

графии микроскопа Olympus BX63 при 40-кратном увеличении различимы входящие следы ядер ксенона и образовавшиеся звезды (рис. 1). Программы микроскопа позволяют провести прямой счет прохождения ядер в ТТД и определить параметры пучка (рис. 2 и 3). В облучении CR-39 и майлара от инжектора на станции СОЧИ была проверена однородность пучка ионов ксенона с энергией 3,2 МэВ/нуклон (рис. 4), важная при тестировании электронных компонентов космического применения. Таким образом, компьютеризованная микроскопия открывает перспективу применения ядерных трековых методик в условиях, где оказывается затруднительным применение электронных методов.

of the flow of nuclei in NTE where the track uniformity is critical. The exposed layers were developed in the VBLHEP chemical group, and SSTD were processed at FLNR. In a macrophotograph of an Olympus BX63 microscope at 40x magnification, incoming tracks of xenon nuclei and formed stars are distinguishable (Fig. 1). The programs of the microscope make it possible to directly count the passage of nuclei in SSTD and determine the beam parameters (Figs. 2 and 3). In exposing CR-39 and Mylar from the injector at the SOCHI station, the homogeneity of xenon ion beam of 3.2 MeV/nucleon was checked (Fig. 4), which is important when testing electronic components for space applications. Thus, computerized microscopy opens up the prospect of using nuclear track techniques in conditions where the use of electronic methods is difficult.

Д. Т. Мадигожин

Статус эксперимента NA62

Наиболее важные экспериментальные стратегии изучения физических основ нашего мира связаны с достижением разных технологических пределов. Самый очевидный из них — это предельно высокие энергии столкновений частиц на коллайдере LHC в ЦЕРН, которые позволяют рождаться самым массивным элементарным объектам. На другом экспериментальном пределе, при самой высокой плотности барионной материи, будут работать установки коллайдера NICA в Дубне, что позволит изучать явления, происходившие в самом начале существования нашей Вселенной.

Не столь очевидный технологический предел при исследовании явлений микромира — это предел интенсивности потока событий. Высокая интенсивность событий позволяет измерить вероятность очень редких распадов, подавленных в рамках Стандартной модели (СМ), что дает возможность на небольшом «стандартном» фоне искать малые вклады в сигнал, связанные с теоретическими расширениями этой модели. Кроме того, рекордно высокая точность измерений свойств других распадов, достижимая на пределе интенсивности потока событий, также, в принципе, позволяет обнаруживать отклонения от СМ. Наконец, благодаря большой статистике измерения всех распадов можно значительно улучшить доступную точность параметров фено-

D. T. Madigozhin

Status of the NA62 Experiment

Main experimental strategies for studying the physical foundations of our world are based on reaching different technological limits. The most obvious of them is the extremely high energy of particle collisions at the LHC at CERN, which allows the birth of the most massive elementary objects. At another experimental limit, at the highest density of baryonic matter, the facilities of the NICA collider in Dubna will operate, which will make it possible to study the phenomena that occurred at the very beginning of the existence of our Universe.

A not so obvious technological limit in the study of the microworld phenomena is the limit of the events flux intensity. The high intensity of events makes it possible to measure the probability of very rare decays suppressed within the Standard Model (SM), which allows us to look for small contributions to the signal associated with theoretical extensions of this model over a small “standard” background. In addition, the highest accuracy of measurements of the properties of other decays, achievable at the limit of the events flux intensity, also makes it possible in principle to detect deviations from the SM. Finally, due to large statistics for all measured decays, it is possible to significantly improve the available accuracy of the parameters of

менологического описания сильных взаимодействий в рамках киральной пертурбативной теории (КПТ).

Сейчас лидером по накопленной статистике зарегистрированных распадов заряженных каонов является эксперимент NA62 [1] на фиксированной мишени, в котором используется выведенный пучок протонов ускорителя SPS в ЦЕРН вблизи Женевы (рис. 1). Протоны с энергией 400 ГэВ генерируют вторичные частицы в столкновениях с мишенью, а система магнитов выделяет пучок заряженных частиц с импуль-

сом около 75 ГэВ/с, среди которых примерно 6% каонов. Детекторы установки NA62 измеряют свойства каона и регистрируемых продуктов его распада, идентифицируют заряженные частицы, а система вето подавляет фон от разных источников.

Главной задачей эксперимента NA62 является измерение вероятности очень редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ с десятипроцентной точностью. Этот распад считается одной из «золотых мод» для поиска отклонений от СМ путем измерения параметров матрицы Кабиббо–

Рис. 1. Схема установки NA62 в ЦЕРН [2]: KTAG — черенковский детектор для идентификации каонов пучка; GTK — спектрометр частиц пучка; COL — коллиматор; CHANTI — вето столкновений частиц пучка с коллиматором; LAV — вето частиц, вылетающих под большими углами; STRAW — магнитный спектрометр для заряженных продуктов распада; RICH — черенковский детектор для их идентификации; CHOD — годоскоп для точного измерения их времени; LKr — жидкокриптонный калориметр для регистрации гамма-квантов. Остальные детекторы установки формируют систему вето заряженных частиц, вылетающих под малыми углами

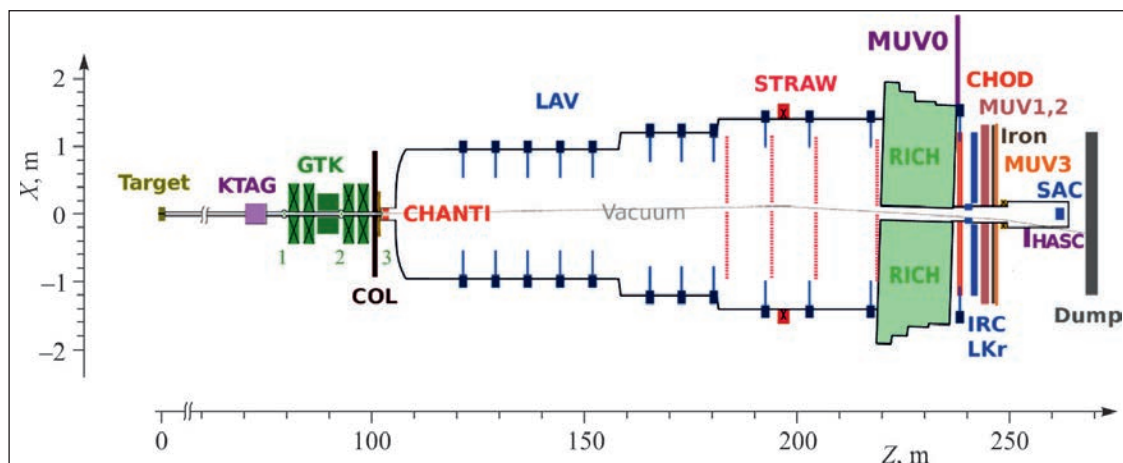


Fig. 1. Scheme of the NA62 facility at CERN [2]: KTAG — Cherenkov detector for beam kaons identification; GTK — beam particles spectrometer; COL — collimator; CHANTI — veto for collisions of beam particle with the collimator; LAV — veto for particles emitted at large angles; STRAW — magnetic spectrometer for charged decay products; RICH — Cherenkov detector for their identification; CHOD — hodoscope to accurately measure their time; LKr — liquid krypton calorimeter for registration of gamma quanta. The remaining detectors of the facility form a system of veto for charged particles emitted at small angles

the strong interaction phenomenological description in the framework of Chiral Perturbation Theory (ChPT).

The current leader in the accumulated statistics of charged kaon registered decays is the NA62 experiment [1] on a fixed target, using the extracted proton beam from the SPS accelerator at CERN near Geneva (Fig. 1). The 400-GeV protons generate secondary particles in collisions with the target, and a system of magnets emits a beam of charged particles with a momentum of about 75 GeV/c, among which approximately 6% are kaons. The detectors of the NA62 facility measure the properties of the kaon and registered products of its decay, identify charged particles, while a veto system suppresses the background from different sources.

The main goal of the NA62 experiment is to measure the probability of the very rare $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ decay with a ten-percent accuracy. This decay is considered one of the

“golden modes” for finding deviations from the Standard Model by measuring the parameters of the Cabibbo–Kobayashi–Maskawa (CKM) matrix, since the calculation of the probability of this decay is almost free from theoretical uncertainties [3]. Experiments E787 and E949 previously measured the probability of $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, deriving $BR = (17.3^{+11.5}_{-10.5}) \cdot 10^{-11}$ [4]. But the accuracy of this measurement, based on only seven selected events, did not allow establishing significant new limits on the CKM parameters.

The NA62 Collaboration has a long prehistory. It begins with the predecessor NA48 Collaboration that discovered the phenomenon of direct violation of CP invariance at the turn of the century with a significant contribution from JINR staff. This is one of the most important results of CERN, which would not have been possible to obtain

Кобаяши–Маскавы (ККМ), поскольку расчет вероятности этого распада почти свободен от теоретических неопределенностей [3]. В экспериментах E787 и E949 ранее была измерена вероятность $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, получено значение $BR = (17,3^{+11,5}_{-10,5}) \cdot 10^{-11}$ [4]. Но точность этого измерения, основанного всего на семи отобранных событиях, не позволила установить существенные новые ограничения для параметров ККМ.

Долгая предыстория сотрудничества NA62 начинается с коллаборации-предшественника NA48, кото-

Рис. 2. Импульс пиона и недостающая масса кандидатов в распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, прошедших отбор из данных 2018 г. [2]

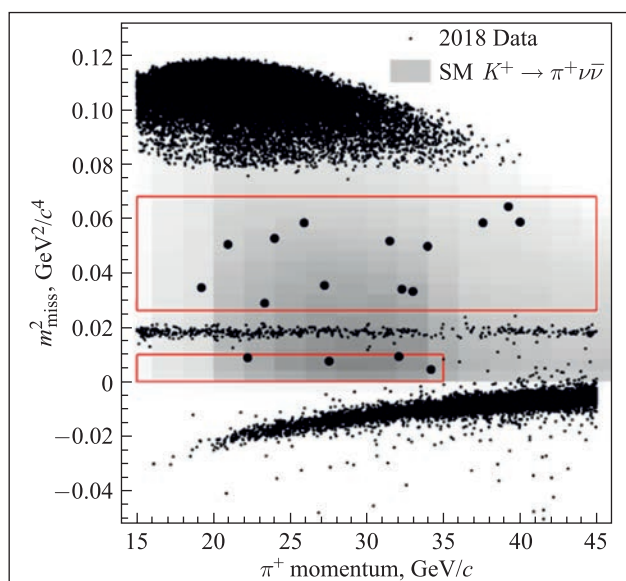


Fig. 2. Reconstructed missing mass and π^+ momentum for events satisfying the $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ selection criteria from the data recorded in 2018 [2]

without the liquid krypton calorimeter built with the participation of JINR. The calorimeter continues to operate successfully with updated electronics as part of the NA62 facility. Another key detector of NA62, a straw tube based magnetic spectrometer, was built jointly by the CERN and JINR teams, with key contributions from our team in the development and design, straw fabrication, and detector assembly. VBLHEP employee S. Shkarovsky continues to maintain this spectrometer during experimental runs of the facility, and the Laboratory group of specialists in straw detectors is developing a new version of the spectrometer for extremely high intensities of charged particle tracks, which in fact has already led to the formation at JINR of a world-class centre for straw technologies.

In June 2021, the result of NA62 on measuring the relative probability of the $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ decay was published, based on data collected in 2016–2018 [2]: $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (10,6^{+4,0}_{-3,4} \pm 0,9_{\text{сист}}) \cdot 10^{-11}$ at 68% confidence level. The

рая при значительном вкладе сотрудников ОИЯИ на рубеже веков открыла явление прямого нарушения CP-инвариантности. Это один из наиболее важных результатов ЦЕРН, и его получение было бы невозможно без построенного с участием ОИЯИ жидкокриптонного калориметра, который продолжает успешно работать с обновленной электроникой в составе установки NA62. Другой ключевой детектор — магнитный спектрометр на основе тонкостенных строу-трубок — был построен совместно группами ЦЕРН и ОИЯИ при определяющем вкладе нашей группы на этапах разработки и проектирования, изготовления строу-трубок и сборки детектора. Сотрудник ЛФВЭ С. Шкаровский продолжает сопровождение этого спектрометра в ходе сеансов экспозиции установки, а группа специалистов лаборатории по строу-детекторам ведет разработку нового варианта спектрометра для предельно высоких интенсивностей заряженных частиц, что фактически уже привело к формированию в ОИЯИ центра строу-технологий мирового значения.

В июне 2021 г. был опубликован результат NA62 по измерению относительной вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, основанный на данных, собранных в 2016–2018 гг. [2]: $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (10,6^{+4,0}_{-3,4} \pm 0,9_{\text{сист}}) \cdot 10^{-11}$ на доверительном уровне

measurement is based on 20 selected candidates with the expected background of seven events. Figure 2 shows 17 candidates from the data recorded in 2018. Rectangles bound the predefined area of the signal, open only after the completion of the analysis. The gray color represents the expected signal acceptance distribution. The result obtained agrees with the theoretical expectations of the Standard Model, which, however, predicts the probability of this decay with an essentially better accuracy: $(8.4 \pm 1.0) \cdot 10^{-11}$ [3].

JINR staff, in addition to maintaining the facility, developing software and taking part in NA62 data collection runs, participate in the physical analysis of these data in order to search for rare decays and accurately measure the properties of a number of other kaon decays. This requires serious methodological research, the results of which are used by the entire Collaboration. A recent example of the NA62 result, obtained with the decisive participation of our employees in the analysis, was the measurement of radiative decays $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$ probability with a record accuracy of about 1% [5].

Another recent result is based on the data of the previous experiment NA48/2, in which in the first decade of

68%. Измерение основано на 20 отобранных кандидатах при ожидаемом фоне в 7 событий. На рис. 2 показаны 17 кандидатов из данных 2018 г. Прямоугольниками ограничена определенная заранее область сигнала, открытая лишь после завершения анализа. Серым цветом представлено ожидаемое распределение акцептанса сигнала. Полученный результат согласуется с теоретическими ожиданиями СМ, которая, однако, предсказывает вероятность этого распада существенно точнее: $(8,4 \pm 1,0) \cdot 10^{-11}$ [3].

Сотрудники ОИЯИ, помимо обслуживания установки, разработки программного обеспечения и участия в сеансах набора данных NA62, участвуют в физическом анализе этих данных с целью поиска редких распадов и точных измерений свойств ряда других каонных распадов. Это требует серьезных методических исследований, результаты которых используются всей коллаборацией. Недавним примером результата NA62, полученного с определяющим участием наших сотрудников в анализе, было измерение вероятности радиационных распадов $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ с рекордной точностью около 1% [5].

Другой недавний результат основан на данных предшествующего эксперимента NA48/2, в котором в первом десятилетии нашего века при активном участии

сотрудников ОИЯИ, работавших под руководством лидера этого эксперимента В. Д. Кекелидзе, были измерены длины пион-пионного рассеяния с рекордной точностью. Дополнительный анализ данных этого эксперимента был выполнен в рамках проекта NA62. Геометрия установки NA48/2 обеспечивала значительный акцептанс для редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 \mu \nu$, что позволило впервые наблюдать этот распад и измерить его вероятность [6].

Результаты участия группы ОИЯИ в эксперименте NA62 были отмечены двумя премиями ОИЯИ: первой премией в 2017 г. — за создание детекторов на основе строу-трубок нового типа для спектрометра NA62, второй премией в 2019 г. — за изучение редких и поиск запрещенных распадов заряженных каонов. Сбор данных NA62 будет продолжаться до конца 2024 г. для достижения первоначально запланированной точности измерения $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ порядка 10%, сопоставимой с неопределенностью теоретического предсказания. После этого международной группе сотрудников ОИЯИ, включающей граждан России, Казахстана и Болгарии, потребуется еще несколько лет для анализа данных NA62, скрывающих в себе новые фундаментальные знания о природе нашего мира.

Список литературы / References

1. Cortina Gil E. et al. (NA62 Collab.). The Beam and Detector of the NA62 Experiment at CERN // J. Instrum. 2017. V. 12. P. 05025.
2. Cortina Gil E. et al. (NA62 Collab.). Measurement of the Very Rare $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ Decay // JHEP. 2021. V. 06. P. 093.
3. Buras A. J., Buttazzo D., Girschbach-Noe J., Knechtens R. $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ and $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ in the Standard Model: Status and Perspectives // JHEP. 2015. V. 11. P. 33.
4. Artamonov A. V. et al. Study of the Decay $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ in the Momentum Region $140 < P_\pi < 199$ MeV/c // Phys. Rev. D. 2009. V. 79. P. 092004.
5. Cortina Gil E. et al. (NA62 Collab.). A Study of the $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ Decay. CERN-EP-2023-069; e-Print: 2304.12271 [hep-ex].
6. Korotkova A. for the NA48/2 Collab. First Measurement of the $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^0 \mu^\pm \nu$ Decay // J. Phys. Conf. Ser. 2023. V. 2446, No. 1. P. 012012.

this century, the pion–pion scattering lengths were measured with record accuracy. The JINR team actively participated in the measurements working under supervision of the spokesman of this experiment V. Kekelidze. An additional analysis of the data from this experiment was carried out as part of the NA62 project. The geometry of the NA48/2 facility provided significant acceptance for the rare $K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 \mu \nu$ decay, which made it possible for the first time to observe this decay and measure its probability [6].

The results of the JINR group’s participation in the NA62 experiment were awarded two JINR prizes: the first prize in 2017 — for the development of detectors based on a new type of straw tubes for the NA62 spectrometer, the second prize in 2019 — for the study of rare and the search for forbidden decays of charged kaons. The NA62 data collection will continue until the end of 2024 to achieve the originally planned $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ measurement accuracy of about 10%, comparable to the theoretical prediction uncertainty. After that, an international group of JINR employees, including citizens of Russia, Kazakhstan, and Bulgaria, will need several more years to analyze the NA62 data, which hide new fundamental knowledge about the nature of our world.