

Аннотация
проект СОМЕТ

Поиск когерентной безнейтринной μ -е конверсии на J-PARC

ЛЯП: В.Н. Дугинов, К.И. Грицаи, И.Л. Евтухович, П.Г. Евтухович, В.А. Калинин,
Х. Хубашвили, Е.М. Кулиш, А.С. Моисеенко, Б. М. Сабиров, А.Г. Самарцев, Ю.Ю.
Степаненко, З. Цамалаидзе, Н. Цверава, Е.П. Величева, А.Д. Волков

ЛФВЭ: В.В. Елша, Т.Л. Еник, С.А. Мовчан, С.Н. Шкаровский

ЛТФ: Ш. Биланишвили, Г.А. Козлов

ЛИТ: Г. Адамов, Т. Джавахишвили, А. Хведелидзе

Руководитель проекта
E-mail: zviadi@jinr.ru

З. Цамалаидзе

Проект COMET был одобрен в ОИЯИ на программном комитете по ядерной физике в 2014 году на период 2014-2016 гг. Ниже представлены результаты нашей активности и задачи, связанные с продлением проекта на 2017-2019 гг.

1. Физическая мотивация

Проект COMET (COherent Muon to Electron Transition) - это эксперимент по поиску когерентной безнейтринной конверсии мюона в электрон в присутствии ядра ($\mu^- \rightarrow e^-$ конверсия), $\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$, с чувствительностью регистрации одного события $\text{Br}(\mu\text{-}N \rightarrow e\text{-} N) \sim 10^{-17}$.

Переходы между заряженными лептонами с различными ароматами (Charged Lepton Flavor Violation, CLFV) способны сигнализировать об обнаружении явлений новой физики за пределами стандартной модели (СМ). Многие модели такой физики, базирующиеся на суперсимметричном великом объединении, суперсимметричных качелях и экстра-пространствах, требующие нарушения сохранения лептонных зарядов (ароматов), становятся доступными для проверки в будущих экспериментах.

В рамках существующей Стандартной модели относительная вероятность μ - e конверсии меньше чем 10^{-50} , что далеко за пределами возможностей экспериментального поиска. Поэтому наблюдение может быть ясным сигналом существования новой физики за пределами стандартной модели. Измерение $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии на уровне $< 10^{-16}$, что и является целью проекта COMET, в 10^4 раз улучшит существующую экспериментальную границу.

Помимо $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии имеются два других процесса, нарушающих закон сохранения лептонного заряда для заряженных лептонов, это распады $\mu \rightarrow e\gamma$ и $\mu \rightarrow eee$. Ожидается, что относительная вероятность $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии и $\mu \rightarrow eee$ распада меньше относительной вероятности распада $\mu \rightarrow e\gamma$ из-за электромагнитного взаимодействия виртуального фотона. Поэтому поиск $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии и $\mu \rightarrow eee$ распада на уровне 10^{-16} соответствует поиску распада $\mu \rightarrow e\gamma$ на уровне 10^{-14} . Диаграммы, описывающие эти процессы различны, поэтому эти три процесса имеют различную чувствительность к моделям за пределами стандартной. Таким образом указанные три процесса являются взаимно комплементарными.

Когда отрицательный мюон останавливается в каком-либо материале, он захватывается атомом и образуется мюонный атом. Далее мюон может распасться на орбите ($\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$) или быть захвачен ядром с массовым числом A и атомным номером Z с испусканием нейтрино $\mu^- + N(A, Z) \rightarrow \nu_\mu + N(A, Z-1)$. Тем не менее, в рамках физики за пределами стандартной также возможен процесс $\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$. Этот процесс нарушает закон сохранения лептонных чисел L_e и L_μ на единицу, оставляя общее число L неизменным.

Характерной особенностью процесса $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии в мюонном атоме является эмиссия моноэнергетического электрона с энергией $E = m_\mu - B_\mu - E_{rec}$, где m_μ -масса мюона, а B_μ , и E_{rec} энергия связи мюона в ядре и энергия отдачи ядра соответственно. Обе эти величины малы по сравнению с массой мюона, поэтому можно считать, что $E \approx m_\mu$.

С экспериментальной точки зрения $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсия является очень привлекательным процессом с нескольких точек зрения. Во-первых, энергия электрона около 105 МэВ, что значительно больше максимальной энергии электронного спектра от распада мюона на орбите (~ 52.8 MeV), во-вторых, поскольку электрон моно-энергичен, никаких измерений в совпадениях не требуется. Потенциально эти обстоятельства позволяют улучшить чувствительность используя высокоинтенсивный пучок мюонов, не имея при этом фона случайных событий, что является серьезным препятствием для распадов $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ и $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$.

2. СОМЕТ на ускорительном комплексе J-PARC

Эксперимент СОМЕТ будет осуществлен на ускорительном комплексе J-PARC. Будет использоваться импульсный протонный пучок, медленно экстрагируемый из основного ускорительного кольца. Экспериментальная установка состоит из секции, обеспечивающей эксперимент протонным пучком, секции, транспортирующей мюонный пучок и детектирующей секции.

Схема эксперимента следующая: протонный пучок с энергией 8 ГэВ ударяет по мишени, Специальная система из сверхпроводящих магнитов, создающих магнитное поле 5 Тесла направляет пионы, вылетающие из мишени в обратном направлении, в транспортную систему, вдоль которой пионы на лету распадаются на мюоны. Транспортная система, изогнутая в форме буквы С (C-shape), что обеспечивается использованием изогнутых и прямых соленоидов со сверхпроводящими обмотками, отбирает низко-энергичные мюоны и доставляет их к мишени, в которой они останавливаются. Электроны, возникающие в результате $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии пролетают в магнитном поле, создаваемом сверхпроводящим соленоидом, и попадают в детектор, состоящий из строу-трекера и электромагнитного калориметра. Детектирование вылетевшего из мишени электрона будет производиться между импульсами протонов, идущих от ускорителя, с определенной задержкой, чтобы избавиться от мгновенно возникающего фона.

3. Двухфазная реализация проекта СОМЕТ

Принимая во внимание риски амбициозной цели увеличения чувствительности измерений в 10000 раз, необходимо экспериментально изучить все ожидаемые фоновые процессы и возможные препятствия. С этой целью проект разделен на две фазы. Окончательная чувствительность, задекларированная в рамках проекта, будет достигнута в Фазе-II. В Фазе-I будут оценены экспериментальные условия и измерены все фоны, а также будет проведен поиск $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии с промежуточной чувствительностью.

Основные цели Фазы-I:

- 1) создание для СОМЕТ линии протонного пучка;
- 2) создание части линии транспортировки мюонного пучка (изогнутого на 90° сверхпроводящего соноида)
- 3) прямые измерения подавления протонов (proton extinction) между импульсами и других потенциальных источников фона для полномасштабного эксперимента СОМЕТ, используя реальную пучковую линию.
- 4) поиск $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии на уровне чувствительности 3.0×10^{-15} , что в 200 раз превышает существующую на данный момент границу.

В Фазе-I применяются менее жесткие требования к характеристикам детектора.

Фаза-II включает создание всех пучковых линий в полном масштабе и проведение поиска $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии на уровне чувствительности $3 \cdot 10^{-17}$ с учетом приобретенного опыта во время Фазы-I.

4. Система детектирования COMET

Система детектирования COMET включает следующие основные компоненты: электронный трекер, электромагнитный калориметр, системы защиты от космических лучей (система вето) и на Фазе-I также цилиндрический детектор. Все детекторы, за исключением системы вето, располагаются внутри большого соленоида, создающего магнитное поле величиной 1 Тесла.

Электронный трекер – детектор, состоящий из строу-трубок. Всего в него входят 5 модулей, отстоящих друг от друга на расстоянии 48 см, расположенных таким образом, что оси строу-трубок перпендикулярны оси соленоида. Каждый из пяти модулей состоит из четырех рядов строу-трубок. Система электронного трекера должна обеспечивать импульсное разрешение 0,15 МэВ/с и пространственное разрешение 150 мкм.

Электромагнитный калориметр состоит из сцинтилляционных кристаллов последнего поколения LYSO с большим свето-выходом и коротким временем высвечивания, всего калориметр содержит более 2000 кристаллов, каждый размером $20 \times 20 \times 120$ мм³. Калориметр должен иметь энергетическое и пространственное разрешение 5% и 1 см соответственно.

Электронный трекер и электро-магнитный калориметр на Фазе-I, будут использованы для изучения состава мюонного пучка и измерений фона, тогда как на Фазе-II – это основные детекторы для поиска $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии с самой высокой чувствительностью. Ввиду отсутствия транспортной системы электрона с закругленными соленоидами на Фазе-I, ожидаются большие загрузки этих детекторов, поэтому их использование для поиска $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии возможно только при низких интенсивностях протонного пучка.

Система вето от космики защитит основные детекторы от фона космического излучения. Она включает пассивную защиту из бетона и железа и активную защиту, состоящую из двух слоев пластиковых сцинтилляторов.

Цилиндрический детектор будет использоваться только на Фазе-I, В отличие от трекера и калориметра он не подвержен воздействию частиц пучка непосредственно. Поэтому цилиндрический детектор является подходящим инструментом для поиска $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии на Фазе-I, обеспечивая промежуточную чувствительность. Детектор состоит цилиндрической многослойной дрейфовой камеры, мишени, останавливающей мюоны и триггерного годоскопа.

5. Участие ОИЯИ в проекте COMET

Основной вклад ОИЯИ в COMET заключается в участии в создании двух основных детекторов – электромагнитного калориметра и строу-трекера, при этом очень заметным было также и участие в различных работах по моделированию.

5.1. Электромагнитный калориметр

На начальной стадии проекта COMET группа ОИЯИ предложила два типа сцинтилляционных кристаллов, GSO и LYSO, которые начали рассматриваться в коллаборации как наиболее реальные кандидаты. Чтобы оценить их адекватность для целей COMET, целый ряд исследований был осуществлен в ЛЯП ОИЯИ. Эти исследования показали преимущества кристалла LYSO, при том, что ограничивающим фактором была его более высокая

стоимость по сравнению с кристаллом GSO. Поэтому окончательное решение по выбору кристалла LYSO было сделано после тестирования прототипов калориметра, состоящих как из кристаллов GSO так LYSO на пучке электронов с учетом соотношения цена/характеристика. Кристаллы LYSO, использованные для прототипа, в количестве 50 шт. сначала были исследованы в ОИЯИ, измерялись такие характеристики как свето-выход, поглощение, однородность и т.п. Позже сотрудники ОИЯИ участвовали в сборке прототипа, измерениях на пучке, а после и в независимой обработке записанной информации тестирования. Сравнив полученные результаты, коллаборацией сделан выбор в пользу кристалла LYSO как базового кристалла калориметра.

Специальный стенд для измерения характеристик кристаллов был создан в ЛЯП. Стенд включает механические устройства для удаленного контроля перемещения кристалла, фотоумножители, пластиковые вето-счетчики, соответствующую электронику и программное обеспечение. Все кристаллы калориметра будут протестированы на этом стенде. ОИЯИ берет на себя полную ответственность за сертификацию кристаллов как для Фазы-I так и для Фазы-II. На Фазе-I только порядка четверти всех кристаллов будет использовано.

Продолжается также работа по дальнейшему исследованию свойств данного кристалла, различных вариантов светосбора, различных оберточных материалов и т.д.

На более поздней стадии сотрудники ОИЯИ примут участие в сборке, калибровке и тестировании калориметра.

5.2. Строу-трекер

Группа сотрудников ЛЯП ОИЯИ несет полную ответственность за производство строу-трубок для Фазы-I и проведение R&D для Фазы-II. Для производства тонких строу-трубок используется ультразвуковая сварка алюминизированного майлара. Разработанный ранее в ЛФВЭ метод сварки строу-трубок с толщиной пленки 36 мкм был модифицирован для сварки трубок с толщиной стенок 20 мкм. Минимальная толщина стенок является неотъемлемым требованием для СОМЕТ, что объясняется необходимостью минимизации многократного рассеяния. Были также модифицированы процедуры тестирования строу-трубок на течь, тестирования на давление и растяжение в соответствии с требованиями СОМЕТ. Новые стандарты тестирования были установлены.

В результате партия строу-трубок более 2500 штук длиной 120 и 160 см, диаметром 9,8 мм и толщиной стенок 20 мкм была произведена, протестирована и отправлена в Японию.

Следующим шагом в этом направлении является подготовка и проведение R&D работ строу-трубок для Фазы-II. Для Фазы-II мы должны освоить производство более тонких трубок с толщиной стенок 12 мкм и с меньшим диаметром 5 мм. С этой целью мы разрабатываем новый производственный участок в ЛЯП. Метод сварки остается прежним, но при этом целый ряд НИР потребуется для получения равномерного шва, учитывая тонкость стенок пленки и малость диаметра трубки.

Сотрудники ОИЯИ будут также участвовать в монтаже и тестировании полномасштабного трекера сначала для Фазы-I, а затем и R&D работ строу-трекера для Фазы-II.

Сотрудники ОИЯИ также участвуют в разработке дизайна строу-трекера – конструкции модулей, организации пространства внутри модуля с целью наиболее оптимального расположения модулей электроники считывания, соединения модулей в единый функциональный агрегат.

5.3 Моделирование и анализ данных

Для разработки строу-трекера и калориметра потребовался большой объем работ по моделированию, результаты этой работы отражены в главном документе COMET, который называется TDR (Technical Design Report) для Фазы-I. В частности для строу-трекера были получены значения эффективности и пространственного разрешения для различных условий: для трубок разного диаметра, разной толщины стенок, разного зазора между трубками. Для калориметра моделирование проводилось для двух типов кристаллов, GSO и LYSO, используя реальные оптические параметры.

Среди прочего были промоделированы такие характеристики как световыход и светосбор для различных отражающих материалов. Было найдено, что энергетическое разрешение для кристалла LYSO лучше и этот вывод был впоследствии подтвержден экспериментально.

Было проведено специальное моделирование функционирования основного ускорительного кольца комплекса J-PARC с целью его оптимизации с точки зрения достижения фактора подавления протонов между банчами ниже 10^{-9} , что является критическим требованием для COMET.

Данные, записанные в ходе тестирования на электронном пучке прототипов калориметра были обработаны независимо от аналогичной процедуры, произведенной японской стороной. Обе обработки показали, что кристалл LYSO обладает лучшими характеристиками.

В будущем мы планируем увеличить масштаб нашего участия в работах по моделированию и обработке и быть готовыми к приему данных и их обработке к моменту начала набора статистики.

6. Финансирование

Основную часть расходов по реализации проекта COMET несет японская сторона. Финансирование, необходимое для создания протонной пучковой линии, экспериментальной зоны и магнитной системы Фазы-I было выделено. Производство детекторов тоже в основном финансируется японской стороной, но при участии и других коллаборантов. Расходы ОИЯИ связаны с необходимостью создания нового производственного участка и проведения НИР по производству тонкостенных строу-трубок, покупке оборудования для него, а также разных материалов, включая часть кристаллов. Помимо ресурсов темы 03-2-1101-2010/2016 мы рассчитываем на поддержку из гранта Полномочного Грузии и Программы сотрудничества ОИЯИ-Беларусь.

7. Заключение

Эксперимент COMET в J-PARC направлен на поиск когерентного безнейтринного перехода $\mu^- + Al \rightarrow e^- + Al$ в мюонном атоме алюминия на уровне чувствительности $3 \cdot 10^{-17}$, соответствующем 90% уровню достоверности $< 10^{-16}$.

Двойная цель Фазы-I COMET включает i) изучение экспериментальных условий и различных источников фона и ii) непосредственно поиск $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии с промежуточной чувствительностью на уровне $3 \cdot 10^{-15}$, что в 200 раз лучше достигнутой на сегодня границы.

Роль ОИЯИ в проекте COMET заметна, и признана коллаборацией.

Как следствие, мы подаем заявку на продолжение в ОИЯИ текущего проекта “Поиск когерентной безнейтринной μ -e конверсии в J-PARC (проект COMET)” на 2017-2019 гг. Этот период совпадает с началом физических измерений Фазы-I, которое планируется на 2018-

2019 г., и подготовкой и проведение R&D работ для строу-трекера для Фазе-II, начало которой запланировано на 2021 год.

План работ по проекту

- | | |
|---|------------------|
| 1. Участие в сборке и тестировании строу-детектора для Фазы-I | 2017-2018 |
| 2. НИР по производству строу трубок с толщиной стенок 12 мкм и диаметром 5мм для Фазы-II | 2017-2018 |
| 3. Тестирование в ОИЯИ кристаллов для калориметра: | 2017-2019 |
| 4. Участие в разработке конструкции калориметра, его сборке и Тестировании: | 2017-2019 |
| 5. Участие в тестовых измерения на пучке компонент детектора: | 2017-2019 |
| 6. Создание в ЛИТ компьютерной фермы для СОМЕТ | 2017 |
| 7. Моделирование комплексной системы детектирования (трекер, калориметр) для определения аксептанса, ожидаемых ошибок, разработки алгоритма восстановления и т.д. | 2017-2019 |
| 8. Участие в сборке, наладке и тестировании всего детектора | 2017-2019 |
| 9. Участие в инженерных и физических сеансах | 2018-2019 |
| 10. Участие в сеансах по набору статистики и обработке данных | 2019 |

Оценка стоимости и ресурсов

Предложение по ресурсам, необходимым для осуществления проекта “Экспериментальный поиск когерентной безнейтринной μ -е конверсии на J-PARC (COMET)”, 2017-2019 гг.

Форма №26

| Приборы, оборудование, ресурсы, Источники финансирования | | Затраты в единицах (k\$). Требуемые ресурсы | Предложение Лаборатории по плану финансирования и ресурсам | | | |
|---|------------------|--|--|---------|---------|-----|
| | | | 1-й год | 2-й год | 3-й год | |
| Основ- ные | Компьютеры | 15 | 5 | 5 | 5 | |
| | Электрон. модули | 96 | 50 | 27 | 19 | |
| | Материалы | 320 | 110 | 110 | 100 | |
| Ресурсы | Часы | Констр. отдел | 800 часов | 300 | 300 | 200 |
| | | ЛЯП, Мастерские | 1200 часов | 500 | 500 | 200 |
| Источник финансирования | Бюджет | Расходы из бюджета (без з/п) | 587 | 217 | 194 | 176 |
| | | Грант Полномочного Грузии | 30 | 10 | 10 | 10 |
| | Внебюджетные | Программа сотрудничества ОИЯИ-Беларусь | 15 | 5 | 5 | 5 |

Руководитель проекта

Цамалаидзе З.

Смета затрат по проекту “Экспериментальный поиск когерентной безнейтринной μ -е конверсии на J-PARC (COMET)”, 2017-2019 гг.

Форма №29

| NN | Цель расходов от ЛЯП | Полная стоимость | 1 ^й год | 2 ^й год | 3 ^й год |
|----|-------------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Прямые расходы | | | | |
| 1. | Ускоритель | - | - | - | - |
| 2. | Вычисления | - | - | - | - |
| 3. | Конструкторский отдел | 800 часов | 300 | 300 | 200 |
| 4. | Мастерские ЛЯП | 1200 часов | 500 | 500 | 200 |
| 5. | Материалы | 320k\$ | 110 | 110 | 100 |
| 6. | Оборудование | 111k\$ | 55 | 32 | 24 |
| 7. | Контракты по НИР | - | - | - | - |
| 8. | Командировки: | | | | |
| | a) Во вне-рублёвую зону | 150k\$ | 50 | 50 | 50 |
| | b) По России | 6k\$ | 2 | 2 | 2 |
| | c) По протоколу | - | - | - | - |

Руководитель проекта

Цамалаидзе З.

Директор ЛЯП

Бедняков В.А

**Помощник директора
по экономическим вопросам**

Усова Г.А.