

Отчет по проекту NA62

1. Общие сведения по проекту

1.1. Научное направление

Физика элементарных частиц и релятивистская ядерная физика

1.2. Наименование проекта

Измерение редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ на CERN SPS (эксперимент NA62)

1.3. Шифр проекта 02-1-1096-1-2010/2024

1.4. Шифр темы 02-1-1096-2010

1.5. Фактический срок (отчётный период) реализации проекта 2021-2024

1.6. Руководитель проекта *В.Д. Кекелидзе (заместитель Д.Т. Мадигожин)*

2. Научный отчет

2.1. Аннотация

Проект является продолжением четырех этапов проекта NA62, реализованных в ЛФВЭ ОИЯИ в 2010-2021 гг. Целью всех этапов проекта является участие в реализации эксперимента NA62 в SPS CERN, в рамках которого планируется измерение очень редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$, которое будет решающим испытанием Стандартной модели (СМ) посредством измерения параметра матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскавы (ККМ) V_{td} с точностью порядка 10%. Стратегия эксперимента NA62 основана на измерении распадов каонов высоких энергий на лету. Большой поток каонных распадов, необходимый для такого измерения, позволяет выполнить ряд параллельных прецизионных измерений для редких мод распада каона, позволяющих проверить СМ и киральную теорию возмущений (ChPT), которая обеспечивает низкоэнергетическое приближение для описания сильных взаимодействий.

В рамках эксперимента NA62 в ЦЕРН группы ОИЯИ и ЦЕРН совместно несли ответственность за разработку, производство, калибровку и поддержку работы магнитного спектрометра NA62, а также за разработку программного обеспечения для моделирования и реконструкции событий, зарегистрированных в спектрометре. Кроме того, группа ОИЯИ участвует в анализе экспериментальных данных NA48/2 и NA62. За отчётный период был опубликован окончательный результат измерения вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ на основе 20 отобранных кандидатов, зарегистрированных в 2016-2018 гг. Помимо этого, был выполнен ряд измерений и поисков редких и запрещённых распадов заряженных каонов на пределе интенсивности потока распадов, что позволяет уточнить параметры ChPT и установить дополнительные ограничения для возможности выхода за пределы Стандартной Модели. Сбор данных NA62 продолжается для достижения запланированной точности измерения распада заряженного каона на пион и два нейтрино.

2.2. Развернутый научный отчет

2.2.2. Описание проведенного эксперимента.

Целью проекта является участие в эксперименте NA62 на SPS в CERN, где планируется измерение очень редкого распада каона $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, чтобы провести решающую проверку Стандартной модели (СМ) путём измерения параметра матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава (ККМ) V_{td} с точностью порядка 10%. Проект является продолжением четырех этапов проекта NA62, реализованного в ЛФВЭ ОИЯИ в 2010-2021 гг.

Используя обозначения Вольфенштейна для ККМ, взаимосвязь между параметрами ρ и η может быть представлена треугольником унитарности, показанным на Рисунке 1. «Золотые моды» $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ и $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ дают возможность сделать очень чувствительные тесты СМ, так как их вероятности напрямую связаны с η^2 (высота треугольника) и $(\rho - 1.4)^2 + \eta^2$. Прогнозы СМ для вероятностей этих двух распадов имеют точность до 2% и 8% соответственно. В случае, если будут наблюдаться значительные отклонения от предсказаний, это будет несомненным свидетельством явления за пределами СМ.

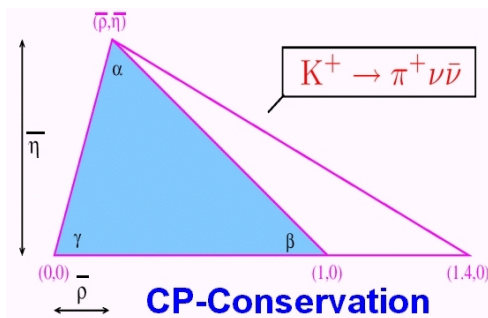


Рис. 1. Вероятность распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ определяет длину правой стороны треугольника унитарности.

Большой поток каонов позволяет искать другие редкие распады каонов и изучать их характеристики, включая проверку существования суперпартнёров фермионов Голдстоуна. Серия прецизионных измерений может быть проведена для редких мод распада каонов, чтобы проверить справедливость киральной теории возмущений (ChPT). Поиск редких распадов, запрещенных или подавленных в рамках СМ, открывает возможность открыть новую физику или установить новые пределы применимости СМ и некоторых ее расширений. Он включает поиск легких кандидатов в темную материю, которые могут образовываться при распадах редких каонов, в том числе — тяжелого нейтрального лептона.

Стратегия продолжающегося эксперимента NA62 основана на измерении распадов высокоэнергетических K^+ в полете. В этом случае сечение образования каонов оптимизируется в зависимости от энергии протонов, а регистрация фотонов эффективна из-за их высоких энергий в лабораторной системе.

Экспериментальная установка NA62 (Рисунок 2) включает следующие детекторные системы:

- **CEDAR** идентифицирует компоненту K^+ в пучке по отношению к другим частицами пучка с помощью усовершенствованного дифференциального счетчика Черенкова.

- Гигатрекер (**GTK**) состоит из трех кремниевых микропиксельных станций, измеряющих время, направление и импульс частиц пучка.

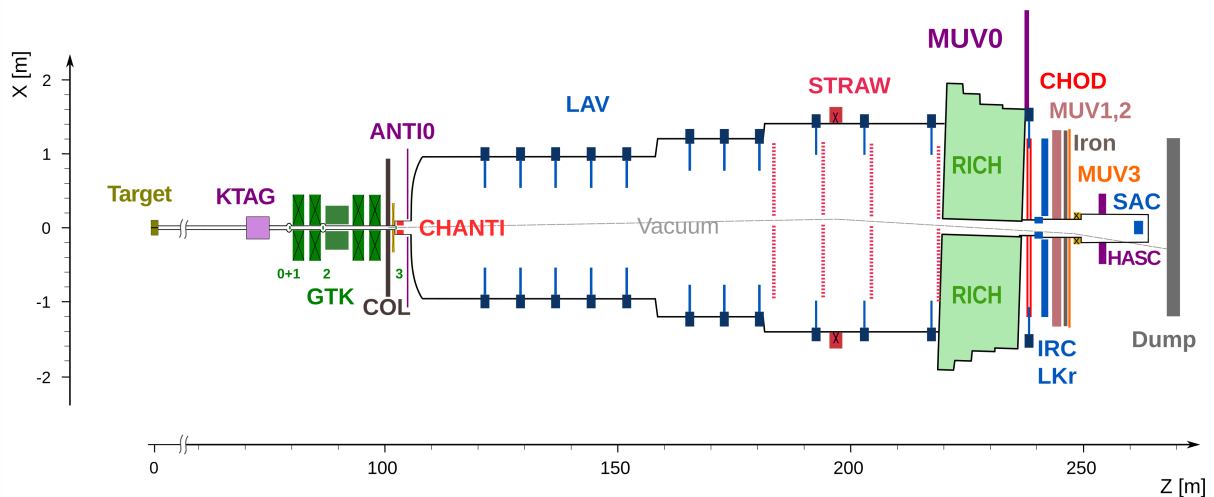


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментальной установки NA62.

- **Строу-трекер** состоит из четырёх строу-камер. Он измеряет координаты и импульс вторичных заряженных частиц, исходящих из области распада. Чтобы свести к минимуму многократное рассеяние, камеры изготовлены из сверхлегкого материала и установлены внутри вакуумного резервуара. Четыре строу-камеры расположены до и после дипольного магнита с большой апертурой (MNP33, черный на схеме), обеспечивая вертикальное магнитное поле 0,36 Тл.

- **Детектор RICH** состоит из радиатора длиной 17 м, заполненного неонам при давлении 1 атм. , что позволяет различать пионы и мюоны в интервале импульсов между 15 и 35 ГэВ/с.

- Система детекторов фотонного вето обеспечивает герметичное покрытие области распада от нулевых до больших (~ 50 мрад) углов. Это обеспечивается электромагнитным калориметром высокого разрешения на жидком криптоне (**LKr**), промежуточным кольцевым (**IRC**) и малоугловым (**SAC**) калориметрами, а также серией из 12 кольцевых детекторов фотонного вето (**LAV**).

- Детекторы мюонного вето (**MUV**) состоят из адронного калориметра, состоящего из двух частей, за которым следует дополнительный слой железа и поперечно сегментированный годоскоп. Эта система обеспечивает избыточность детектирования мюонов.

Эти детекторы дополняются счетчиками «сторожевого кольца» (**CHANTI**), окружающими последнюю станцию GTK, и годоскопом заряженных частиц (**CHOD**), перекрывающим акцептанс и расположенным между **RICH** и **LKr**. Дополнительные счётчики вето **ANTI0** и **HASC** позволяют снизить фон от взаимодействий в пучке и от ряда редких распадов. Все детекторы управляются и связываются между собой высокопроизводительной системой запуска и сбора данных (**TDAQ**).

В ходе предыдущего периода реализации проекта экспериментальная установка NA62 была построена и испытана в 2014 году на пучках CERN SPS. Специалисты ОИЯИ и ЦЕРН обеспечили строительство и установку детекторов трековых спектрометров, спроектированных

и построенных на двух этапах проекта NA62, завершенных ранее в ОИЯИ (в 2010–2012 и 2013–2015 годах).

2.2.3. Описание проделанной научной работы и полученных результатов за отчётный период.

В рамках эксперимента NA62 в ЦЕРН группы ОИЯИ и ЦЕРН совместно несут ответственность за разработку, производство, калибровку и поддержку работы магнитного спектрометра NA62, а также за разработку программного обеспечения для моделирования и реконструкции событий, зарегистрированных в спектрометре. Кроме того, группа ОИЯИ участвует в анализе экспериментальных данных NA48/2 и NA62.

Следующие основные результаты, не вошедшие в предыдущий отчёт, получены в 2021, 2022, 2023 годах и в начале 2024 года. Это были годы регистрации данных NA62 после двух лет «длительной остановки» ускорителя ЛHC в ЦЕРН в 2019-2020 гг.

В соответствии с тематическим планом:

1. В 2021, 2022 и 2023 годах группа ОИЯИ предоставила одного из двух основных экспертов по спектрометру (Сергея Шкаровского), который также является основным экспертом по системе управления детектором спектрометра (DCS). Он участвовал в управлении спектрометром во время запуска NA62 перед сеансами, а также в поддержке и развитии DCS (системы контроля всех детекторов).
2. Продолжался анализ экспериментальных данных экспериментов NA48/2 и NA62:
 - В июне 2021 г. вышла журнальная публикация нового результата NA62 по измерению относительной вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, основанный на данных, собранных в 2016-2018 гг. [1]: $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (10.6^{+4.0}_{-3.4} \pm 0.9_{\text{syst}}) \times 10^{-11}$ на доверительном уровне 68%. Измерение основано на 20 отобранных кандидатах при ожидаемом фоне 7 событий, что соответствует наблюдению этого редкого распада со статистической значимостью 3.4σ (на Рис. 3 показаны 17 кандидатов из данных 2018 года). Сбор данных NA62 продолжается для достижения первоначально запланированной точности порядка 10%.

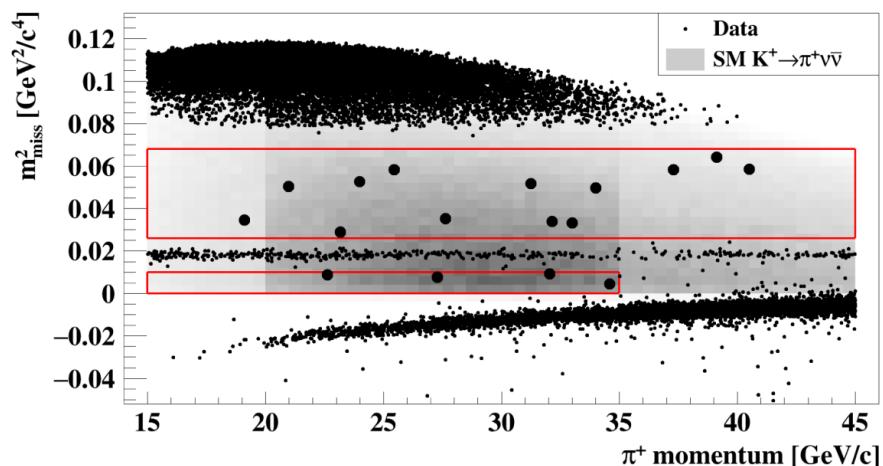


Рис. 3. Квадрат недостающей массы в зависимости от импульса пиона для 17 кандидатов распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ в данных NA62, зарегистрированных в 2018 году.

- Опубликованы результаты поисков распада $K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ e^+$, нарушающего лептонное число, и распадов $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^- e^+$, $\pi^0 \rightarrow \mu^- e^+$, нарушающих лептонный аромат [2] с использованием данных NA62, собранных в 2017-2018 гг. Свидетельств этих распадов не найдено, установлены верхние пределы вероятностей этих распадов на доверительном уровне 90%: $BR(K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ e^+) < 4.2 \times 10^{-11}$, $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^- e^+) < 6.6 \times 10^{-11}$ и $BR(\pi^0 \rightarrow \mu^- e^+) < 3.2 \times 10^{-10}$. Эти результаты на порядок улучшают прежние пределы.
- Поиски распадов $K^+ \rightarrow \mu^+ N$ и $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu X$, где N и X - массивные невидимые частицы, были выполнены с использованием данных, собранных в 2016–2018 гг. [3]. Предполагается, что N -частица является тяжелым нейтральным лептоном, и результаты выражаются как верхний предел $O(10^{-8})$ для параметра смешивания нейтрино $|U_{\mu 4}|^2$ для массы N в диапазоне 200-384 МэВ/с² и времени жизни более 50 нс (см. левую часть Рис. 4). X -частица считается скалярным или векторным медиатором скрытого сектора, распадающимся в невидимое конечное состояние. Впервые получены верхние пределы вероятности распада от $O(10^{-5})$ до $O(10^{-7})$ для масс X в диапазоне 10–370 МэВ/с² (см. правую часть Рис. 4). Установлен улучшенный верхний предел $1,0 \times 10^{-6}$ при 90% доверительном уровне для вероятности распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \nu$.

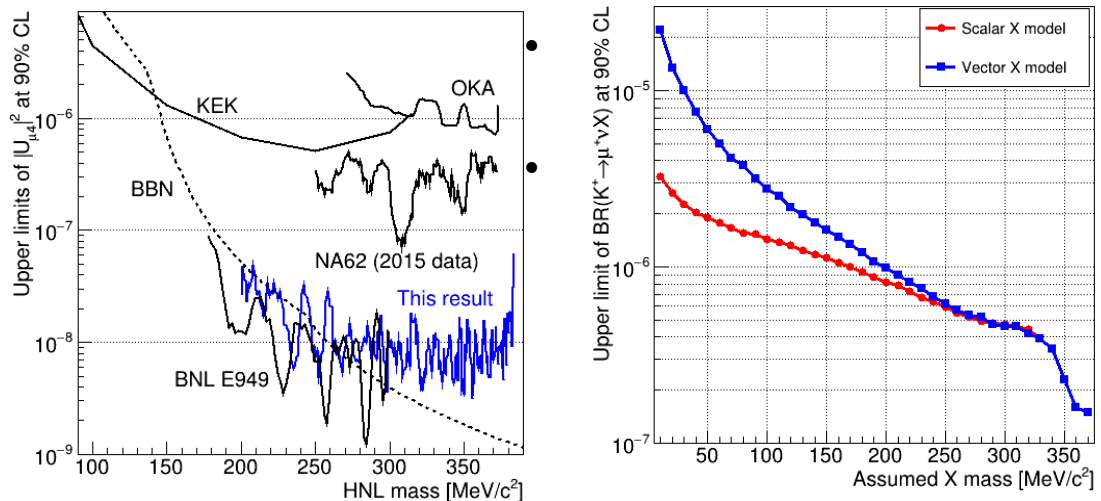


Рисунок 4. Результаты NA62 по поиску распадов $K^+ \rightarrow \mu^+ N$ and $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu X$. Слева: верхние пределы $|U_{\mu 4}|^2$ на доверительном уровне 90%, полученные для каждого предположения о массе тяжёлого нейтрального лептона (HNL). Справа: верхние пределы на $Br(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu X)$, полученные на доверительном уровне 90% для каждой гипотезы о массе X для скалярной и векторной модели переносчика взаимодействия.

- Проанализирован набор данных из $2,8 \times 10^4$ кандидатов в распады $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$ с пренебрежимо малым фоном, собранный в эксперименте NA62 на SPS ЦЕРН в 2017–2018 гг. [4]. Измеренная модельно-независимая вероятность распада составляет $(9.15 \pm 0.08) \times 10^{-8}$, что в три раза точнее предыдущих измерений. Форм-фактор распада представлен как функция квадрата массы димюона. Измерение параметров форм-фактора и их неопределенностей выполняется с использованием описания, основанного на киральной теории возмущений при $O(p^6)$.
- Поиск распадов $K^+ \rightarrow \pi^- e^+ e^+$ и $K^+ \rightarrow \pi^- \pi^0 e^+ e^+$, нарушающих сохранение лептонного числа, были выполнены с использованием полного набора данных, собранных в ходе эксперимента NA62 в ЦЕРН в 2016–2018 гг. Получены верхние пределы вероятности распада на доверительном уровне 90% [5]. Первый результат улучшает точность в

четыре раза по сравнению с предыдущим лучшим пределом, а второй результат представляет собой впервые установленный предел вероятности распада.

- Выполнен поиск распада $K^+ \rightarrow \mu^- \nu e^+ e^+$ [6], запрещённого в рамках Стандартной Модели сохранением лептонного числа или лептонного аромата в зависимости от аромата нейтрино, с использованием данных, собранных NA62 в 2016-2018 гг. Получен верхний предел 8.1×10^{-11} для вероятности этого распада на доверительном уровне 90%, что представляет собой улучшение точности в 250 раз в сравнении с результатами предшествующих поисков.
- Выполнен первый поиск ультраредких распадов K^+ в конечное состояние $\pi^+ e^+ e^- e^+ e^-$ [7] с использованием набора данных, собранных в ходе эксперимента NA62 в CERN в 2017–2018 гг. Верхний предел $1,4 \times 10^{-8}$ при 90% CL получен для относительной вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^- e^+ e^-$, для которой Стандартная модель предсказывает $(7,2 \pm 0,7) \times 10^{-11}$. Верхние пределы при 90% CL получены на уровне 10^{-9} для вероятностей двух каскадов быстрого распада с образованием пар медиаторов скрытого сектора: $K^+ \rightarrow \pi^+ a a$, $a \rightarrow e^+ e^-$ и $K^+ \rightarrow \pi^+ S$, $S \rightarrow A' A'$, $A' \rightarrow e^+ e^-$.
- Опубликованы окончательные результаты анализа распада $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$ на основе данных NA62 [8]. Набор из $1,3 \times 10^5$ кандидатов $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$ с фоном менее 1% был зарегистрирован экспериментом NA62 в CERN SPS в 2017–2018 гг. Измерения вероятности распада в трех ограниченных кинематических областях выполнены с относительной точностью в один процент, что улучшает существующие результаты более чем в два раза. Исследована возможная асимметрия распада, связанная с T-нарушением, свидетельств её наличия в пределах достигнутой точности не обнаружено.
- Темные фотоны могут генерироваться в эксперименте NA62 протонами, сбрасываемыми на поглотитель, и достигать распадного объёма, который начинается начиная на 80 м далее по пучку. Поиск темных фотонов, на лету распадающихся на $\mu^+ \mu^-$, был выполнен [9] на основе анализа $1,4 \times 10^{17}$ протонов на поглотителе, собранных в 2021 г. Никаких доказательств сигнала темных фотонов не наблюдается. Новая область пространства параметров исключена при 90% CL, что улучшает предыдущие экспериментальные пределы в области масс темных фотонов от 215 до 550 МэВ/c².
- Выборка из 3984 кандидатов распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ с оцениваемым фоном 291 ± 14 событий была зарегистрирована экспериментом NA62 в ЦЕРН в течение 2017–2018 гг [10]. Было обнаружено, что для описания наблюдаемого спектра масс дифотонов необходим вклад следующего за ведущим порядка в киральной теории возмущений. Измеренная относительная вероятность распада во всем кинематическом диапазоне составляет $(9.61 \pm 0.17) \times 10^{-7}$. Выполнен первый поиск образования и быстрого распада аксиноподобной частицы с глюонным взаимодействием в процессе $K^+ \rightarrow \pi^+ a$, $a \rightarrow \gamma \gamma$.
- Окончательные результаты анализа никогда ранее не наблюдавшегося редкого распада $K_{\mu 4}^{00}$ были приняты к журнальной публикации [11]. По 2437 обнаруженным сигналам-кандидатам с отношением сигнала к фону около 6 (Рис. 5) с высокой точностью определена относительная вероятность распада. В области квадратов массы дилептона выше $0,03 \text{ ГэВ}^2/c^4$ вероятность распада равна $BR(K_{\mu 4}^{00}, S_1 > 0.03) = (0.65 \pm 0.03) \times 10^{-6}$. Результат для полного фазового пространства $BR(K_{\mu 4}^{00}) = (3.4 \pm 0.2) \times 10^{-6}$, зависящий от экстраполяции на основе модели распада, находится в разумном согласии с предсказанием форм-фактора R из 1-петлевого приближения Киральной теории возмущений (Рис. 6).

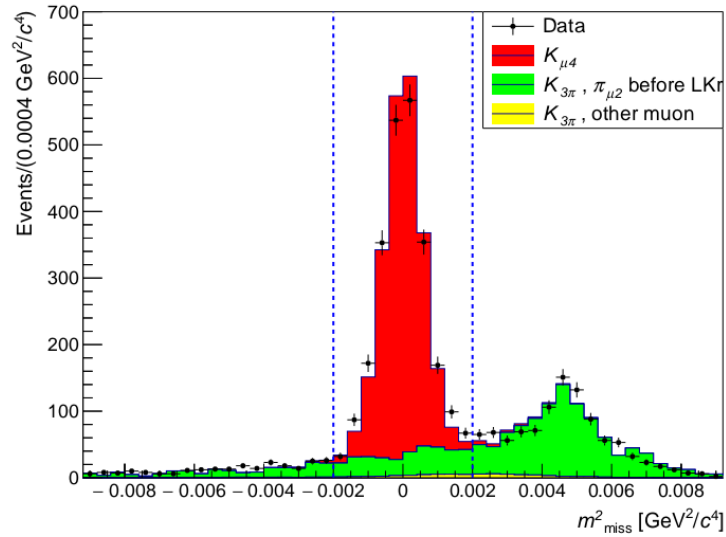


Рисунок 5. Распределение квадратов недостающей массы для отобранных событий экспериментальных данных (маркеры), а также смоделированные вклады фона и сигнала (гистограммы). Вертикальные линии показывают область сигнала.

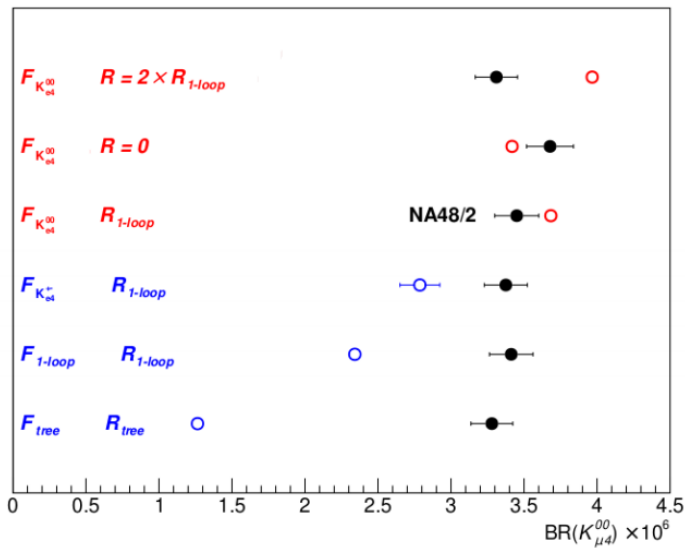


Рисунок 6. Сравнение значения $BR(K_{\mu 4}^{00})$ (сплошные маркеры), полученного в рамках шести различных моделей форм-фактора, с соответствующими теоретическими расчетами (открытые маркеры). Три нижних значения получены с использованием форм-факторов F и R из древесного приближения КПТ, однопетлевого приближения и за пределами однопетлевого приближения, соответственно. В четвертом сравнении описание F, полученное при измерении $K_{e 4}^{+}$, заменено более точным, полученным из данных по $K_{e 4}^{00}$. Последние два значения представляют собой вариации описания R, которые хуже согласуются с результатом NA48/2.

• В группе Дубны на основе данных NA62 продолжается анализ следующих мод распадов каона: $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \mu^+ \nu$, $K^+ \rightarrow \mu^+ \mu^+ \mu^+ \nu$, $K^+ \rightarrow e^+ e^+ \mu^+ \nu$, $K^+ \rightarrow \mu^+ \mu^+ e^+ \nu$, $K^+ \rightarrow e^+ e^+ e^+ \nu$, $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^+ \gamma$. Сигналы наблюдаются, продолжается разработка алгоритмов отбора событий.

Параллельно с экспериментальными работами получены следующие методические и теоретические результаты:

- Усовершенствована технология изготовления строу-трубок диаметром 5 мм и толщиной стенки 19 мкм, изготовлены новые трубки для прототипов. Два прототипа нового трекера на основе этих строу-трубок были построены и испытаны с использованием радиоактивного источника Fe-55 с новой электроникой NA62 на основе ПЛИС. Разрабатывается технология изготовления строу-трубок из майларовой плёнки толщиной 12 мм. Дубненская группа приняла участие в сеансах на тестовых пучках SPS. Начато серийное производство соломинок длиной 2,5 м, диаметром 5 мм и толщиной стенки 20 мкм. Прототип электроники новой строу-камеры NA62 был протестирован как на пучке, так и в лаборатории. Разработан новый монитор газового усиления с новым интерфейсом [12]. Разработано новое устройство для измерения натяжения анодной проволоки. Предварительные результаты измерений мюонного пучка, выполненные с помощью камер строу-трубок на тестовом пучке CERN SPS, сравнивались с предсказаниями, полученными с помощью пакета моделирования GARFIELD, сопряженного с программой LTSpice для моделирования электронных схем [13,14].
- Рождение заряженных пар в кулоновском поле ядра было изучено и рассчитано в борновском приближении с использованием явных выражений для дифференциальных сечений и их связи с полным сечением $\sigma(\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-)$ [15]. Рождение нестабильных частиц на различных ядрах дает возможность определить полное сечение взаимодействия векторных мезонов с нуклонами [16]. Это взаимодействие определяется набором амплитуд, соответствующих поперечной или продольной поляризации векторного мезона. Полное сечение взаимодействия поперечно-поляризованных векторных мезонов с нуклонами получено из когерентного фоторождения векторных мезонов на ядрах, а рождение векторных мезонов в реакциях перезарядки $\pi^\pm(K^\pm)+A \rightarrow V^0(K^{*0})+A'$ дает уникальную возможность получить еще не измеренное полное сечение продольно поляризованного векторного мезона, взаимодействующего с нуклоном.
- Разработана методика и написано программное обеспечение для калибровки отклика LKr на основе реконструированных распадов нейтрального пиона на пару гамма-квантов [17].

Полученные результаты были представлены на международных конференциях, в том числе в 17 презентациях представителей группы ОИЯИ. Эксперты из ОИЯИ участвовали в 236 сменах на установке в ходе экспериментальных сеансов сбора данных на SPS в 2021, 2022 и 2023 годах, планируется их участие в сеансах 2024 года и 2025 года.

2.2.4. Список основных публикаций авторов ОИЯИ по результатам работы по проекту.

1. E. Cortina Gil et al. (NA62 collaboration). Measurement of the very rare $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ decay. *JHEP* 06 (2021) 093. Jun 15, 2021.
2. E. Cortina Gil et al. (NA62 collaboration). Search for Lepton Number and Flavor Violation in K^+ and π^0 Decays. *Phys.Rev.Lett.* 127 (2021) 13, 131802. Sep 24, 2021.
3. E. Cortina Gil et al. (NA62 collaboration). Search for K^+ decays to a muon and invisible particles. *Phys.Lett.B* 816 (2021) 136259. May 10, 2021.

4. E. Cortina Gil et al. (NA62 collaboration). A measurement of the $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$ decay. *JHEP* 11 (2022) 011.
5. E. Cortina Gil et al. (NA62 collaboration). Searches for lepton number violating $K^+ \rightarrow \pi^- (\pi^0) e^+ e^+$ decays. *Phys.Lett.B* 830 (2022) 137172.
6. E. Cortina Gil et al. (NA62 collaboration). A search for the $K^+ \rightarrow \mu^- \nu e^+ e^+$ decay. *Phys.Lett.B* 838 (2023) 137679.
7. E. Cortina Gil et al. (NA62 collaboration). Search for K^+ decays into the $\pi^+ e^+ e^- e^+$ final state. *Phys.Lett.B* 846 (2023) 138193.
8. E. Cortina Gil et al. (NA62 collaboration). A study of the $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$ decay. *JHEP* 09 (2023) 040.
9. E. Cortina Gil et al. (NA62 collaboration). Search for dark photon decays to $\mu^+ \mu^-$ at NA62. *JHEP* 09 (2023) 035.
10. E. Cortina Gil et al. (NA62 collaboration). Measurement of the $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ decay. *Phys.Lett.B* 850 (2024) 138513.
11. R.J. Batley et al. (NA48/2 collaboration). First observation and study of the $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^0 \mu^\pm \nu$ decay. E-Print: 2310.20295 [hep-ex]. Accepted for publication in the Journal of High Energy Physics.
12. V. Bautin, K. Salamatin, T. Enik, O. Minko, Y. Kamar. Online Gas Gain Monitoring System. *Phys.Part.Nucl.Lett.* 20 (2023) 5, 1240-1242.
13. A. Zelenov, V. Bautin, S. Bulanova, T. Enik, E. Kuznetsova, V. Maleev, S. Nasybulin, K. Salamatin, D. Sosnov. Testbeam measurements and realistic simulation for straw drift tubes. *Phys.Atom.Nucl.* 86 (2023) 5, 832-837.
14. V. Bautin, M. Demichev, T. Enik, E. Kuznetsova, V. Maleev, R. Petti, S. Nasybulin, K. Salamatin, D. Sosnov, A. Zelenov. VMM3 ASIC as a potential front end electronics solution for future Straw Trackers. *Nucl.Instrum.Meth. A* 1047 (2023) 167864.
15. S. Gevorkyan, I. Larin, R. Miskimen, E. Smith. Photoproduction of pion pairs at high energy and small angles. *Phys.Rev.C* 105 (2022) 6, 065202.
16. S.R. Gevorkyan, A.V. Guskov. Impact of vector mesons polarization on its interaction with matter. *Eur. Phys. J. C.* 84 (2024) 1, 7.
17. F. Brizioli, D. Madigozhin, K. Massri, LKr energy fine calibration based on $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ decay. Internal note NA62-21-01, 2021.

2.2.5. Полный список публикаций прилагается в электронном виде.

2.2.6. Список докладов на международных конференциях и совещаниях прилагается в электронном виде.

2.3. Статус и стадия реализации проекта:

продолжающийся проект, стадия набора экспериментальных данных и их анализа.

2.4. Результаты сопутствующей деятельности

2.4.1. Научно-образовательная деятельность.

Сотрудница проекта В.Н. Горбунова в 2021-2022 гг. вела образовательную деятельность в рамках взаимодействия ОИЯИ и Университета «Дубна»:

1. Читались лекции для кафедры «Проектирование электроники для установок мегасайенс»: «Физико-химические основы технологии электронных средств», «Управление качеством электронных средств».
2. Выполнялась поддержка функционирования учебной аудитории и лабораторного кабинета для чтения лекций и практических занятий для кафедр: «Проектирование электроники для установок «мегасайенс» и «Кафедры физико-технических систем».
3. Выполнялась учебно-методическая работа с аспирантами по направлению подготовки «Системный анализ, управление и обработка информации».

Сотрудница проекта А. Баева в 2021 и 2022 гг. вела в УНЦ ОИЯИ Семинары по методам физики элементарных частиц для студентов МГУ и МФТИ.

2.4.2. Полученные гранты (стипендии) ОИЯИ.

Сотрудница проекта А. Баева получила «Грант для молодых ученых и специалистов ОИЯИ 2022 год».

2.4.4. Иные результаты (экспертная, научно-организационная, научно-популяризационная деятельность).

Сотрудник проекта Д.Т. Мадигожин входил в состав жюри премии ОИЯИ за 2021 г. и в состав жюри стипендии Маркова ЛФВЭ ОИЯИ за 2021 и 2022 г.

3. Международное научно-техническое сотрудничество.

Фактически участвующие страны, институты и организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
Centre de Physique de Particules de Marseille	France	Marseille	M. Perrin-Terrin	MoU CERN
Charles University	Czech Republic	Prague	K. Kampf + 7	MoU CERN
Comenius University	Slovakia	Bratislava	T. Blazek + 6	MoU CERN
Ecole Polytechnique Federale Lausanne	Switzerland	Lausanne	R.I. Marchevski + 4	MoU CERN
European Organiz. for Nuclear Res. (CERN)	Switzerland	Geneva	A. Ceccucci + 31	MoU CERN
George Mason University	USA	Fairfax	P.D. Rubin + 3	MoU CERN
Horia Hulubei National	Romania	Bucharest	A.M.	MoU CERN

Institute of Physics and Nuclear Engineering			Bragadireanu+4	
INFN Sezione di Pisa, Universita' e Scuola Normale Superiore	Italy	Pisa	M.S. Sozzi +15	MoU CERN
Institute for High Energy Physics of NRC Kurchatov Institute	Russia	Protvino	V. Obraztsov + 15	MoU CERN
Institute for Nuclear Research	Russia	Moscow	Y. Kudenko + 7	MoU CERN
Institute of Nuclear Physics	Kazakhstan	Almaty	Y. Kambar + 5	MoU CERN
Instituto de Fisica	Mexico	San Luis Potosi	J. Engelfried + 5	MoU CERN
Johannes Gutenberg Universitaet	Germany	Mainz	R. Wanke + 10	MoU CERN
Laboratori Nazionali di Frascati	Italy	Frascati	A. Antonelli + 15	MoU CERN
Max-Planck-Institut fur Physik	Germany	Munich	B. Dobrich + 5	MoU CERN
Lancaster University	United Kingdom	Lancaster	R. Jones + 5	MoU CERN
University of Bristol	United Kingdom	Bristol	Helen F. Heath	MoU CERN
Sezione di Roma I (INFN)	Italy	Rome	M. Raggi + 13	MoU CERN
Sezione di Roma Tor Vergata INFN	Italy	Rome	R. Ammendola + 5	MoU CERN
SLAC National Accelerator Laboratory	USA	Menlo Park	D. Coward	MoU CERN
TRIUMF	Canada	Vancouver	D.A. Bryman + 4	MoU CERN
Universita degli studi di Ferrara	Italy	Ferrara	A. Gianoli + 21	MoU CERN
Universita e INFN, Firenze	Italy	Firenze	F. Bucci + 10	MoU CERN
Universita e INFN, Perugia	Italy	Perugia	M. Pepe + 11	MoU CERN
Universita e INFN Torino	Italy	Torino	C. Biino + 12	MoU CERN
Universita Federico II e INFN Sezione di Napoli	Italy	Naples	F. Ambrosino + 11	MoU CERN
Universite Catholique de Louvain (UCL)	Belgium	Louvain	E.C. Gil + 4	MoU CERN
University of Birmingham	United Kingdom	Birmingham	C. Lazzeroni +13	MoU CERN
University of British Columbia	Canada	Vancouver	D. A. Bryman	MoU CERN
University of Glasgow	United Kingdom	Glasgow	D. Britton + 3	MoU CERN

4. План/факт анализ использованных ресурсов: кадровых (в т.ч. ассоциированный персонал), финансовых, информационно-вычислительных, инфраструктурных

4.1. Кадровые ресурсы (фактически на время подачи отчета)

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
1.	научные работники	10.6	0
2.	инженеры	0.7	0
3.	специалисты	1.0	0
	Итого:	12.3	0

4.2. Фактическая сметная стоимость проекта

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребность и в ресурсах	Распределение финансирования и ресурсов				
			2021 год	2022 год	2023 год	4	5
	Международное сотрудничество (МНТС)	223.7	55.0	85.0	83.7		
	Материалы	273.3	133.6	67.3	72.4		
	Оборудование и услуги сторонних организаций						
	Пуско-наладочные работы						
	Услуги научно-исследовательских организаций						
	Приобретение программного обеспечения						
	Проектирование/строительство						
	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)						
Необходимые ресурсы Нормо-час	Ресурсы						
	- Сумма FTE,	36.9	12.3	12.3	12.3		
	- ускорителя/установки,						
	- реактора						

Источники финансирования	Бюджетные средства	Бюджет ОИЯИ (статьи бюджета)	497.0	188.6	152.3	156.1		
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования						

5. Заключение

На текущем этапе установка NA62 работает успешно, идёт набор новых данных, выходят публикации по результатам анализа набранных данных. Для продолжения работы требуются в основном текущие затраты на участие в сеансах набора данных и конференциях, а также материальные затраты на исследования и разработки в области новых строу-камер, которые используются также в ряде других проектов ОИЯИ. Публикуемые результаты получены на верхнем мировом пределе интенсивности каонных распадов. Качество публикаций и методических результатов соответствует мировому уровню. Достигнутые результаты соответствуют финансовым затратам на проект.

6. Предлагаемые рецензенты

Г.А. Шелков (ЛЯП ОИЯИ)

Руководитель темы 02-1-1096-2010

_____ В.Д. Кекелидзе

“ ____ ” _____ 2024г.

Руководитель проекта 02-1-1096-1-2010/2024

_____ В.Д. Кекелидзе

“ ____ ” _____ 2024г.

Экономист Лаборатории

_____ / _____ /

“ ____ ” _____ 2024 г.