu \nu$. Последние результаты и перспективы этих экспериментов обсуждаются ниже.

*E. A. Goudzovski, V. D. Kekelidze,
D. T. Madigozhin, Yu. K. Potrebenikov*

Recent Results and Prospects of Kaon Decay Programme

In 2003–2004, the NA48/2 experiment [1] with JINR participation has collected at the CERN SPS the world's largest statistics of charged kaon decays. Its main goal was the searching for direct CP violation in the $K^\pm \rightarrow 3\pi$ decays [2]. In 2007–2008, the NA62 experiment (R_K phase) has collected a data sample with the modified beam line. Its main goal was to measure the ratio of the rates of the $K^\pm \rightarrow l^\pm \nu$ decays ($l = e, \mu$). The large statistics in both experiments has allowed the studies of a range of rare K^\pm decay modes. The main stage of the NA62 experiment, expected to start physics data taking in 2014, aims at measuring the $K^\pm \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ decay rate. The recent results and prospects of these experiments are discussed here.

Decays of pseudoscalar mesons to light leptons are suppressed in the Standard Model (SM). Ratios of leptonic decay rates of the same meson can be computed very precisely. In particular, there is the SM prediction for ratio $R_K = \Gamma(K_{e2})/\Gamma(K_{\mu2}) = (2.477 \pm 0.001) \cdot 10^{-5}$. Within extensions of the SM involving two Higgs doublets, R_K is sensitive to lepton flavour violating effects induced by loop processes with the charged Higgs boson exchange [4].

The analysis strategy is based on counting the numbers of reconstructed K_{e2} and $K_{\mu2}$ candidates collected concurrently, taking into account the

В Стандартной модели (СМ) распады псевдоскалярных мезонов на легкие лептоны сильно подавлены. Отношения вероятностей лептонных распадов одних и тех же мезонов могут быть вычислены очень точно. В частности, есть предсказание СМ [3] для отношения $R_K = \Gamma(K_{e2})/\Gamma(K_{\mu2}) = (2,477 \pm 0,001) \cdot 10^{-5}$. В рамках расширения СМ, включающего два дублета Хиггса, величина R_K оказывается чувствительна к эффектам нарушения лептонных чисел, вызванным петлями с обменом заряженным бозоном Хиггса [4].

Стратегия анализа была основана на подсчете числа реконструированных кандидатов K_{e2} и $K_{\mu2}$, набираемых одновременно, с учетом поправок на акцептансы, фон, эффективности триггера и идентификации лептонов. Исследование выполнено независимо в 10 бинах реконструированного импульса лептона для четырех наборов данных с разными условиями регистрации событий.

Для различения распадов K_{e2} и $K_{\mu2}$ использовался критерий недостающей массы, а также отношение E/p между энергывыделением в электромагнитном калориметре и импульсом трека, измеренным с помощью спектрометра. Количество отобранных кандидатов в

распады K_{e2} и $K_{\mu2}$ — 145958 и $4,2817 \cdot 10^7$ соответственно (последнее количество намеренно подавлено на уровне триггера). Вклад фона в ансамбль распадов K_{e2} составил $(10,95 \pm 0,27) \%$, он оценивался путем моделирования методом Монте-Карло, а по мере возможности — и прямыми измерениями. В систематическую ошибку вошли неопределенности фона, чистоты гелия в емкости спектрометра (которая влияет на эффективность детектирования через тормозное излучение и рассеяние), моделирования пучков, выстроенности спектрометра, идентификации частиц и эффективности триггера.

Объединенный результат измерения на основе 40 независимых ансамблей с учетом корреляций между их систематическими ошибками составил $R_K = (2,488 \pm 0,007(\text{stat.}) \pm 0,007(\text{syst.})) \cdot 10^{-5} = (2,488 \pm 0,010) \cdot 10^{-5}$ [5, 6]. Результат соответствует ожиданиям СМ, а достигнутая точность измерения теперь определяет точность мирового результата.

Измерения радиационных нелептонных распадов каонов представляют собой хорошую проверку киральной пертурбативной теории (КПТ) в процессах низких энергий. В рамках КПТ вероятность распада $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \gamma \gamma$

corrections related to acceptance, background, trigger and lepton identification efficiency. The study is performed independently in 10 bins of reconstructed lepton momentum for 4 samples with different data taking conditions.

To distinguish K_{e2} and $K_{\mu2}$ decays, missing mass criterion is used as well as the ratio E/p of energy deposit in the electromagnetic calorimeter to track momentum measured by the spectrometer. The numbers of selected K_{e2} and $K_{\mu2}$ candidates are 145958 and $4.2817 \cdot 10^7$ (the latter pre-scaled at trigger level). The background contamination in the K_{e2} sample has been estimated by MC simulations and, where possible, direct measurements to be $(10.95 \pm 0.27)\%$. The contributions to the systematic uncertainty of the result include the uncertainties on the backgrounds, helium purity in the spectrometer tank (which influences the detection efficiency via bremsstrahlung and scattering), beam simulation, spectrometer alignment, particle identification and trigger efficiency. The result of the measurement, combined over the 40 independent samples taking into account correlations between the systematic errors, is $R_K = (2.488 \pm 0.007(\text{stat.}) \pm 0.007(\text{syst.})) \cdot 10^{-5} = (2.488 \pm 0.010) \cdot 10^{-5}$ [5, 6]. The result is consistent with the Standard Model expectation, and the achieved precision dominates the world average.

Measurements of radiative nonleptonic kaon decays provide good tests for the Chiral Perturbation Theory (ChPT) in the low-energy processes. In the ChPT framework, the $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \gamma \gamma$ decay receives two noninterfering contributions at lowest nontrivial order $O(p^4)$: the pion and kaon loop amplitude depending on an unknown $O(1)$ constant \widehat{C} , representing the total contribution of the counter-terms, and the pole amplitude [7].

New measurements of this decay have been performed using data collected during a 3-day special NA48/2 run in 2004 with 60 GeV/c K^\pm beams, and a 3-month NA62 run in 2007 with 74 GeV/c K^\pm beams. Signal events are selected in the region $z = (m_{\gamma\gamma}/m_K)^2 > 0.2$ to reject the $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ background peaking at $z = 0.075$. 147 (175) decays candidates are observed in the 2004 (2007) data set, with backgrounds contaminations of 12% (7%) from $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 (\pi^0) \gamma$ decays with merged photon clusters in the electromagnetic calorimeter.

The values of the \widehat{C} parameter in the framework of the ChPT $O(p^4)$ and $O(p^6)$ parameterizations according to [8] have been measured by performing likelihood fits to the data. The preliminary combined results of the fits based on 2004 and 2007 runs data are in agreement with the earlier BNL E787 ones [9]: for $O(p^4)$, $\widehat{C} = 1.56 \pm 0.23$; for $O(p^6)$, $\widehat{C} = 2.00 \pm 0.26$; for $O(p^6)$, BR = $(1.01 \pm 0.06) \cdot 10^{-6}$.

описывается двумя неинтерферирующими вкладками в низшем нетривиальном порядке теории $O(p^4)$, а именно — пионной и каонной петлевыми амплитудами, зависящими от неизвестной константы \widehat{C} порядка $O(1)$, которая представляет собой полный вклад контрчленов, и полюсной амплитуды [7].

Новые измерения этого распада были выполнены на основе данных, набранных в ходе 3-дневного специального сеанса NA48/2 в 2004 г. с пучками K^\pm , имеющими средний импульс 60 ГэВ/с, и в ходе 3-месячного сеанса NA62 2007 г. со средним импульсом пучков 74 ГэВ/с. События сигнала отбирались в области $z = (m_{\gamma\gamma}/m_K)^2 > 0,2$, чтобы отбросить фон от $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$, имеющий пик при $z = 0,075$. При анализе данных сеансов 2004 (2007) г. было обнаружено 147 (175) кандидатов этого распада, с фоном на уровне 12% (7%), в основном от распадов $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 (\pi^0) \gamma$ с наложенными фотонными кластерами в электромагнитном калориметре.

Значения параметра \widehat{C} в рамках параметризаций КПП порядка $O(p^4)$ и $O(p^6)$ были измерены путем фитирования данных методом наибольшего правдоподобия [8]. Предварительный объединенный резуль-

тат фитирования данных, набранных в 2004 и 2007 гг., находится в согласии с ранее полученным результатом эксперимента BNL E787 [9]: для фита $O(p^4)$ $\widehat{C} = (1,56 \pm 0,23)$; для фита $O(p^6)$ $\widehat{C} = 2,00 \pm 0,26$; для фита $O(p^6)$ BR = $(1,01 \pm 0,06) \cdot 10^{-6}$.

Главная цель эксперимента NA62 в ЦЕРН [10] — измерение вероятности распада $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \nu \nu$ на уровне точности 10%, что будет представлять собой значимый тест СМ. Ожидается, что в эксперименте будет зарегистрировано около 100 событий сигнала за два года набора данных, при удержании систематических неопределенностей и фона также ниже 10%.

Будет использована техника регистрации распадов на лету. Требования оптимизации акцептанса предопределили выбор пучка заряженных каонов со средним импульсом 75 ГэВ/с и с разбросом импульса в 1%. Сигнатура сигнала представляет собой один трек в конечном состоянии, соединенный с треком K^\pm в пучке. Поток частиц, наблюдаемый детекторами, будет иметь интенсивность около 10 МГц, главным образом благодаря распадам K^\pm . Фон создается каонными распадами с одним реконструированным треком в конечном со-

The main goal of the NA62 experiment at CERN [10] is the measurement of the $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \nu \nu$ decay rate at the 10% precision level, which would constitute a significant test of the SM. The experiment is expected to collect about 100 signal events in two years of data taking, keeping the systematic uncertainties and backgrounds below 10%.

The decay in flight technique will be used; optimisation of the signal acceptance drives the choice of a 75 GeV/c charged kaon beam with 1% momentum bite. The signal signature is one track in the final state matched to one K^\pm track in the beam. The rate seen by the detector downstream is about 10 MHz, mainly due to K^\pm decays. Backgrounds come from kaon decays with a single reconstructed track in the final state, including accidentally matched upstream and downstream tracks.

The main NA62 subdetectors are: a differential Cherenkov counter on the beam line to identify the K^\pm in the beam; a silicon pixel beam tracker; guard-ring counters surrounding the beam tracker to veto catastrophic interactions of particles; a spectrometer composed of 4 straw chambers operating in vacuum; a RICH detector to distinguish pions and muons; a scintillator hodoscope; and a muon veto detector. The photon veto detectors will include a series of annular lead glass calorimeters surrounding the decay and detector volume, the NA48 electromagnetic LKr

calorimeter, and two small-angle calorimeters to provide hermetic coverage for photons emitted at close-to-zero angle to the beam.

JINR contribution to the NA62 experiment includes essential participation in the R&D, design and simulation of the spectrometer, which is based on the straw detectors that are capable of working in vacuum. Currently a JINR group is responsible for the straw mass production and testing, as well as for the assembly of the spectrometer straw modules both at CERN and JINR technological lines. Each line includes vacuum stand for straw module leak test, assembling tooling, measurement devices for straw positioning and pretension measurement, devices for wiring and wire pretension measurement, and for the electrical tests.

More than 4000 straws 2.6 m long have been produced and tested on the special production line at VBLHEP. Two straw modules have been assembled and tested at CERN; all 896 straws have been installed and glued into the third module at JINR (see photo). The first straw module was tested during the 2012 experimental run at CERN SPS. It has demonstrated a full compliance with the experimental specifications.

стоянии, включая случайно совпадающие по времени треки от частицы пучка и от продукта распада.

Главными субдетекторами NA62 являются: дифференциальный черенковский счетчик на пучковой линии для идентификации K^+ в пучке; кремниевый пиксельный трекер пучка; кольцевые счетчики, окружающие трекер пучка для исключения «катастрофических» взаимодействий частиц; спектрометр, состоящий из четырех камер на тонкостенных дрейфовых трубках (строу-трубках), работающих в вакууме; детектор RICH для отделения пионов от мюонов; сцинтилляционный годоскоп; мюонное вето. Детекторы фотонного вето будут включать ряд кольцевых калориметров из свинцового стекла, окружающих область распадов, и детекторов, электромагнитный калориметр LK τ эксперимента NA48 и два малоугловых калориметра для обеспечения герметичного покрытия для фотонов, идущих под углом, близким к нулю по отношению к пучку.

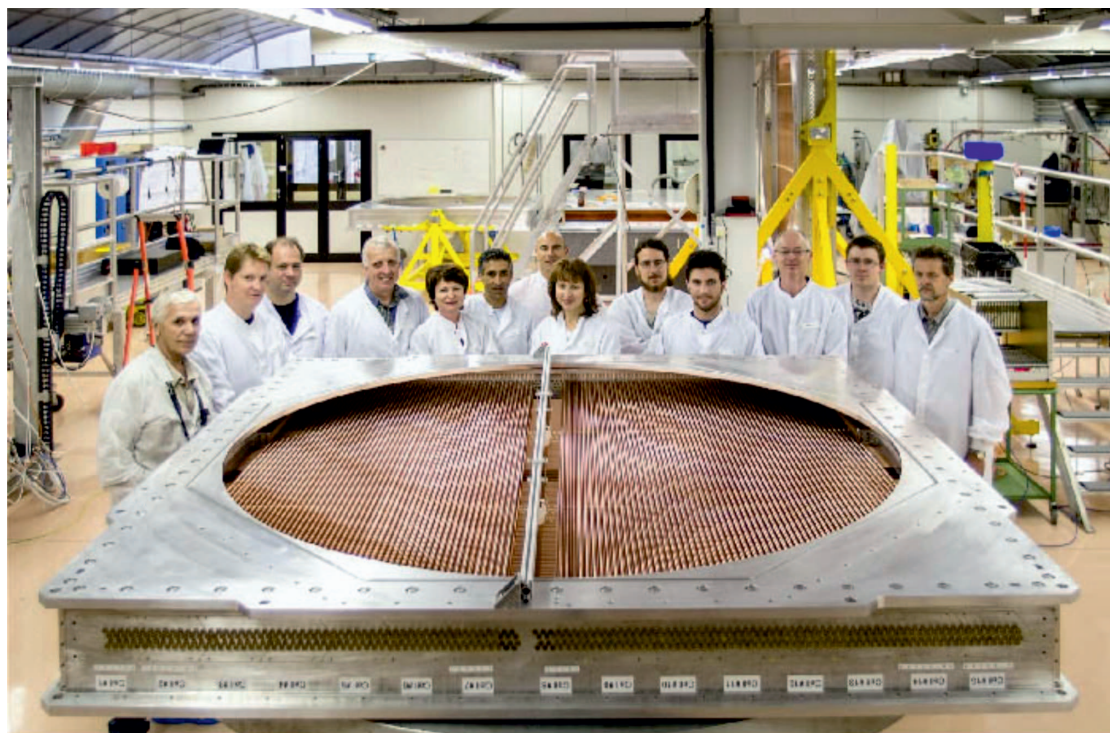
Вклад ОИЯИ в эксперимент NA62 включает существенное участие в исследованиях, разработке, дизайне и моделировании спектрометра, основанного на строу-трубках, способных работать в вакууме. В настоящее время группа ОИЯИ отвечает за массовое производство и тестирование строу-трубок, а также за сборку модулей спектрометра на технологических линиях в ЦЕРН и в ОИЯИ. Каждая из этих линий включает вакуумный стенд для тестирования модулей на течи, сборочную оснастку, устройства для измерения преднатяжения

строу и их позиционирования, устройства для натяжения проволок и измерения их натяжения, а также стенд для электрических тестов.

Более 4000 строу-трубок длиной по 2,6 м произведены и протестированы на специальной производственной линии в ЛФВЭ. Два модуля спектрометра собраны и исследованы в ЦЕРН, все 896 строу-трубок вставлены и вклеены в третий модуль в ОИЯИ (см. фото). Первый модуль был протестирован в ходе экспериментального сеанса 2012 г. на SPS в ЦЕРН. Полученные результаты показали его полное соответствие экспериментальным спецификациям.

Список литературы / References

1. *Fanti V. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 2007. V.574. P.433.
2. *Batley R. et al.* // Eur. Phys. J. C. 2007. V.52. P.875.
3. *Cirigliano V., Rosell I.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V.99. P.231801.
4. *Masiero A., Paradisi P., Petronzio R.* // Phys. Rev. D. 2006. V.74. P.011701; JHEP. 2008. V.0811. P.042.
5. *Lazzeroni C. et al.* // Phys. Lett. B. 2011. V.698. P.105.
6. *Lazzeroni C. et al.* // Phys. Lett. B. 2013. V.719. P.326.
7. *Ecker G., Pich A., de Rafael E.* // Nucl. Phys. B. 1988. V.303. P.665.
8. *D'Ambrosio G., Portol'es J.* // Phys. Lett. B. 1996. V.386. P.403.
9. *Goudzovski E.* arXiv:1208.2885v1 [hep-ex] (2012).
10. *Ambrosino F. et al.* CERN-SPSC-2005-013, 2005.



Модуль спектрометра NA62, собранный в ЦЕРН

The module of the NA62 spectrometer, assembled at CERN