

В. Д. Кекелидзе, Ю. К. Потребеников, Д. Т. Мадигожин

Участие ОИЯИ в эксперименте NA62

Эксперимент NA62 в ЦЕРН на выведенном пучке ускорителя SPS посвящен изучению очень редкого распада заряженного каона на заряженный пион, нейтрино и антинейтрино [1], вероятность которого напрямую связана с параметрами Стандартной модели, определяющими нарушения CP-симметрии нашего мира. До этого эксперимента вся мировая статистика насчитывала всего 7 таких событий, зарегистрированных в экспериментах E787 и E949 [2]. Задачей NA62 является измерение вероятности этого распада с 10%-й точностью, что требует регистрации порядка 100 событий при малом уровне фона.

В рамках этого эксперимента две группы (из ОИЯИ и ЦЕРН) совместно отвечают за разработку, производство, калибровку и работу магнитного спектрометра на основе строу-трубок (от англ. straw — «соломина»), работающих в вакууме [3]. С июня 2015 г. стабильно работающий спектрометр является основным детектором NA62, который предоставляет

ключевую информацию о заряженных треках продуктов каонных распадов.

Физические данные NA62 регистрировались в ходе сеансов 2016–2018 гг. В текущем и следующем году установка NA62 не получит пучок в связи с запланированной в ЦЕРН большой модернизацией адронного коллайдера LHC, с которым теперь связан SPS (так называемое второе длительное выключение LHC). Но в 2021–2022 гг. планируется завершить набор всей необходимой для NA62 статистики распадов.

Несмотря на стабильную работу спектрометра NA62, прошлый год для группы ОИЯИ в NA62 оказался весьма загруженным, поскольку приходилось совмещать участие в длинном сеансе набора данных и контроль за работой спектрометра с разворачиванием физического анализа на довольно широком фронте, что потребовало подключения к работе новых молодых сотрудников.

V. D. Kekelidze, Yu. K. Potrebenikov, D. T. Madigozhin

Participation of JINR in the NA62 Experiment

The NA62 experiment at CERN on the extracted beam from the SPS accelerator is devoted to study of the charged-kaon very rare decay to charged pion, neutrino and antineutrino [1]. Its probability is directly related to the parameters of the Standard Model determining CP-symmetry breaking in our world. Prior to this experiment, entire world statistics of such events was only 7 pieces, registered by the E787 and E949 experiments [2]. The goal of NA62 is to measure this decay probability with a 10% accuracy, which requires registration of about 100 events with a low background level.

In this experiment, two groups (from JINR and CERN) are jointly responsible for the development, production, calibration and operation of the straw-based magnetic spectrometer working in vacuum [3]. Since June 2015, the stably operating spectrometer has been the main detector of NA62, which provides key information on the charged

tracks of kaon decay products. NA62 physical data were recorded during the runs of 2016–2018. This year and next, the NA62 setup will not obtain a beam due to the planned large modernization of the LHC collider, with which the SPS is currently connected (so-called “LHC second long shutdown”). But in 2021–2022, it is planned to complete the collection of all the statistics required for NA62.

Despite the stable operation of the NA62 spectrometer, the last year for the JINR group in NA62 was very busy, as it was necessary to combine the participation in the long data taking period and monitoring of the spectrometer with the start of physical analysis on a rather broad front, which required the introduction of new young staff.

In 2018, the experimental run and data taking began in April and ended on 12 November. In the course of this run, 11 experts from JINR participated in 93 shifts. During the whole year of 2018, the JINR team provided one of

Экспериментальный сеанс и набор данных 2018 г. начался в апреле и завершился 12 ноября. В ходе этого сеанса 11 экспертов из ОИЯИ участвовали в 93 сменах. В течение всего года от группы ОИЯИ был задействован один из двух главных экспертов, ответственных за работу спектрометра, — С. Н. Шкаровский, который является также главным специалистом по системе управления спектрометром.

В 2016 г. в группе ОИЯИ была разработана специализированная система мониторинга спектрометра для обеспечения стабильности времени срабатывания строу-каналов. Результаты работы этой системы использовались для корректировки прошивки считывающей платы строу в начале сеанса, что привело к устранению «скачков» зарегистрированного времени отклика, обнаруженных в 2016 г. В 2017 и 2018 гг. во время набора данных эта система непрерывно проверяла каждый записанный сброс пучка и немедленно информировала о любых существенных смещениях регистрируемого времени.

Для мониторинга газовой смеси во время сбора данных была сконструирована и установлена система контроля газового усиления, которая состоит из эталонных строу-трубок, считывающей электроники и радиоактивных источников. Проведено исследо-

вание точных позиций строу-трубок и стабильности их геометрии на основе экспериментальных данных. Результаты будут использованы для настройки модели детектора при проведении моделирования методом Монте-Карло.

В 2017 и 2018 гг. при активном участии группы ОИЯИ наряду с анализом результатов NA62 продолжался анализ экспериментальных данных предшествующего эксперимента NA48/2. Выполнен поиск рождения гипотетического тяжелого нейтрального лептона в распадах K^+ на основе данных NA62, записанных в сеансе 2015 г. [4]. Уточнены верхние ограничения на квадраты матричных элементов смешивания, которые определяют меру влияния гипотетической частицы на наш мир.

Кроме того, опубликована статья по полуплептоным распадам заряженных каонов на основе данных эксперимента NA48/2 [5]. В ней представлены данные измерений формфакторов этих распадов, зарегистрированных в 2004 г. Точность этих параметров заметно повышена, что вносит вклад в точность измерений целого ряда характеристик СМ.

Вышла статья по результатам анализа ранее не наблюдавшегося редкого распада $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$ [6]. Результаты основаны на статистике $1,7 \cdot 10^{11}$ заряженных

the two main experts responsible for the operation of the spectrometer — Sergey Shkarovsky, who is also the main specialist on the spectrometer control system.

Back in 2016, a special spectrometer monitoring system was developed in the JINR group to ensure the stability of the straw-channel response time. The results of this system operation were used to correct the readout firmware at the beginning of the run, which led to the elimination of the “jumps” in the recorded response time detected in 2016. In 2017 and 2018, during the data acquisition, this system continuously checked each recorded beam burst and immediately informed about any significant shifts in the recorded time.

To monitor the gas mixture during the data collection, a gas amplification control system was constructed and installed. It consists of reference straw tubes, readout electronics and radioactive sources. A study based on experimental data was performed on the exact positions of straw tubes and the stability of their geometry. The results will be used for the tuning of the detector model for Monte Carlo simulation.

In 2017 and 2018, with the active participation of the JINR group, along with the analysis of the NA62 results,

the analysis of the previous experiment NA48/2 data was continued. A search was made for the production of a hypothetical heavy neutral lepton in the K^+ decays based on the NA62 data recorded as early as 2015 [4]. The upper limits on the square of the mixing matrix element, defining the influence of a hypothetical particle on our world, were improved.

In addition, an article was published on semileptonic decays of charged kaons, based on data from the NA48/2 experiment [5]. It presents a measurement of the form factors of these decays recorded in 2004. The precision of the parameters is noticeably improved, which contributes some characteristics to the measurement accuracy of the Standard Model.

An article was published on the analysis results on a previously unobserved rare decay $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$ [6]. The results are based on $1.7 \cdot 10^{11}$ charged kaon decays recorded in 2003–2004 in the NA48/2 experiment. The study of selected 4919 candidates with a background of 4.9% made it possible to determine the partial decay width $BR = (4.24 \pm 0.14) \cdot 10^{-6}$.

This year, the first NA62 result for the $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ decay based on very small statistics recorded in 2016 was

распадов каонов, зарегистрированных в 2003–2004 гг. в эксперименте NA48/2. Исследование отобранных 4919 кандидатов с фоном на уровне 4,9% позволило определить парциальную ширину распада $BR = (4,24 \pm 0,14) \cdot 10^{-6}$.

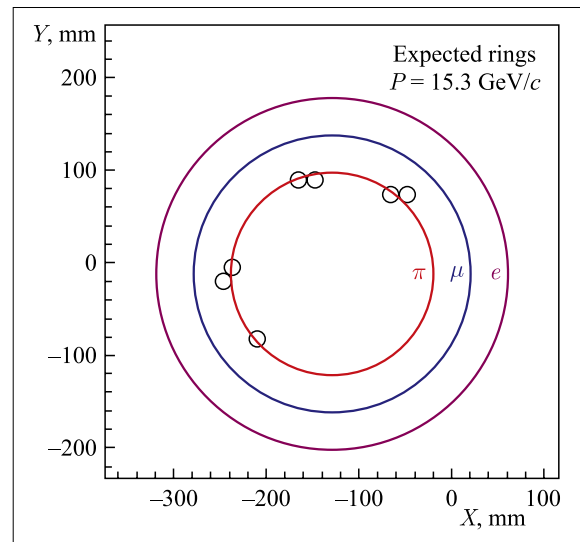
В 2019 г. опубликован первый результат NA62 по поиску распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ на основе совсем небольшой статистики, записанной в 2016 г. [7]. Чувствительность этого набора данных к одному событию равна $3,15 \cdot 10^{-10}$, что соответствует 0,267 событий, ожидаемых на основе предсказания СМ. Обнаружен один сигнальный кандидат (см. рисунок) при ожидаемом фоне 0,152 события. Это позволяет измерить верхний предел парциальной ширины распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$, равный $14 \cdot 10^{-10}$ с уровнем достоверности 95%.

Сигнал в черенковском спектрометре NA62 от заряженного пиона из события-кандидата в распады $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ [7]: маленькие кружки — координаты черенковских фотонов; большое внутреннее кольцо — ожидаемый отклик от заряженного пиона; два внешних кольца — мюон и электрон при данном импульсе заряженной частицы P

Signal in the NA62 Cherenkov spectrometer from a charged pion of a $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ candidate event [7]. Small circles show the coordinates of the Cherenkov photons, the large inner ring represents the expected response from the charged pion, the two outer rings correspond to the muon and the electron for a given momentum P of the charged particle

Помимо публикации завершенных результатов группа ОИЯИ наращивает свое участие в текущем физическом анализе для будущих публикаций. Например, близок к завершению анализ данных эксперимента NA48/2 по исследованию редкого распада $K_{\mu 4}^{00}$, который никогда не наблюдался ранее.

Кроме того, на основе данных эксперимента NA62 в Дубне проводится анализ сразу пяти редких мод распада заряженного каона: $K^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \nu$, $K^+ \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \nu$, $K^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ \nu$, $K^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu$ и $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu$. Первый из них наблюдался впервые, а остальные мало изучены, и их вероятности измерены с недостаточной точностью. Наконец, в группе ОИЯИ начался анализ распада $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$ на основе данных NA62 с целью улучшения точности знаний об этом распаде и для изучения методических проблем, свя-



published [7]. The sensitivity of this data set to a single event is $3.15 \cdot 10^{-10}$, which corresponds to 0.267 events expected based on the prediction of the Standard Model. One signal candidate has been detected (figure), with an expected background of 0.152 events. This makes it possible to measure the upper limit of the partial decay width of $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$, equal to $14 \cdot 10^{-10}$ with a 95% confidence level.

In addition to the publication of the completed results, JINR group is increasing its participation in the current physical analysis for the future publications. For example, the analysis of NA48/2 data to study the rare $K_{\mu 4}^{00}$ decay, which has never been observed before, is close to completion.

In addition, based on the data of the NA62 experiment in Dubna, an analysis of five rare modes of charged kaon decay is ongoing: $K^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \nu$, $K^+ \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \nu$, $K^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ \nu$, $K^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu$ and $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu$. The first of

them has never been observed before, while the rest have been little studied and their probabilities have so far been measured with insufficient accuracy.

Finally, an analysis of the decay $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$ began on the basis of the NA62 data in the JINR group in order to improve the accuracy of knowledge about this decay and to study the methodical problems associated with the photon energy measurement in the calorimeter used. By the way, this electron–photon calorimeter is still preserved from the NA48 setup, and it was created in the nineties with the participation of JINR.

In parallel with the experimental work, methodological studies are continued. So, last year an article was published on the mechanical stability of straw tubes under pressure [8]. This stability was studied on a special test bench and described by a rarely used formula. It was found that it is necessary to control the pre-tension of the straw tube in order to avoid bending the straw under internal

занных с измерением энергии фотонов в используемом калориметре. Кстати, этот электрон-фотонный калориметр сохранился от установки NA48, он был создан в 1990-х гг. при участии ОИЯИ.

Параллельно с экспериментальными исследованиями продолжаются и методические разработки. Так, в 2018 г. была опубликована статья по механической устойчивости строу-трубки под давлением [8]. Эта устойчивость была изучена на специальном испытательном стенде и описана редко применяемой формулой. Обнаружено, что необходимо контролировать предварительное натяжение строу-трубки, чтобы избежать изгиба строу под внутренним избыточным давлением в вакууме. Кроме того, разработана и защищена патентом конструкция энергонезависимого защитного клапана для дрейфовой камеры, работающей в вакууме.

За три последних года участниками группы ОИЯИ в NA62 было сделано 14 докладов на международных конференциях, где были представлены полученные результаты. За серию публикаций по эксперименту NA62, посвященную разработке и изготовлению спектрометра, этой группой была получена первая премия ОИЯИ за 2017 г.

pressure in vacuum. In addition, the design of a non-volatile protective valve for a drift chamber operating in vacuum was developed and protected by a patent.

Over the last three years, there were 14 presentations made by representatives of the JINR group in NA62 at international conferences, where the obtained results were presented. This group received the JINR First Prize for 2017 for a series of publications on the NA62 experiment, dedicated to the development and manufacture of its spectrometer.

In 2019, the physical analysis of the accumulated data will be continued. In addition, during a long LHC shutdown, the operation of the NA62 spectrometer will be thoroughly checked and its calibration will be improved. The development of the software necessary both for its adjustment and calibration, and for the analysis of experimental data will be continued. There is still a lot of work, but NA62 is confidently moving towards the planned result — measuring the probability of the super rare decay with a 10% accuracy.

В 2019 г. будет продолжен физический анализ накопленных данных. Кроме того, во время длительного выключения LHC будет тщательно проверена работа спектрометра NA62 и улучшена его калибровка, а также продолжено развитие программного обеспечения, необходимого как для его настройки и калибровки, так и для анализа экспериментальных данных. Работы еще много, но NA62 уверенно движется к запланированному результату — измерению вероятности сверхредкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ с 10%-й точностью.

Список литературы / References

1. *Ambrosino F. et al. (NA62 Collab.)*. Proposal to Measure $K \rightarrow \pi \nu \nu$ Rare Decay at the CERN SPS. CERN-SPSC-2005-013. 2005.
2. *Artamonov A. V. et al. (E949 Collab.)*. New Measurement of the $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ Branching Ratio // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. P. 191802.
3. *Azorskiy N. et al.* A Drift Chamber with a New Type of Straws for Operation in Vacuum // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 824. P. 569–570.
4. *Lazzeroni C. et al.* Search for Heavy Neutrinos in $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ Decays // *Phys. Lett. B.* 2017. V. 772. P. 712–718.
5. *Lazzeroni C. et al. (NA48/2 Collab.)*. Measurement of the Form Factors of Charged Kaon Semileptonic Decays // *JHEP.* 2018. V. 1810. P. 150.
6. *Batley J. R. et al. (NA48/2 Collab.)*. First Observation and Study of the $K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \pi^0 e^+ e^-$ Decay // *Phys. Lett. B.* 2019. V. 788. P. 552–561.
7. *Gil E. C. et al. (NA62 Collab.)*. First Search for $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ Using the Decay-in-Flight Technique // *Ibid.* V. 791. P. 156–166.
8. *Glonti L. et al.* Longitudinal Tension and Mechanical Stability of a Pressurized Straw Tube // *Instruments.* 2018. V. 2, No. 4. P. 27.