

Измерение редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ на CERN SPS

Проект NA62 (Продление на 2022-2024)

Тема 02-1-1096-2010/2022

Список организаций и участников

Belgium: Université Catholique de Louvain (**Louvain-La-Neuve**);
Bulgaria: University of Sofia St. Kliment Ohridski, Faculty of Physics (**Sofia**);
Canada: TRIUMF, University of British Columbia (**Vancouver**);
Czech Republic: Charles University (**Prague**);
Germany: Johannes-Gutenberg-Universität Mainz (**Mainz**);
Italy: Università di Ferrara (**Ferrara**), Università e INFN (**Florence**), Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Laboratori Nazionali di Frascati (**Frascati**), Università e INFN (**Naples**), Università e INFN (**Padua**), Università e INFN (**Perugia**), Sezione di Pisa, INFN (**Pisa**), Università degli Studi di Roma Tor Vergata, Sezione di Roma Tor Vergata, INFN (**Rome**), Università e INFN, Roma I, Sezione di Roma I, INFN (**Rome**), Università e INFN (**Turin**);
Mexico: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Física (**San Luis Potosí**);
Romania: Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering (**Bucharest-Magurele**);
Russia: Joint Institute for Nuclear Research – JINR (**Dubna**), Institute for Nuclear Research RAS (**Moscow**), Institute for High Energy Physics, Russian Federation State Research Centre (**Protvino**);
Slovakia: Comenius University (**Bratislava**);
Switzerland: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire – CERN (**Geneva**);
United Kingdom: University of Birmingham (**Birmingham**), University of Bristol, H. Wills Physics Laboratory (**Bristol**), University of Glasgow (**Glasgow**), University of Liverpool, Oliver Lodge Laboratory (**Liverpool**);
United States of America: Boston University (**Boston**), George Mason University (**Fairfax**), SLAC National Accelerator Laboratory (**Menlo Park**), University of California Merced (**Merced**), Brookhaven National Laboratory (BNL) (**Upton**).

Лаборатория физики высоких энергий:

А.Н. Баева, Д. Байгарашев, А.А. Белькова, С.Р. Геворгян, Л.Н. Глонти, В.Н. Горбунова, Е.А. Гудзовский, Д.Д. Емельянов, Т.Л. Еник, В.П. Фалалеев, Т. Мауей, В.Д. Кекелидзе, Д. Керейбай, А.М. Короткова, Д.Т. Мадигожин, М. Мишева, Н.А. Молоканова, С.А. Мовчан, И.А. Поленкевич, Ю.К. Потребеников, С.Н. Шкаровский

Руководители проекта: Кекелидзе В.Д. (ЛФВЭ), Потребеников Ю.К. (ЛФВЭ)

ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТА В НОО _____

ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ _____ НОМЕР ДОКУМЕНТА _____

ДАТА ПЕРВОГО УТВЕРЖДЕНИЯ ПРОЕКТА

24.09.2009

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

Измерение редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ на CERN SPS

Проект NA62 (Продление на 2022-2024)

Тема 02-1-1096-2010/2022

Руководители проекта В.Д. Кекелидзе, Ю.К. Потребеников

УТВЕРЖДЕН ДИРЕКТОРОМ ОИЯИ

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ОИЯИ

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

НАЧАЛЬНИК НОО

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА



ОДОБРЕН

ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

Оглавление

	Стр.
Оглавление	1
Аннотация	2
1. Введение	3
2. Статус исследования	4
3. Описание предложенного исследования	6
3.1 Предмет и методы исследования	6
3.2 Выполненная часть работы	9
3.3 План предлагаемых действий и потенциальные риски	11
3.4 Вклад и обязательства группы ОИЯИ на период 2022-2024 гг	12
3.5 Публикации участников, диссертации и доклады на конференциях	13
4. Оценка кадровых ресурсов	14
5. Оценка расходов по проекту на три года (Форма 26)	15
6. Смета затрат (Форма 29)	16
7. Сильные и слабые стороны, возможности, угрозы	17
8. Список литературы	18
Дополнения	20

Аннотация

Предлагаемый 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, где измерение очень редкого распада каона $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ планируется сделать решающим испытанием Стандартной модели (SM) посредством измерения с 10% -ной точностью параметра матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскавы (СКМ) V_{td} .

Кроме того, может быть выполнена серия прецизионных измерений для редких мод лептонного распада каона, чтобы проверить применимость Стандартной Модели и киральной теории возмущений (ChPT), которая обеспечивает низкоэнергетическое приближение для описания сильных взаимодействий. В дополнение, планируется поиск суперпартнера фермионов Голдстоуна - псевдоскалярного сголдстино.

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

Коллектив участников проекта NA62 в ОИЯИ состоит из опытных физиков и молодых ученых. Проф. В. Кекелидзе и Д. Мадигожин имеют ученую степень доктора наук, еще восемь членов команды имеют кандидатскую степень. Все они имеют обширный опыт, полученный в других экспериментах по изучению свойств распада каонов, включая NA48, NA48/1 и NA48/2. Три члена команды продолжают работу над кандидатскими диссертациями на основе данных NA48/2. Кроме того, в команду входят четыре молодых сотрудника, которые планируют подготовить кандидатские диссертации на основе данных NA62.

Объем необходимого финансирования на 2022-2024 годы из бюджета ОИЯИ составляет 515 тысяч долларов.

1. Введение

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 около 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.

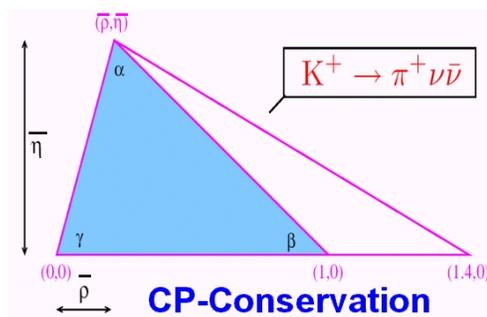


Рис. 1. Распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ представлен правой стороной треугольника.

Цель эксперимента NA62, подробное описание которого дано в [1,2,3,4], заключается в том, чтобы зарегистрировать около 100 событий распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ и сохранить малую общую систематическую погрешность. Это будет значительным улучшением по сравнению с доступными в настоящее время результатами E787 и E949 [5], основанными всего на 7 событиях золотой моды.

Для этой цели требуется по крайней мере 2×10^{13} распадов K^+ в предположении 10% акцептанса сигнала и относительной вероятности распада 10^{-10} . Низкая систематическая неопределенность требует коэффициента отбрасывания для типичных распадов каонов порядка 10^{12} и возможности измерять эффективность регистрации и факторы подавления фона непосредственно из данных.

Большой поток каонов позволяет искать другие редкие распады каонов и изучать их характеристики, включая проверку существования суперпартнёров фермионов Голдстоуна [6-8]. 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 [9].

2. Статус исследования

До эксперимента NA62 наиболее точные экспериментальные результаты были получены в экспериментах E787 и E949 на BNL при изучении распадов остановившихся каонов [5]: $B(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (1.73^{+1.15}_{-1.05}) \times 10^{-10}$. За исключением эксперимента NA62, описанного ниже, никаких других измерений этой моды в настоящее время не проводится и не планируется. Существующий разрыв между теоретической точностью и большой экспериментальной ошибкой побуждает к серьезным экспериментальным усилиям. Значительные новые ограничения могут быть получены при измерении вероятности этой реакции на уровне 10% или лучше.

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. В результате ожидалось, что акцептанс для сигнала $\pi^+ \nu \bar{\nu}$ будет примерно в 20 раз выше, чем в экспериментах BNL с остановленными каонами.

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).

После того, как строу-камеры спектрометра были смонтированы в составе экспериментального детектора NA62 в 2014 г. (Рис. 2), было измерено их фактическое положение, проведены вакуумные испытания строу-детекторов, смонтирована система газоснабжения. Установлено четыре модуля питания (MPOD) и разработан интерфейс управления ими, интегрированный в систему медленного управления NA62. Для проектирования и изготовления спектрометра

был выполнен ряд важных методических работ [10-13].

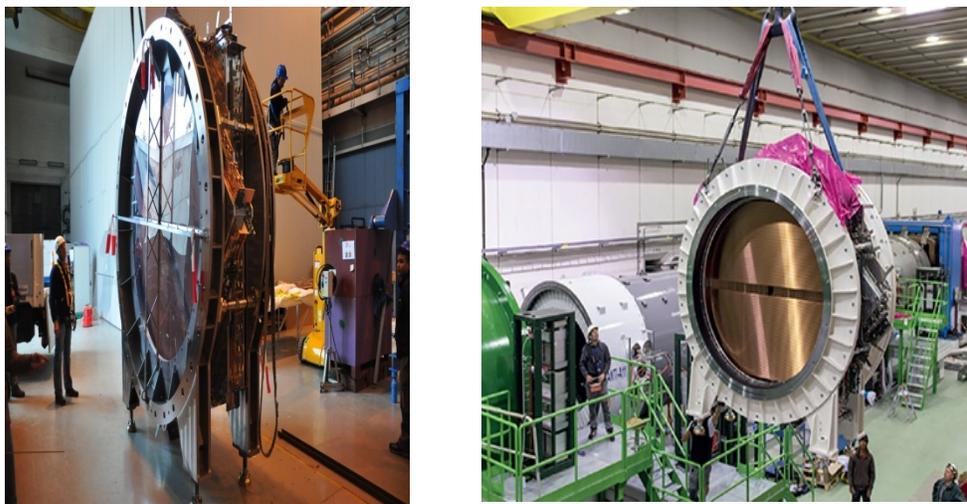


Рис. 2. Стру-камера, собранная из 2 модулей (слева) и ее установка в экспериментальную установку NA62 (справа).

Всего за время проведения сеансов экспозиции на пучке ускорителя для эксперимента NA62 в 2016-2018 гг. сотрудники группы ОИЯИ выполнили на экспериментальной установке около 250 смен.

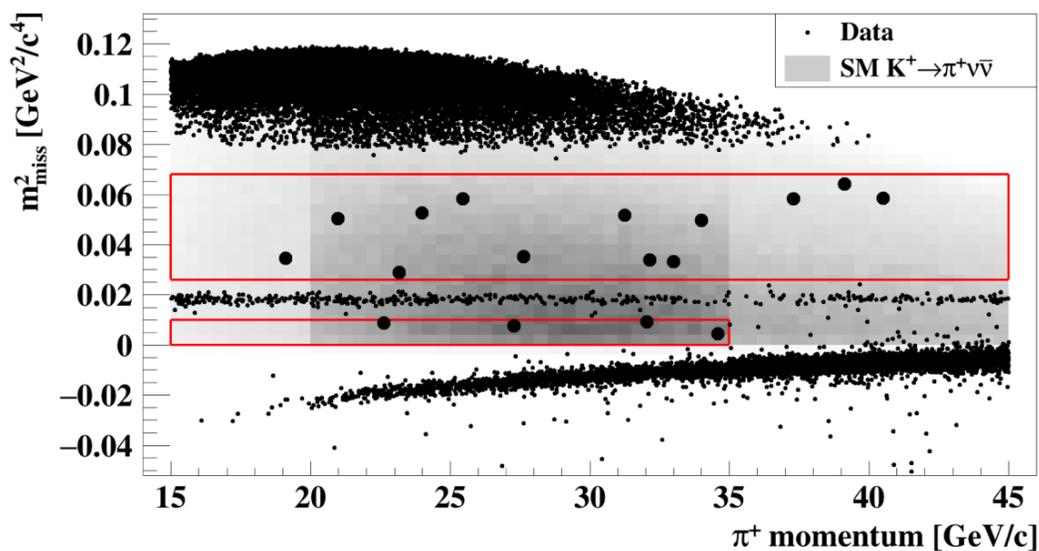


Рис. 2. Квадрат недостающей массы в зависимости от импульса пиона для кандидатов распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, отобранных в данных NA62, зарегистрированных в 2018 году.

Экспериментальные данные NA48/2 и NA62, полученные в 2003-2018 гг., были проанализированы в период 2019-2021 гг со следующими главными результатами:

- **Получен новый результат NA62 по исследованию распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$** , основанный на данных, собранных в 2018 г. [14]. Чувствительность к одному событию составила $1,11 \times 10^{-11}$, что соответствует 7,6 событиям Стандартной Модели. Наблюдается 17 кандидатов в сигналы, тогда как ожидаемый фон составляет 5,3 события (см. Рис. 2). Вместе с тремя кандидатами, ранее зарегистрированными NA62 в данных, зарегистрированных в 2016 и 2017 гг. [15,16], это приводит к наиболее точному измерению относительной вероятности распада $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu) = (11.0^{+4.0}_{-3.5} \pm 0.3_{\text{sys}}) \times 10^{-11}$, что согласуется с ожиданием Стандартной Модели: $(8.4 \pm 0.1) \times 10^{-11}$.

- **На основе данных NA48/2** получен новый верхний предел вероятности распада $K \rightarrow \pi \mu^\pm \mu^\pm$, нарушающего лептонное число [17], выполнено первое наблюдение и исследование редкого распада $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$ [18] и наиболее точное комбинированное измерение формфакторов распадов K_{e3} и $K_{\mu 3}$ [19].

- **На основе данных NA62, собранных в 2007 г.**, был измерен параметр наклона формфактора электромагнитного перехода π^0 [20], а также установлены новые верхние пределы для квадрата матричного элемента $|U_{\mu 4}|^2$ (описывающего смешивание мюонного и гипотетического тяжелое нейтрино) из спектра недостающих масс распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ [21].

- **На основе данных NA62, собранных в 2015-2018 гг.**, установлены новые ограничения на элементы матрицы смешения тяжелых нейтрино $|U_{e4}|^2$ и $|U_{\mu 4}|^2$ [22,23], а также установлены новые ограничения на гипотетический темный фотон, связанный с обычным фотоном [24].

3. Описание предложенного исследования

3.1 Предмет и методы исследования

Исследовательская деятельность, предлагаемая в рамках продления проекта NA62 в ОИЯИ, будет сфокусирована на достижении конечной цели текущего эксперимента NA62 – измерения относительной вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ с точностью около 10%. Вклад ОИЯИ в этот результат уже включает участие в создании и поддержании работы спектрометра. На этапе анализа группа ОИЯИ принимает участие в калибровке детектора и разработке общего программного обеспечения.

Кроме того, коллаборация NA62 исследует ряд редких мод распада

каонов. Группа ОИЯИ участвует в анализе четырёх-лептонных распадов $K^+ \rightarrow e^+ \nu \mu^+ \mu^-$, $K^+ \rightarrow e^+ \nu e^+ e^-$, $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu e^+ e^-$ and $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \mu^+ \mu^-$ (последний ранее не наблюдался) с относительной вероятностью порядка 10^{-8} . Их прецизионное измерение расширит наши знания о параметрах Киральной пертурбативной теории и проверит их правильность. Поиск запрещенных мод $K^+ \rightarrow e^+ \nu \mu^+ \mu^-$, $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu e^+ e^-$ обеспечит проверку пределов СМ.

Большая статистика распадов каонов в NA62 дает нам возможность проверить предсказание [6] о существовании суперпартнёров фермионов Голдстоуна - псевдоскалярного голдстино P . Эксперимент HyperCP [7] зарегистрировал 3 распада $\Sigma \rightarrow \pi \mu^+ \mu^-$, где масса $P \rightarrow \mu^+ \mu^-$, если он существует, составляет 214,3 МэВ. Для NA62 измерение импульса налетающего K^+ дает возможность восстановить недостающую массу в распадах $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 P$ с необнаруженным псевдоскалярным P [8].

На основе данных NA62 также предусматривается поиск образования тяжелого нейтрального лептона (HNL) в распадах заряженных каонов. Например, минимальная стандартная модель нейтрино [9] постулирует три HNL, объясняющих темную материю и барионную асимметрию Вселенной. Идея поиска HNL в NA62 основана на изучении распределений недостающих масс для $K^+ \rightarrow e^+$ и $K^+ \rightarrow \mu^+$ с измеренными импульсами каонов и лептонов.

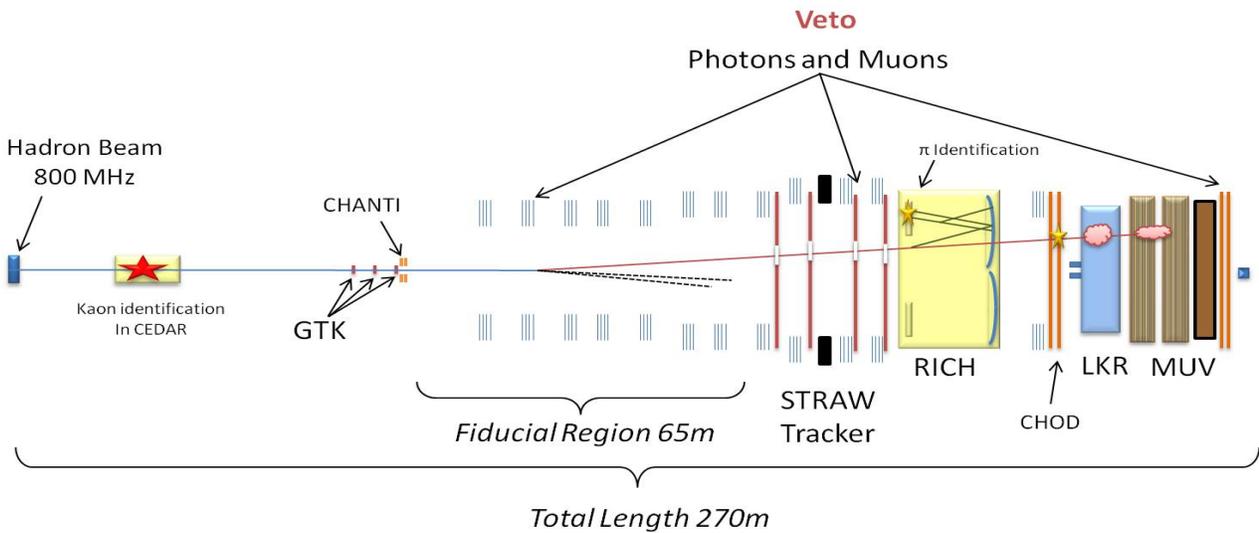


Рис. 3. Схематическое изображение экспериментальной установки NA62.

Экспериментальная установка NA62 (рисунок 3) 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.
- **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 неоном 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** или **Veto**).
- 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 прием и расположенным между **RICH** и **LKr**. Все детекторы управляются и связываются между собой высокопроизводительной системой запуска и сбора данных (**TDAQ**). Основные детекторы подробно описаны в [1,3].

Распределение квадрата недостающей массы для K^+ и положительно заряженного трека анализируется в предположении, что трек создается заряженным пионом. Распределение недостающей массы для распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ показано на левой диаграмме Рисунка 4. Области сигнала NA62 выбраны с учетом разрешения (область I и область II). На левой диаграмме показан фон, который можно отделить с помощью кинематики, а на правой – кинематически неотделимый фон, подавляемый с помощью дополнительных обрезаний.

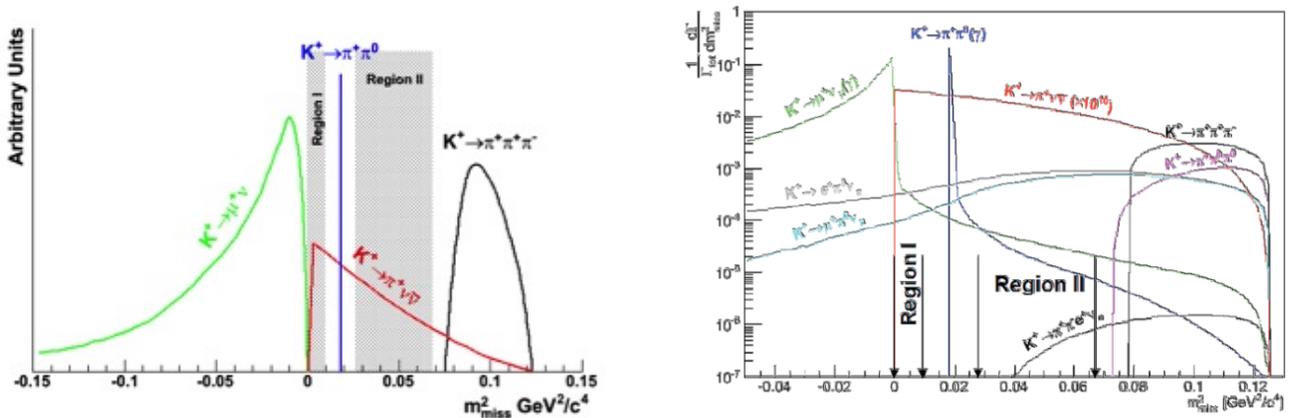


Рис. 4. Распределение недостающих масс $m^2_{miss} = (P_K - P_{track})^2$ для сигнальных (красная линия) и фоновых событий. Фоновые моды, которые могут быть отделены от сигнала кинематикой, показаны на левом графике, а неотделимый фон - на правом графике.

Существуют также моды распада K^+ (с вероятностью $> 10^{-5}$), например, K_{e4} ($K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu$), которые могут иметь топологию, аналогичную исследуемому распаду в случаях, когда и отрицательно заряженный пион, и заряженный лептон не детектируются. Поэтому в обязательном порядке детектор должен быть герметичным по отношению к отрицательно заряженным частицам. Это обеспечивается трекерными камерами.

Экспериментальные методы исследования основаны на технике NA62 изучения распада каона на лету, которая основана на измерении продуктов распада высокоэнергетических каонов, а также на регистрации кинематики прилетающего каона. Фундаментальные кинематические отношения используются для оценки характеристик событий, а статистическая интерпретация результатов опирается на установленные математические инструменты и протестированное программное обеспечение. Описанная выше экспериментальная установка NA62 была построена на предыдущих этапах проекта, и в будущем от группы ОИЯИ ожидается только ее поддержание и калибровка.

3.2 Выполненная часть работы

В октябре 2019 года эксперимент NA62 представил Дополнение 1 к P326 в SPSC, предлагая продолжить физическую программу после Второй длительной остановки LHC (LS2), и был одобрен первый год сбора данных. FRC в ноябре 2019 года утвердил бюджет на 2020 год, что позволило нам ускорить подготовку к сбору данных после LS2.

Во время физического сеанса NA62 в 2016 г. был проведен стабильный сбор данных при интенсивности 13×10^{11} протонов на мишени за сброс, используемой

для генерации потока каонов (40% от номинальной интенсивности). Интенсивность ограничивалась временной структурой пучка, что приводило к увеличению максимальных значений интенсивности пучка, которые были намного выше, чем ожидалось. В результате внутренняя электроника некоторых детекторов не могла обрабатывать данные на пиках интенсивности. После обновлением прошивок электроники для сеансов NA62 в 2017-2018 годах сбор данных производился с 60% номинальной интенсивности. Другой важной причиной снижения статистической значимости достигнутого в настоящее время результата NA62 является неожиданный размер фона со стороны входящего пучка, который в будущем будет подавлен с помощью дополнительной защиты и лучшего измерения характеристик каонов.

До сбора данных за 2018 год была улучшена радиационная защита. Стойки с электроникой для охлаждающих станций KTAG, SHANTI и GTK были оборудованы дополнительными бетонными блоками. В стойки электроники KTAG добавлена нейтронная защита (карбид бора). Чтобы уменьшить фон со стороны пучка, влияющий на анализ $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$, была изменена схема прохождения пучка перед распадным объемом. Основными модификациями являются: оптимизированная компоновка ахромата, 4-я станция GTK и новая система счётчиков вето вокруг пучковой трубы. В результате ожидается снижение фона со стороны входящего пучка в 2–3 раза.

Было проведено тщательное изучение источников неэффективности всей системы TDAQ с использованием всей доступной зарегистрированной информации. Исследование показало, что вклад вносят несколько источников, и было определено несколько частей недостающей информации, которые будут записаны для полного отслеживания всех источников мёртвого времени системы.

С апреля 2019 года дополнительные усилия были сосредоточены на улучшении процедур калибровки нескольких детекторов, включая новую энергетическую калибровку LK γ с использованием фотонов от распадов π^0 , разработанную группами ОИЯИ и Перуджи.

Вклад ОИЯИ как в уже завершённую, так и в текущую деятельность NA62 весьма существенен. С самого начала проекта группа ОИЯИ совместно с ЦЕРН отвечала за создание ключевого детектора – спектрометра NA62 (трекер STRAW). Вклад ОИЯИ в создание спектрометра является определяющим во многих аспектах: НИОКР, моделирование МК на стадии проектирования, выбор геометрии строу, конструирование рамок, изготовление строу (более 7000 в ОИЯИ), сборка модулей. Во время экспериментальных запусков NA62 в 2016-2018 гг. член группы ОИЯИ (С. Шкаровский) был официальным экспертом, ответственным за работу спектрометра и за спектрометрическую часть системы управления детектором (DCS).

3.3 План предлагаемых действий и потенциальные риски

Предлагаемый период продления проекта (2022-2024), как ожидается, будет периодом сбора данных NA62 с аппаратными, программными и программными улучшениями, которые будут подавлять фон из приходящего пучка и повышать акцептанс сигнала благодаря возможности ослабления некоторых обрезаний. Полная номинальная статистика NA62 (~ 100 событий SM) будет собрана в ходе предлагаемого продления проекта.

Средства, необходимые для участия в сборе и анализе данных, включают обученный персонал для анализа данных и для обслуживания спектрометра NA62, а также командировочные расходы для участия в запусках NA62 и некоторых международных конференций. От команд-участниц не ожидается предоставления какого-либо значительного дополнительного оборудования.

Потенциальные риски на период продления проекта намного меньше, чем риски, предусмотренные с самого начала проекта. Многие проблемы, связанные с созданием новых детекторных элементов, были рассмотрены в Документе технического дизайна [2]. Они были окончательно решены, но для этого потребовались значительные задержки со сбором данных, что и является основным объяснением того, почему цель NA62 еще не достигнута. Группа ОИЯИ не несет ответственности за задержки. 2014, 2015 и большая часть 2016 года были этапом создания установки с уже полностью работающим спектрометром.

Более того, появились еще две проблемы без каких-либо сценариев (и это вторая причина, по которой цель NA62 еще не достигнута): неожиданно высокие вариации интенсивности пучка от ускорителя и высокий уровень фона от приходящего пучка.

К счастью, проведенный ранее анализ данных за 2016-2018 гг. показывает, что никаких других рисков такого рода возникнуть не может, и ожидаются лишь существенные улучшения. В результате цель ~ 100 событий SM будет почти наверняка достигнута при продлении сеанса после длительной остановки LHC.

Реалистичные риски, которые мы могли бы рассмотреть сейчас, включают следующие сценарии:

- Отмена продолжения сеансов сбора данных NA62 (например, из-за пандемии). Резервная стратегия на этот случай:
 - другие дополнительные исследования редких распадов каонов с имеющейся набранной статистикой.
- Нехватка персонала для быстрого завершения всех дополнительных исследований. Резервная стратегия:
 - будем пытаться привлечь ещё больше талантливой молодёжи;

- анализ будет завершён позднее параллельно с другими стадиями проекта или другими проектами (сейчас мы всё ещё работаем с данными NA48/2 собранными в 2003/2004).

3.4 Вклад и обязательства группы ОИЯИ на период 2022-2024 гг.

В список вкладов и обязанностей группы ОИЯИ входят:

- Калибровка и юстировка строу-детектора на основе собранных данных;
- Участие в тонкой калибровке LKr, основанной на распадах π^0 ;
- Улучшение моделирования строу-детектора методом Монте-Карло, используемого для основного анализа NA62;
- Участие в анализе редких источников фона для $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$;
- Анализ четырёх-лептонных мод распадов заряженных каонов;
- Анализ распада $K_{e3\gamma}$;
- Анализ распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma e^+ e^-$;
- Анализ распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu$;
- Анализ распада $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^0 \mu^\pm \nu$ (по данным NA48/2);
- Поиск лёгкого сголдстино;
- Диагностика и ремонт при необходимости строу-камер магнитного спектрометра, а также поддержание их систем питания низкого и высокого напряжения.
- Участие в исследованиях и разработках по созданию нового модуля строу-трубок.
- Участие в сеансах сбора данных NA62 в 2022-2024.
- Поддержка спектрометра NA62 в ходе сеансов сбора данных в 2022-24 гг.

На период продления проекта участие группы в NA62 будет включать:

- техническую поддержку аппаратного обеспечения Спектрометра (3 человека);
- работу дежурного эксперта по Спектрометру и контрольной системе детектора (DCS) во время сбора данных, а также эксперта по их разработке и поддержанию (1);
- разработку и поддержание программного обеспечения для контроля качества данных (2);
- участие в улучшении моделирования Спектрометра (1);
- физический анализ: отдельные источники фона для $\pi \nu \nu$, дополнительные физические задачи для нашей группы (10 человек с различной долей участия).

3.5 Публикации участников, диссертации и доклады на конференциях

8 журнальных статей NA62 [15,16,18,23,24,25,26,27] были опубликованы с участием группы Дубны в 2019-2021 (16 соавторов из ОИЯИ). В трёх из них [18,23,25] члены группы Дубны являются со-авторами, ответственными за подготовку текста.

Две кандидатские диссертации находятся в процессе подготовки текстов. Полученные в 2019-2021 гг. результаты были представлены на международных конференциях, включая 11 докладов, сделанных членами группы ОИЯИ [28-38].

Серия научных работ группы Дубны “Изучение редких и поиск запрещённых распадов заряженных каонов” была удостоена второй премии ОИЯИ за 2019 г. в номинации экспериментальных исследований.

4. Оценка кадровых ресурсов

В следующей Таблице представлены участники группы ОИЯИ в NA62 с указанием их задач (помимо участия в сменах сбора данных) и долей участия.

Имя	FTE	Работа помимо общих обязанностей (участие в сменах)
Д. Байгарашев	1.0	Контроль качества данных, калибровка, физический анализ
А. Баева	1.0	Физический анализ
А. Белькова	0.5	Подготовка документации
С. Геворгян	1.0	Теория редких распадов, разработка моделей их генерации
Л. Глonti	0.2	Калибровка спектрометра и проверка качества его работы.
В. Горбунова	0.5	Подготовка документации
Е. Гудзовский	0.1	Разработка моделирования, физический анализ, координация
Д. Емельянов	1.0	Разработка программных средств, физический анализ
Т. Епik	0.3	Разработка и поддержание аппаратного обеспечения
В. Кекелидзе	0.1	Руководитель проекта
Д. Керейбай	1.0	Физический анализ
А. Короткова	0.7	Физический анализ
Д. Мадигожин	1.0	Разработка моделирования, контроль данных, анализ
Т. Мауей	1.0	Калибровка детектора
М. Мишева	0.2	Физический анализ
Н. Молоканова	0.9	Контроль качества данных, калибровка детектора
С. Мовчан	0.2	Разработка и поддержание аппаратного обеспечения
И. Поленкевич	0.5	Физический анализ
Ю. Потребеников	0.5	Руководитель проекта
С. Шкаровский	1.0	Разработка DCS, поддержание строу-камер, анализ
В. Фалалеев	0.2	Медленный контроль, разработка DCS, поддержание аппаратуры
Полный FTE	12.9	

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления
проекта Измерение редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ на CERN SPS (Проект NA62)**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.). Потребности в ресурсах	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов				
			1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Затраты	Основные узлы оборудования, работы по его обновлению, наладке и т.п.	70	30	35	5		
	Строительство/ремонт помещений						
	Материалы	190	70	75	45		
ресурсы	Необходимые Нормо-час	Ресурсы – конструкторского бюро лаборатории, – опытного производства ОИЯИ, – опытного производства лаборатории, – ускорителя, – реактора, – ЭВМ. Эксплуатационные расходы					
Источники финансирования	средства в бюджете	Затраты из бюджета, в том числе инвалютные средства	515	200	200	115	
	внебюджетные средства	Вклады коллаборантов. Средства по грантам. Вклады спонсоров. Средства по договорам. Другие источники финансирования и т.д.					

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА



Смета затрат по проекту

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

NN пп	Наименование статей затрат	Полная стоимость	1 год	2 год	3 год и далее
	Прямые расходы на Проект				
1.	Ускоритель, реактор, час.				
2.	ЭВМ, час.	3000	1000	1000	1000
3.	Компьютерная связь, тыс. долл.	15	5	5	5
4.	Конструкторское бюро, нормо-час	780	480	300	
5.	Опытное производство, нормо-час	1000	500	500	
6.	Материалы, тыс. долл.	70	30	35	5
7.	Оборудование, тыс. долл.	35	15	10	10
8.	Операционные расходы, тыс. долл.	105	35	35	35
9.	Оплата НИР, выполняемых по договорам, тыс. долл.				
10.	Командировочные расходы, тыс. долл, в т.ч.	290	115	115	60
	а) в страны нерублевой зоны	275	110	110	55
	б) в города стран рублевой зоны				
	в) по протоколам	15	5	5	5
	Итого по прямым расходам:	515	200	200	115

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР-ЭКОНОМИСТ ЛАБОРАТОРИИ

7. Сильные и слабые стороны, возможности, угрозы

Могут быть отмечены следующие сильные стороны продления проекта NA62:

- фундаментальная значимость научной программы;
- полностью действующий детектор NA62, построенный с существенным участием ОИЯИ;
- большой объём экспериментальных данных, собранных в 2016-2018 гг.;
- сильная поддержка продолжения сбора данных со стороны CERN;
- опыт физического анализа старших участников команды ОИЯИ;
- участие молодых учёных, которые в будущем принесут опыт CERN в проекты ОИЯИ;

Основная слабость вызвана временными трудностями перехода от преимущественно аппаратной деятельности к этапу анализа данных, на который накладываются продолжающиеся обязанности, связанные со спектрометром NA62. Эта слабость преодолевается посредством обучения молодых участников анализу данных с использованием существующего опыта других членов группы, полученного ранее в эксперименте NA48/2.

Нетривиальные возможности продления проекта заключаются в возможности улучшения измерений ряда редких мод распадов на основе большой статистики распадов каонов. Также есть шанс найти новую физику в случае, если новые результаты будут несовместимы с СМ. Кроме того, участие в разработке программного обеспечения и калибровке детекторов для NA62 повысит квалификацию молодых участников, которая может потребоваться в других экспериментах ОИЯИ.

В настоящее время неизвестно о конкуренции по измерению золотой моды распадов заряженных каонов. Так что угроз для научной значимости продления проекта нет.

8. Список литературы

1. NA62 COLLABORATION; F.Ambrosino et al. Proposal to Measure $K \rightarrow \pi \nu \nu$ rare decay at the CERN SPS. CERN-SPSC-2005-013, 2005.
2. NA62 COLLABORATION; F.Hahn et al. NA62 Technical Design Document. NA62-10-07, CERN, 2010, 414 pp.
3. Eduardo Cortina Gil *et al.* The beam and detector of the NA62 experiment at CERN. JINST 12 (2017) no.05, P05025.
4. NA62 COLLABORATION; F.Ambrosino et al. NA62 Status Report. CERN-SPSC-2007-035.
5. A.V.Artamonov et al. (E949 Collaboration). New Measurement of the $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ branching ratio. Phys. Rev. Lett. 101 191802, 2008.
6. D.S.Gorbunov, V.A. Rubakov. Phys.Rev.D73:035002, 2006.
7. J.Antos et al. Search for CP Violation in the Decays of $X^- X^+$ and Hyperons. Fermilab Proposal P-871. FNAL 1994.
8. O.G.Tchikilev et al. (ISTRA) Phys.Lett. B602:149-156, 2004.
9. T.Asaka and M.Shaposhnikov, Phys. Lett. B620 (2005) 17.
10. N.Azorskiy *et al.* A drift chamber with a new type of straws for operation in vacuum. Nucl.Instrum.Meth. A824 (2016) 569-570.
11. N.Azorskiy et al. The NA62 spectrometer acquisition system. JINST 11 (2016) no.02, C02064.
12. L.Glonti et al. Longitudinal tension and mechanical stability of a pressurized straw tube. Instruments 2 (2018) 4, 27.
13. L.Glonti *et al.* Determination of the anode wire position by visible light in a new type straw for NA62 experiment tracker. Nucl.Instrum.Meth. A824 (2016) 532-534.
14. R. Marchevski (NA62). New result on the search for the $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ decay at the NA62 experiment at CERN. 40th International Conference on High Energy physics. July 28 - August 6, 2020. Prague, Czech Republic (virtual meeting). PoS (ICHEP2020) 398. <https://pos.sissa.it/390/398/pdf>.
15. E.Cortina Gil *et al.* (NA62). First search for $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ using the decay-in-flight technique. Phys.Lett.B 791 (2019) 156-166.
16. E.Cortina Gil *et al.* (NA62). An investigation of the very rare $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ decay. JHEP 11 (2020) 042.
17. J.R.Batley *et al.* Searches for lepton number violation and resonances in $K^{\pm} \rightarrow \pi \mu \mu$ decays. Phys.Lett. B769 (2017) 67-76.
18. J.R.Batley *et al.* First observation and study of the $K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \pi^0 e^+ e^-$ decay. Phys.Lett.B 788 (2019) 552-561.
19. J.R.Batley *et al.* Measurement of the form factors of charged kaon semileptonic decays. JHEP 10 (2018) 150.
20. C.Lazzeroni *et al.* Measurement of the π^0 electromagnetic transition form factor slope.

Phys.Lett. B768 (2017) 38-45.

21. C.Lazzeroni *et al.* Search for heavy neutrinos in $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ decays. *Phys.Lett. B*772 (2017) 712-718.
22. E.Cortina Gil *et al.* (NA62). Search for heavy neutral lepton production in K^+ decays. *Phys.Lett.B* 778 (2018) 137-145.
23. E.Cortina Gil *et al.* (NA62). Search for heavy neutral lepton production in K^+ decays to positrons. *Phys.Lett.B* 807 (2020) 135599.
24. E.Cortina Gil *et al.* (NA62). Search for production of an invisible dark photon in π^0 decays. *JHEP* 05 (2019) 182.
25. E.Cortina Gil *et al.* (NA62). Searches for lepton number violating K^+ decays. *Phys.Lett.B* 797 (2019) 134794.
26. E.Cortina Gil *et al.* (NA62). Search for π^0 decays to invisible particles. *JHEP* 02 (2021) 201.
27. E.Cortina Gil *et al.* (NA62). Search for a feebly interacting particle X in the $K^+ \rightarrow \pi^+ X$ decay. *JHEP* 03 (2021) 058.
28. D. Madigozhin. Recent NA48/2 results on rare kaon decays. *EPJ Web Conf.* 206 (2019) 05001.
29. S. Shkarovskiy. New NA48/2 results on rare kaon decays. Excited QCD 2019 , Schladming, Austria, 30 Jan-3 Feb 2019.
30. D. Madigozhin. Latest results from NA48/2. 31st Rencontres de Blois, Blois, France, 2-7 Jun 2019.
31. E. Goudzovski. Kaon System: NA62. CLFV 2019 , Fukuoka, Japan, 17-19 Jun 2019.
32. D. Madogozhin. Latest results from NA48/2. 19th Lomonosov Conference, Moscow, Russian Federation, 22-28 Aug 2019.
33. N. Molokanova. Latest results from NA48/2. ICNFP 2019, Kolymbari, Greece, 21-29 Aug 2019. *IJMPA V.35, N36* (2020) 2044019.
34. A.Baeva. Searches for lepton flavour and lepton number violation in K^+ decays. *NUFACT2019 , Daegu, Korea, 26-31 Aug 2019. PoS NuFact2019* (2020) 077.
35. D. Madigozhin. New measurement of the $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$ decay at NA62. ICNFP 2020. Kolymbari, Creta, Greece, 4 Sep.-2 Oct. 2020.
36. E. Goudzovski. Search for heavy neutral lepton production at the NA62 experiment. ICHEP 2020. Prague, Czech Republic, 28 Jul-6 Aug 2020.
37. E. Goudzovski. HNL searches: NA62 and other experiments. NuPhys 2019, London, United Kingdom, 16-18 Dec 2019.
38. E. Goudzovski. Exotic searches at the NA62 experiment at CERN. KAON 2019, Perugia, Italy, 10-13 Sep 2019.

Дополнения

Отзыв рецензента на предложение о продлении проекта “Измерение редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ на CERN SPS (NA62)”

Вероятность редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ (порядка 10^{-10}) напрямую связана с параметрами матрицы ККМ, определяющими величину CP-нарушения. Этот теоретически чистый распад дает возможность обнаружить статистически значимое отклонение от Стандартной модели и открыть область новой физики.

Эксперимент NA62 в CERN SPS нацелен на измерение относительной вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ с точностью порядка 10%, что требует больших экспериментальных усилий. Прежде всего, необходимо с высокой точностью измерять заряженный пионный трек в условиях минимального кулоновского рассеяния. Поэтому ключевым элементом детектора NA62 является магнитный спектрометр, состоящий из лёгких дрейфовых трубок. Группа ОИЯИ вместе со специальной командой ЦЕРН отвечала за разработку, проектирование и производство этого спектрометра.

После установки спектрометра в 2014 году и ввода в эксплуатацию в 2015 году сбор физических данных проводился в 2016-2018 годах. В период длительной остановки LHC в 2019-2020 годах эксперимент перешел в стадию анализа физических данных. В настоящее время группа ОИЯИ участвует в извлечении физических результатов из собранных данных, включая дополнительные исследования редких четырехлептонных распадов заряженных каонов.

За период 2019-2021 гг группой ОИЯИ был проделан ряд работ, и были получены важные результаты. Было проведено первое наблюдение и исследование редкого распада $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$, установлены новые верхние пределы для квадратов матричных элементов $|\mu_4|^2$ и $|\mu_6|^2$ а также установлены новые пределы на константу связи гипотетического тёмного фотона с обычным фотоном. Дубненская группа получила вторую премию ОИЯИ в 2019 году за исследование редких распадов заряженных каонов.

Но наиболее важным достижением является результат NA62 по исследованию распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ основанный на данных, собранных в 2016-2018 годах. В данных, собранных в 2018 году, наблюдаются 17 кандидатов в сигналы. Вместе с ещё тремя кандидатами, зарегистрированными NA62 в 2016 и 2017 годах, это приводит к наиболее точному измерению относительной вероятности распада $BR(\text{распада } K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu) = (11.0^{+4.0}_{-3.5} \pm 0.3^{\text{sys}}) \times 10^{-11}$ что соответствует ожиданиям Стандартной модели. Группа ОИЯИ участвует в анализе фоновых мод распада, разработке программного обеспечения, калибровке и обслуживании детекторов.

В ходе будущего периода сбора данных, начиная с 2021 года, коллаборация NA62 планирует достичь своей прогнозируемой статистики (~ 100 событий) и точности (~ 10%) для измерения основной целевой моды распада. В настоящее время неизвестно о продолжающейся конкуренции в измерении этой моды.

Группа Дубны теперь включает в себя еще несколько молодых участников, работающих над анализом данных, что станет для них отличной школой.

Достигнутые результаты соответствуют финансовым затратам, выделенным на проект. Поддерживаю утверждение отчета за период 2019-2021 гг. Текущие и планируемые работы адекватны финансированию, которое будет выделено на проект в 2022-2024 годах, и я бы рекомендовал продлить проект NA62 в ОИЯИ на следующие 3 года.

Георгий Шелков
chelkov@jinr.ru

Отзыв на запрос о продлении проекта
“Измерение редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ на CERN SPS (NA62)”

Проект NA62 продолжает серию экспериментов по изучению распадов каонов с целью прецизионной проверки Стандартной Модели, получения новых знаний о природе CP-нарушения и поиске новой физики за пределами СМ.

Проект был предложен в 2010 году, его задачей является регистрация 100 событий сверх редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$. Принимая во внимание, что вероятность данного распада составляет 10^{-10} экспериментальная установка должна обеспечивать выполнение двух основных требований – подавление фона и возможность работы на высокоинтенсивном не сепарированном пучке K^+ .

Основным элементом предложенной экспериментальной установки является магнитный спектрометр с трековой системой созданной с использованием технологии строу трубок. Группа ОИЯИ внесла существенный вклад в разработку создание и ввод в эксплуатацию строу детекторов.

Осенью 2016 года экспериментальная установка была протестирована на канале CERN SPS. В Набор экспериментальных данных стартовал в 2016 году. К моменту остановки ускорителей CERN коллаборацией было зарегистрировано 20 сигналов – кандидатов изучаемого распада. На сегодня этот результат является наиболее точным измерением вероятности изучаемого распада $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu) = (11.0^{+4.0}_{-3.5} \pm 0.3_{\text{sys}}) \times 10^{-11}$.

Кроме этого коллаборация NA62 изучает ряд других редких распадов каонов. Группа ОИЯИ участвует в анализе нескольких 4-х лептонных мод распада с вероятностью порядка 10^{-8} , точное измерение которых расширит информацию о параметрах пертурбативной теории и подтвердит ее достоверность. Для проверки пределов СМ также ведется поиск запрещенных мод распадов.

Большая набранная статистика, в совокупности с высокой точностью измерений, позволяет проводить поиск редких распадов каонов которые могут указывать на существование суперсимметричного *sgolstino*, ассоциироваться с кандидатами на роль легкой темной материи, изучать возможное рождение тяжелых нейтральных лептонов и проводить проверку пределов Пертурбативной Киральной теории.

В ходе выполнения предыдущего этапа проекта при значительном участии группы ОИЯИ был получен овый верхний предел для нарушающего лептонное число распада $K \rightarrow \pi \mu^\pm \mu^\pm$ и был изучен редкий распад $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$, были получены наиболее точные измерения комбинированных форм-факторов распадов K_{e3} и $K_{\mu 3}$.

пределы на элементы матрицы смешивания тяжелых нейтрино $|U_{e4}|^2$ и $|U_{\mu 4}|^2$.

Полученные результаты были представлены участниками группы ОИЯИ на многих международных конференциях. Три публикации были выполнены подготовлены принципиальными со-авторами из ОИЯИ.

На мой взгляд, в настоящее время результаты группы ОИЯИ хорошо представлены в методической и научной областях. На основании предложения о продлении проекта можно сделать вывод, что коллектив представляющий ОИЯИ полностью интегрирован в эксперимент NA62, в том числе в набор и анализ экспериментальных данных.

Считаю запрошенные для обеспечения деятельности группы ОИЯИ финансовые ресурсы оправданными и адекватными.

Поддерживаю одобрение продления проекта.

к. ф.-м.н. Д.В.Пешехонов (peshekhonov@jinr.ru)

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized initials 'ДВ' followed by a flourish.