Содержание

Аннотация

Поиск двойного безнейтринного бета распада (**$0\nu\beta\beta$**) является одной из приоритетных задач современной физики. Его обнаружение будет иметь фундаментальное влияние не только на саму физику нейтрино, но и на физику элементарных частиц и космологию в целом. Это позволит определить природу нейтрино (майорановская или дираковская частица), протестировать иерархию нейтринных масс и, возможно, найти эффекты, происходящие с нарушением CP-инвариантности. Открытие $0\nu\beta\beta$ распада может пролить свет на причину преобладания в нашей Вселенной материи над антиматерией. Тем не менее, для определения эффективной массы майорановского нейтрино из измеренного значения вероятности $0\nu\beta\beta$ распада, необходимо с достаточной точностью знать величину ядерного матричного элемента (**ЯМЭ**). На сегодняшний день, теоретические расчеты ЯМЭ дают результаты, различающиеся в 2-3 раза, в зависимости от использованной модели ядра. Именно поэтому, в недавних рекомендациях **APPEC** (Европейский консорциум по физике частиц и астрофизике) [1] было рекомендовано интенсифицировать экспериментальные и теоретические усилия, направленные на улучшение вычислений ЯМЭ.

Целью данного проекта является проведение экспериментальных измерений мюонного захвата на нескольких дочерних, по отношению к кандидатам на $0\nu\beta\beta$ распад, ядрах. Получаемые результаты критически важны для проверки точности теоретических расчетов ядерных матричных элементов. Нашей группой, совместно с европейскими коллегами, была подана заявка на измерения обычного мюонного захвата (**ОМЗ**) на нескольких изотопах на мезонной фабрике Института Пауля Шеррера (PSI) в Швейцарии. Данное предложение было рассмотрено и одобрено программным комитетом PSI в январе 2020. Пучковое время предоставлено в 2020 году для предварительного исследования ^{136}Ba (дочернее ядро для ^{136}Xe) с дальнейшей программой измерений, как минимум, на три года. Данный проект продолжает и расширяет предшествующую программу измерений ОМЗ, предложенную и осуществляемую под руководством сотрудников ОИЯИ в период с 1998 по 2006 годы. Наша группа, в свою очередь, имеет богатый опыт в прецизионной ядерной спектроскопии и реализации экспериментов по изучению не только редких процессов, но и экспериментов, связанных с изучением мюонного захвата.

В период с 2020 по 2022 гг., планируется провести измерения ОМЗ для изотопов ^{136}Ba, ^{76}Se и ^{96}Mo. ОМЗ на ^{136}Ba и ^{76}Se имеет особое значение для запланированных ведущих экспериментов по поиску $0\nu\beta\beta$ распада – ^{136}Xe - nEXO, KamLAND2-Zen, NEXT, DARWIN и PandaX-III – и ^{76}Ge – LEGEND. Кроме того, мы собираемся провести измерения изотопов ^{40}Ca, ^{56}Fe, ^{32}S и ^{100}Mo, результаты которых важны для экспериментальной проверки корректности теоретических расчетов, а также могут быть полезны для астрофизики. ОИЯИ будет играть ведущую роль в эксперименте. За исключением экспериментальной инфраструктуры на ускорительном комплексе, которая будет обеспечена нашими коллаборантами, все остальное проведение проекта будет проходить под нашим руководством. Для успешной реализации проекта планируется приобрести: изотопы для обогащенных мишеней, детекторы и, частично, необходимую электронику. Нами будет выполнено создание и производство самих мишеней и системы активной мюонной фильтрации экспериментальных данных. Дополнительно предстоит покрыть затраты на командировки для проведения самого эксперимента и совещаний по анализу данных. Затраты оцениваются в ~$378,000 на 3 года программы.

1. Введение

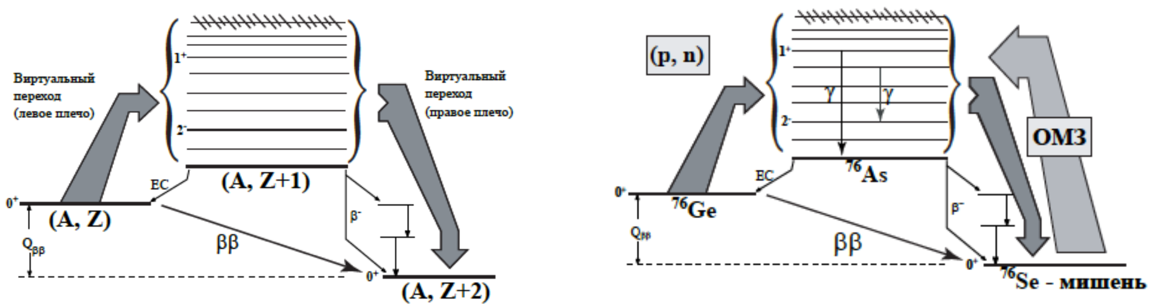
На сегодняшний день одной из основных теоретических проблем, связанных с поиском двойного безнейтринного бета-распада (**0νββ**) является проблема определения массы майорановского нейтрино из полученной вероятности процесса (или в случае установления ограничения на его период соответствующего ограничения на массу).

Скорость двойного безнейтринного бета-распада обычно записывают в следующем виде:

$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = G^{0\nu}|M^{0\nu}|^2\langle m_{\beta\beta}\rangle^2,$$

где $G^{o\nu}$ – фактор фазового объема, $m_{\beta\beta}$ – эффективная масса майорановского нейтрино, а $M^{o\nu}$ – ядерный матричный элемент (**ЯМЭ** - интеграл перекрытия волновых функций начального и конечного состояния). К сожалению, последний пока не удается вычислить с достаточной точностью.

В случае двойного бета-распада (**ДБР**) переход осуществляется с изменением Z на два, через виртуальные состояния промежуточного ядра (см. Рис. 1а), что создает дополнительные сложности для вычислений. Вместе с тем, можно попробовать получить возбуждённые состояния промежуточного ядра в каком-то другом процессе, комплементарном к изучаемому. В качестве такого процесса могут рассматриваться, например, зарядово-обменные реакции или захват мюона ядром, дочерним по отношению к ДБР (см. Рис. 1б). Во втором случае дополнительным преимуществом выступает то, что, являясь массивной частицей, мюон практически всю свою энергию, передаёт ядру, позволяя возбуждать состояния вплоть до гигантского дипольного резонанса. Тогда вероятности захвата можно одновременно рассчитывать, пользуясь теми же моделями, что и в случае ДБР, и измерять экспериментально.



(а) (б)

Рисунок 1. (а) – 2β-распад ядра (A,Z), описанный двумя последовательными виртуальными переходами через возбужденное состояние ядра (A, Z+1); (б) – схема 2β распада ядра ^{76}Ge, через виртуальные переходы возбужденных состояний промежуточного ядра ^{76}As.

Таким образом, мюонный захват является уникальным способом исследования волновых функций возбужденных состояний промежуточного ядра, относящегося к 0νββ распаду.

Целью проекта **MONUMENT** (Muon Ordinary Capture for the Study of Nuclear Matrix Elements) является исследование обычного мюонного захвата (**ОМЗ**) в изотопически-обогащенных ^{136}Ba, ^{100}Mo и ^{96}Mo, а также уточнение полученных ранее результатов по ^{76}Se. Основным используемым методом является высокопрецизионная пучковая спектроскопия с использованием полупроводниковых детекторов из высокочистого германия. В качестве дополнительных задач рассматривается получение полных и парциальных вероятностей ОМЗ в более легких элементах типа ^{40}Ca, ^{56}Fe и ^{32}S, а также определение выходов продуктов реакции мюонного захвата в этих ядрах. Помимо этого, запланировано получение мезорентгеновских спектров излучения по исследуемым ядрам и добавление их в существующий электронный атлас таких спектров (http://muxrays.jinr.ru).

Для реализации поставленных задач предлагается экспериментальная программа, рассчитанная на три года исследований с измерениями на мезонной фабрике PSI (Швейцария).

2. Состояние исследований

2.1. Состояние исследований, конкурирующие проекты, обоснования необходимости исследований.

Настоящий проект является следующим этапом осуществляемых нашим коллективом в 1998-2006 и 2017-2019 годы систематических исследований обычного захвата отрицательных мюонов (ОМЗ).

В настоящий момент в мире не так много мест пригодных для исследования мю-захвата (особенно на экстремально тонких мишенях обогащенных изотопов). В течение ряда лет (1998-2006) наша группа была единственной в мире, которая занималась работами по данной тематике на пучках мюонов μE4 и μE1 в Институте Пауля Шеррера (**PSI**, Швейцария).

Исследования проводились на базе ОИЯИ под руководством Егорова В.Г., а также они были поддержаны грантом РФФИ № 02-02-16800, который был успешно реализован в 2002-2003 гг.; грантом РФФИ №06-02-16587, который был успешно реализован в 2006 г. Проект был закрыт после 2007 года в связи с капитальной реконструкцией мюонных трактов в PSI (Швейцария). Однако, вопрос теоретических расчетов ЯМЭ с целью уточнения ядерных моделей по-прежнему остается очень актуальным. Для интерпретации полученных расчетов вновь понадобились экспериментальные данные, а именно результаты по ОМЗ. В связи с этим, программа исследований была возобновлена нашей группой в 2017 году. Нашими японскими коллегами было предложено присоединиться к их группе с целью измерения ОМЗ на различных ядрах для ДБР на пучке отрицательных мюонов MUSIC (Осака, Япония).

Этот новый проект был поддержан грантом РФФИ № 18-32-00383 (Мой первый грант), и успешно осуществлен, но с некоторыми замечаниями:

1) Пучок отрицательных мюонов на экспериментальной установке MUSIC не является достаточно монохроматичным, чтобы точно определить парциальные вероятности при заселении связанных состояний ядра в ОМЗ.

2) Время для измерений ОМЗ, предоставляемое комитетом по распределению пучка составляет не более 3-4 дней, что явно недостаточно для получения хорошей статистики по ОМЗ.

В результате нашей группой было возобновлено сотрудничество с **PSI** (Филлиген, Швейцария). Как оказалось, новый пучок отрицательных мюонов piE1 (с моментом 20-28 МэВ/с), используется группой по исследованию редких мезорентгеновских переходов в радиоактивных изотопах. Эта группа согласилась поддержать наши исследования. В рамках этого сотрудничества в октябре 2019 года были проведены тестовые измерения газовых мишеней ^{130}Xe и ^{82}Kr, а также твердой мишени ^{24}Mg. Анализ полученных данных продолжается.

В связи с сохранением горячего интереса к вопросу исследования свойств нейтрино с помощью двойного безнейтринного бета-распада, было предложено продолжить программу по исследованию мюонного. В декабре 2019 нашей группой была подана заявка на получение отдельного пучкового времени в PSI. В коллаборацию, помимо сотрудников ОИЯИ, вошли коллеги из Германии, Швейцарии, Японии, США и Финляндии. Предлагаемая программа была поддержана 30 января 2019 года программным комитетом PSI. Пучковое время было официально предоставлено уже в 2020 году для предварительного исследования ^{136}Ba (дочернее ядро для ^{136}Xe) с дальнейшей программой измерений, как минимум, на три года (письмо с поддержкой от Проф. K.Kirsch в приложениях).

Документальное подтверждение необходимости проведения предлагаемых в данном проекте измерений можно найти в следующих работах [1-7].

На сегодняшний день, теоретические расчеты ЯМЭ дают результаты, различающиеся в 2-3 раза, в зависимости от использованной модели ядра. Именно поэтому, в недавних рекомендациях APPEC (Европейский консорциум по физике частиц и астрофизике) [1] было рекомендовано интенсифицировать экспериментальные и теоретические усилия, направленные на улучшение вычислений ЯМЭ.

В работах [2-4,7] описано, как исследования мю-захвата могли бы быть использованы для расчетов ЯМЭ, а также для исследования свойств нейтрино.

В работах [4-6] представлен обзор исследований по молибдену-100, а также описана необходимость исследования ОМЗ на этом ядре с целью изучения астрофизических свойств нейтрино.

В работе [7] также приведено сравнение экспериментальных результатов по Se-76, полученных нашей группой ранее, с теоретическими расчетами. Наблюдается очень хорошее согласие теории и эксперимента. Для уточнения этих расчетов в данном проекте предлагается провести повторные измерения мюонного захвата с обогащенным ^{76}Se, с целью увеличения статистики и предоставления теоретическим группам по расчетам ЯМЭ более прецизионных результатов.

Наконец, работы [8-16] детально иллюстрируют все подходы и методы, разработанные нашей группой в ОИЯИ по исследованию ОМЗ, с приложенными итоговыми результатами по некоторым ядрам.

Что же касается конкурирующих исследований в этой области, то в настоящий момент нашей группой неизвестно о существовании таковых. Единственным потенциально конкурирующим исследованием могли бы быть (p,n) и (n,p) зарядово-обменные реакции.

Экспериментально проверить возбужденные состояния промежуточного ядра с высокой энергией и мультипольностью достаточно трудно. Исследования в этой области показали, что для проверки “левого плеча” (виртуальные переходы из материнского для $0\nu\beta\beta$-распада ядро в промежуточное, см. также Рис. 1) в распаде ^{76}Ge, например, можно было бы использовать зарядово-обменную (p,n) реакцию: ^{76}Ge($^{3}He,t$)^{76}As [17], а (n,p) реакцию для исследования “правого плеча” (виртуальные переходы из промежуточного в дочернее для $0\nu\beta\beta$-распада ядро, см.

также Рис. 1): ^{76}Se$(d,^{2}He)^{76}$As [18]. Но сравнение полученных экспериментальных результатов не имело успеха в связи с тем, что заселение возбужденных состояний промежуточного ядра слева резко отличалось от заселения справа. Теоретические расчеты этих экспериментов тестировались с помощью вероятностей 2νββ-распада, т.к. основное заселение приходилось на гаммов-теллеровские переходы промежуточного ядра. Зарядово-обменные реакции, в силу сильного взаимодействия и сложности подбора углового момента во время эксперимента, не могут обеспечить достаточной экспериментальной информации о заселении возбужденных состояний с высокой мультипольностью. При сравнении экспериментальных данных с теоретическими расчетами по 0νββ каналу [19] было выявлено некое несоответствие применяемых теоретических моделей. С этой точки зрения для проверки применимости зарядово-обменных реакций и различных моделей необходима другая независимая экспериментальная информация.

В этом случае именно **мюонный захват** является хорошей альтернативой (p,n) и (n,p) реакциям [20] за счет того, что он протекает при высоком передаваемом моменте (q ≈ 100 МэВ/c), как и безнейтринный двойной бета-распад, и может заселять возбужденные состояния промежуточного ядра с широким спектром энергий и мультипольностей в отличие от 2νββ - и β-распадов, протекающих с низким передаваемым моментом (q ≈ несколько МэВ/c). Таким образом, $0\nu2\beta$-распад и мюонный захват на практике являются схожими: оба процесса, например, способны к возбуждению высоколежащих ядерных состояний с мультипольностью J^p выше 1. Обычный мюонный захват может протекать через аналогичные переходы для 0νββ -распада либо из дочернего ядра (0νββ -распад с испусканием электрона), либо в родительское ядро (эмиссия позитрона/электронный захват).

2.2 Список литературы

1. APPEC: Astroparticle Physics European Consortium, arXiv:1910.04688; https://www.appec.org/news/neutrinoless-double-beta-decay-report-from-the-appec-committee
2. J. Suhonen and N. Kortelainen, "Muon-capture rates and their relation with the double-beta decay", Czech.J.Phys. 56 (2006) 519-525
3. J. Suhonen and O. Civitarese, Phys. Rep. 300, 123 (1998).
4. H. Ejiri, J. Suhonen, and K. Zuber, Phys. Rep. 797, 1 (2019).
5. Ejiri, H. Phys.Rep. 338 (2000) 265 and refs. therein
6. I.H.Hashim, H.Ejiri, T.Shima, A.Sato, Y.Kuno, N.Kawamura, S.Miyake, K.Ninomiya; "Muon capture reaction on 100Mo to study nuclear responses for double beta decays and astro-neutrinos", arXiv:1707.08363
7. L. Jokiniemi and J. Suhonen, Phys. Rev C 100, 014619 (2019)
8. Ordinary muon capture studies for the matrix elements in $\beta\beta$ decay / D. Zinatulina, V. Brudanin, V. Egorov et al. // Phys. Rev. C . --- 2019 . --- Feb . --- Vol. 99 . --- P. 024327.
9. μCR42β: Muon capture rates for double-beta decay / *V. G. Egorov, V. B. Brudanin, K. Ya. Gromov et al.* // Czechoslovak Journal of Physics . - 2006 . - May . - Vol. 56, no. 5 . - Pp. 453–457.
10. Ordinary muon capture (OMC) studies by means of γ-spectroscopy */ D. Zinatulina, V. Brudanin, V. Egorov et al.* // AIP Conf. Proc . - 2017 . - Vol. 1894, no. 1 . - P. 020028.
11. Muon capture in Ti, Se, Kr, Cd and Sm / *D. Zinatulina, K. Gromov, V. Brudanin et al.* // AIP Conf. Proc . - 2007 . - Vol. 942 . - Pp. 91–95.
12. OMC studies for the matrix elements in $\beta\beta$ decay / *D. Zinatulina, V. Brudanin, Ch. Briançon et al.* // AIP Conf. Proc . - 2013 . - Vol. 1572 . - Pp. 122–125.

13. Muon capture rates in Se and Cd isotopes / *D. R. Zinatulina, K. Ya. Gromov, V. B. Brudanin et al.* // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics . - 2008 . - Jun . - Vol. 72, no. 6 . - Pp. 737–743.
14. Negative-muon capture in ^{150}Sm / *D. R. Zinatulina, Ch. Briançon, V. B. Brudanin et al.* // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics . - 2010 . - Jun . - Vol. 74, no. 6 . - Pp. 825–828.
15. Electronic catalogue of muonic X-rays / *D. Zinatulina, Ch. Briançon, V. Brudanin et al.* // EPJ Web Conf . - 2018 . - Vol. 177 . - P. 03006.
16. Электронный каталог мезорентгеновских спектров излучения/ *Д. Зинатулина* //Ядерная Физика. - 2019. - Vol. 82, no. 3. - Pp. 228-234
17. The (^{3}He,t) reaction on ^{76}Ge, and the double-β-decay matrix element / *J. H. Thies, D. Frekers, T. Adachi et al*. // Phys. Rev. C 86 (2012) 014304
18. The (d,^{2}He) reaction on ^{76}Se and the double-β-decay matrix elements for A=76 / *E.-W. Grewe, C. BÅNaumer, H. Dohmann et al.* // Phys. Rev. C 78 (2008) 044301
19. Neutrinoless $\beta\beta$ nuclear matrix elements using isovector spin-dipole J^p=2^- data / *L. Jokiniemi, H. Ejiri, D. Frekers, J. Suhonen* // Phys. Rev. C 98 (2018) 024608
20. Ordinary muon capture as a probe of virtual transitions of $\beta\beta$ decay / *Kortelainen M., Suhonen J. //* Europhys. Lett. 58 (2002) 666.
21. Nuclear spin isospin responses for low-energy neutrinos / *H. Ejiri* // Phys. Rept. 338, 265-351 (2000).
22. Muon capture reaction on ^{100}Mo to study the nuclear response for double-beta decay and neutrinos of astrophysics origin / *I. H. Hashim, H. Ejiri, T. Shima, K. Takahisa, A. Sato, et al.*// Phys. Rev. C97, 014617 (2018).

3. Описание предлагаемого исследования

3.1. Методы исследования и экспериментальная установка

Идея экспериментов по мюонному захвату основана на точном измерении время-энергетического распределения γ-лучей после захвата мюона. Эти распределения предоставляют богатую экспериментальную информацию, и все они являются полезным вкладом в расчеты ЯМЭ для ДБР. Полные скорости мюонного захвата конкретными изотопами определяются путем анализа временного распределения задержанных γ-квантов. С помощью баланса интенсивностей задержанных гамма квантов извлекаются парциальные вероятности мюонного захвата на связанные состояния дочернего ядра. Выходы короткоживущих изотопов получены с использованием офлайн измерений. Важным побочным продуктом измерений являются спектры мезорентгеновского излучения. Они являются неустранимым фоном в наших измерениях и используются при идентификации энергетических спектров, а также при нормировке.

3.1.1 Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (Рис. 2) включает в себя мишенную систему с входным окном C0, являющимся сцинтилляционным счётчиком, работающем в двухпороговом режиме для разделения входящих мюонов и присутствующих в пучке электронов. Режим с низким энергетическим порогом соответствует прохождению мюонов, а режим с высоким порогом - электронов (последние, являясь нерелятивисткими частицами оставляют в детекторе существенно большую энергию).

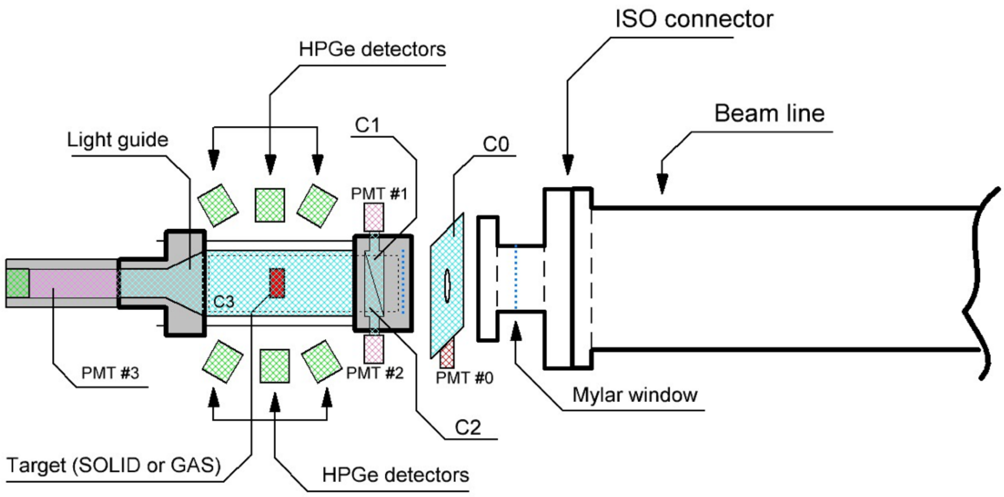


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки: формирующее входное окно (сцинтилляционный вето-счетчик C0), пролетные счетчики (C1, C2), сама мишень, вето-счетчик (C3) и HPGe γ-детекторы, расположенные вокруг мишени. Корпус мишени сконструирован для размещения как твердых, так и газообразных материалов.

Далее пучок проходит два тонких проходных счётчика C1, C2, а затем либо останавливается в мишени, либо вылетает, давая срабатывание окружающего мишень счётчика C3. Таким образом, можно с высокой точностью установить поглощение мюона в веществе мишени. Так как счётчик C3 сделан из материала с низким Z, он не оказывает существенного влияния на поглощение результирующего гамма-излучения вплоть до энергий ~ 20 кэВ. Мишенная система сконструирована таким образом, что позволяет измерять как твёрдые, так и газообразные мишени. Эта конструкция уже была нами опробована во время тестового сеанса в октябре-ноябре 2019 г. и доказала свою эффективность. Гамма-излучение, снимающее возбуждение ядер, получившихся в процессе захвата мюона, регистрируется несколькими германиевыми детекторами.

Настройка пучка происходит таким образом, чтобы максимизировать мезо-рентгеновское излучение от изотопов мишени, что соответствует наибольшему поглощению мюонов в интересующем ядре и минимальному в окружающем веществе. При типичных условиях более 95% входящих частиц останавливаются в самой мишени. Типичная загрузка установки по входящему пучку составляет ~ 20 – 40 кГц в то время, как загрузка по полупроводниковым детекторам не превышает 2 кГц, что является комфортным режимом их использования.

3.1.2 Детектирующая система

Процесс обычного мюонного захвата сопровождается следующим характеристическим излучением. На первом этапе мюон, остановившись возле какого-то из ядер мишени, попадает на ридберговское состояние и практически мгновенно после этого, последовательно опускается в 1s-состояние, испуская при этом каскад мезорентгеновских фотонов (μX). Заметим, что поскольку мюон существенно тяжелее электрона, это излучение оказывается сдвинуто в жёсткую область до энергий в несколько МэВ. Далее, мюон может распасться с вылетом высокоэнергетичного электрона или захватиться ядром с последующем вылетом одного или нескольких нейтронов. Любой из этих процессов является фоновым по отношению к изучаемому, при котором вылета других вторичных частиц кроме фотонов не предполагается. Тем не менее, благодаря хорошему энергетическому разрешению полупроводниковых детекторов такие процессы оказывается возможным отсеять. В любом случае, дочернее ядро обычно также оказывается в возбуждённом состоянии и разряжает его вылетом гамма-квантов.

Для детектирования гамма-излучения используются несколько германиевых детекторов разных типов, расположенных на расстоянии 10-15 см от мишени.

Среди них:

1. Три детектора n-типа с бериллиевым входным окном для регистрации мягкого гамма-излучения. Два из них уже находятся в PSI и ещё один предполагается к покупке.
2. Два инвертированных коаксиальных детектора p-типа большого объёма для регистрации фотонов с энергиями до нескольких МэВ, один предоставленный группой из Технического университета Мюнхена (TUM) и один также предлагаемый для покупки.
3. Несколько детекторов типа BEGe (Broad Energy Germanium) также способные измерять высокоэнергетичные фотоны, предоставленные группой TUM. Эти детекторы будут очень полезны для увеличения геометрической эффективности установки и возможного изучения угловых коррреляций и каскадных гамма-квантов.

3.1.3 Система набора данных.

Система набора данных (DAQ) будет базироваться на уже использовавшейся в экспериментах такого рода группой muX и протестированной нами в процессе тестового набора данных в 2019 г. Её основой являются 16-ти канальные модули оцифровки сигналов Struck SIS3316 [http://www.struck.de/sis3316.html] с разрешением 14 бит и частотой сэмплирования 250 МГц. Модули настроены на обработку сигналов с предусилителей используемых детекторов. Для сигналов с детекторов небольшого объёма могут использоваться быстрые усилители для лучшего соответствия динамическому диапазону модуля. В процессе первоначального анализа данных с помощью ПЛИС (Программируемая логическая интегральная схема, FPGA) используется трапецеидальный фильтр, позволяющий получить хорошее энергетическое разрешение даже в условиях работающего ускорителя. Во время тестовой кампании энергетическое разрешение практически всех детекторов не превышало 3 кэВ для энергии 1,3 МэВ. Сигналы для записи триггеров, временных отметок, волновых форм передаются по оптоволоконному кабелю и записываются со скоростью 5 Мб/с. Поскольку запись волновой формы сигнала имеет смысл только для германиевых детекторов для экономии места остальные сигналы записываются уже в полностью в оцифрованном виде. DAQ полностью интегрирована в уже используемую в PSI систему анализа данных MIDAS, что позволяет упростить последующий анализ.

3.2. Предварительные измерения

Как уже упоминалось в гл. 2, в течение двухнедельного периода в октябре 2019 года в сотрудничестве с экспериментальной muX-группой мы провели тестовое измерение мюонного захвата с газовыми мишенями ^{82}Kr и ^{130}Xe, а также с твердой мишенью ^{24}Mg. По итогам измерений было решено несколько следующих задач: во-первых, это позволило нам проверить, насколько хорошо можно наблюдать и идентифицировать возникающие связанные состояния ОМЗ, используя существующие настройки и DAQ (предоставленный на тот момент нам muX-группой); во-вторых, это дало возможность оценить ситуацию с оптимизацией работы HPGe детекторов. Наконец, мы подтвердили, что существующая экспериментальная конфигурация позволяет нам получить достаточную статистику, а также получать энергетические спектры хорошего качества. Детальный анализ полученных данных продолжается, тем не менее проведенное тестирование мы считаем успешным.

Все регистрируемые события сортируются на коррелированные и некоррелированные, в зависимости от совпадения/антисовпадения останавливающегося мюона в ядре мишени в определенном временном окне *W* (0 - 2 с в зависимости от мишени). Некоррелированные спектры содержат гамма-линии из природного (^{40}K, U- и Th-цепей) и техногенного (^{60}Co, ^{137}Cs) фона и в основном используются для калибровок и мониторинга. К тому же, интенсивности гамма-линий некоторых продуктов ОМЗ могут быть определены из некоррелированных спектров, что позволяет нам извлекать выходы соответствующих изотопов/изомеров (анализ в ходе выполнения). Предварительные энергетические спектры от магниевой мишени показаны на рис. 3.

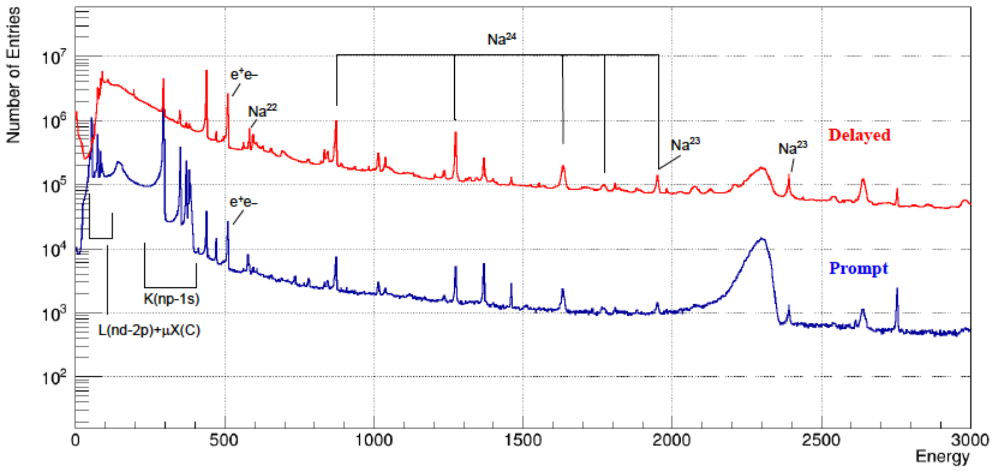


Рисунок 3. Коррелированные мезорентгеновский (синий) и задержанный (красный) спектры, измеренные с помощью обогащенной мишени ^{24}Mg. На рисунке указаны некоторые идентифицированные гамма-переходы, а также мезорентгеновские переходы магния (K (np-1s) и L (nd-2p) серии) и углерода (mX(C)).

Обычно полную скорость мю-захвата в мишени определяют, регистрируя электроны от распада мюонов и изучая их распределение во времени. В наших измерениях проводилась регистрация не электронов от распада мюона, а гамма-лучей от его захвата. При этом, настроившись на определенную гамма-линию и проследив временную эволюцию ее интенсивности (см. Рис. 4) удается полностью игнорировать остановки мюонов в любых других атомах, кроме исследуемых, что позволяет получать точность лучше 1%. Данная методика является уникально была разработана и использована впервые нашей группой. Предварительный результат полной скорости мюонного захвата на ^{24}Mg показан на Рис.5.

Баланс интенсивностей гамма-линий задержанного излучения (Delayed, см. Рис. 3) по отношению к мезорентгеновскому излучению (Prompt, см. Рис. 3) позволяет получать парциальные вероятности (скорости) и мюонного захвата отдельных возбужденных состояний дочернего ядра. Prompt и Delayed спектры (рис. 3) могут быть разделены различными способами путем изменения временных интервалов (например, чтобы упростить процедуру идентификации гамма-линий в спектрах задержанного излучения Delayed). Полные и парциальные скорости мюонного захвата для ^{130}Xe, ^{82}Kr и ^{24}Mg будут получены методом, описанным в [8-11] п. 2.2.

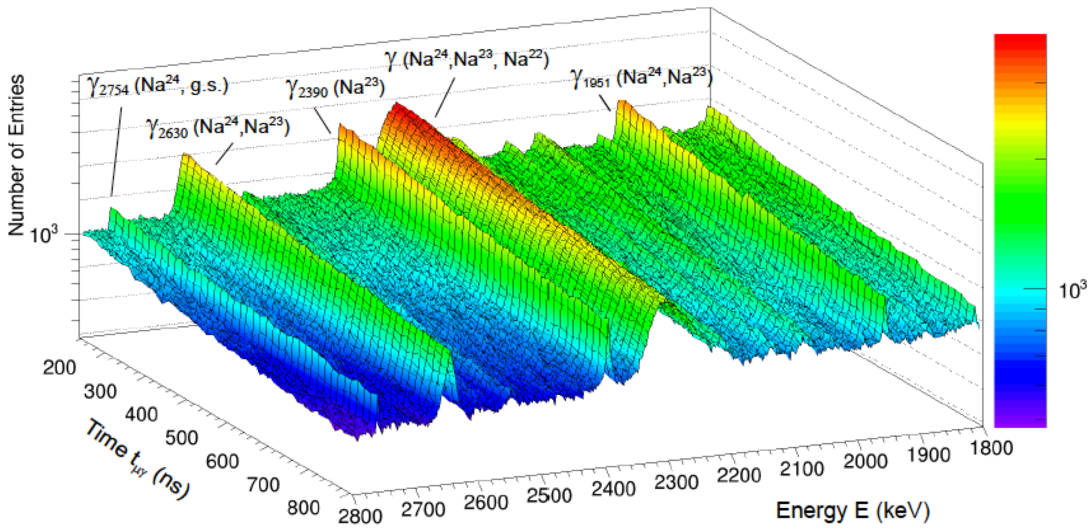


Рисунок 4. (E, t) распределение коррелированных событий, измеренных с мишенью ^{24}Mg. На рисунке указаны некоторые гамма-переходы, соответствующие захвату мюона в ядре, прослеживая временную эволюцию которых определяются полный скорости мюонного захвата.

Силовая функция распределения ОМЗ будет определяться на основе полученных результатов, а также выходов продуктов реакции ОМЗ из некореллированных спектров излучения, полученных в режиме оффлайн измерений с использованием расчетной модели. Протон-нейтронная модель распадов в результате ОМЗ была разработана нашими коллаборантами I.H.Hashim, S.A.Hamzah, F.Othman и H.Ejiri (см. п 2.2. [21-22]).

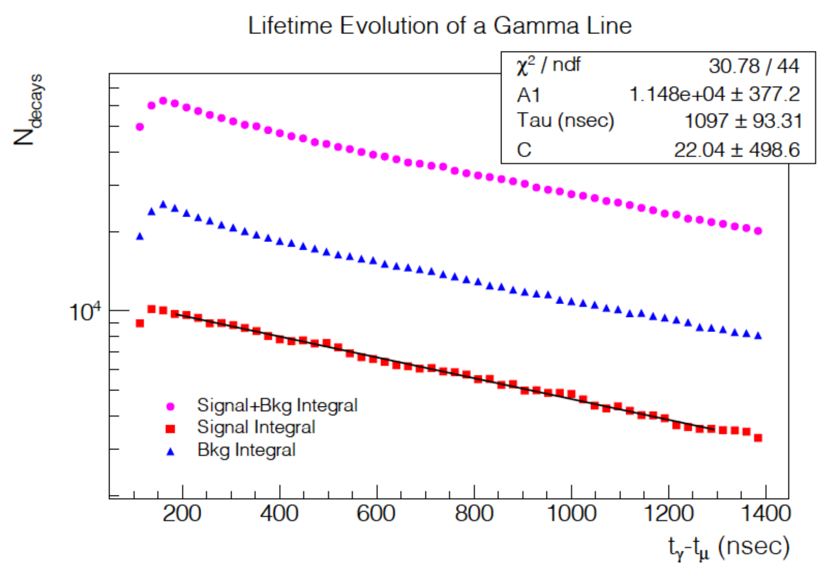


Рисунок 5. Временная эволюции гамма-линии 2390,6 кэВ, измеренная с мишенью ^{24}Mg. Фиолетовая кривая отражает эволюцию интеграла центральной части фрагмента (сама линия + фон под ней); синий кривая - площадь фона вокруг линии; красная кривая отражает эволюцию самой гамма-линии, фитированной Гауссианом с пятью параметрами по каждому временному срезу.

3.3 Ожидаемые результаты научного исследования и их научная и прикладная значимость

1. Впервые будут получены значения полных и парциальных скоростей ОМЗ в изотопе ^{136}Ba и ^{96}Mo, являющиеся основой новых расчетов ЯМЭ для двойного бета-распада ^{136}Xe и ^{96}Zr.

2. Впервые будут получены значения полных и парциальных скоростей ОМЗ в легких изотопах ^{40}Ca, ^{56}Fe и ^{32}S, необходимые для интерпретации и оптимизации расчетных моделей ЯМЭ для $0\nu\beta\beta$-распада.

3. Впервые будут получены значения парциальных вероятностей ОМЗ в изотопе ^{100}Mo для расчета ЯМЭ с точки зрения поиска Сверхновой.

4. Будут уточнены ранее полученные значения полных и парциальных скоростей захвата в обогащенном изотопе ^{76}Se и проведено сравнение этих результатов с теоретическими расчетами ЯМЭ, а также их интерпретация относительно различных моделей.

5. Будут получены значения выходов различных изотопов, нарабатываемых в результате мюонного захвата в вышеуказанных мишенях.

6. Полученные мезорентгеновские спектры излучения исследуемых мишеней дополнят существующую электронную библиотеку μX спектров, созданную в нашем отделе (http://muxrays.jinr.ru) и используемую группами, связанными с мюонной физикой.

7. Полученные результаты будут опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах, а также представлены на международных конференциях.

3.4 План-график исследований, работы со стороны ОИЯИ, распределение задач, а также совместные работы. Возможные риски и дублирующие схемы.

План научных исследований с разбивкой по годам (кварталам), а также распределение задач по членам коллектива представлены ниже:

<u>Первый год исследований:</u>

<u>1-2 квартал</u> –> приобретение изотопически-обогащенного Se-76 и натурального Ba, создание мишени, приобретение деталей для мю-триггера, разработка и покупка деталей для установки детекторов; создание мюонной системы фильтрации данных, а также создание системы по контролю профиля мюонного пучка, и креплений для детекторов, отправка оборудования для дальнейшего тестирования в TUM;

<u>3 квартал</u> –> совместно с TUM тестирование всей системы, полная интеграция всего оборудования, а также отправка оборудования (детекторов, счетчиков, мишеней и системы накопления) из TUM в PSI (август-сентябрь);

<u>4 квартал</u> –> Совместно с коллаборантами (TUM, PSI, UZH, KU LEUVEN) проведение он-лайн (3 недели) и офф-лайн (2 недели) измерений на мюонном пучке piE1 (PSI, Швейцария, Филлиген) с использованием твердых мишеней Ba-136/Ba-nat и возможно *Se-76* – октябрь-ноябрь, возврат оборудования в TUM; предварительный анализ данных, написание отчета (декабрь)

<u>Распределение задач по участникам:</u>

1. Приобретение изотопически-обогащенных элементов, организация их отправки в TUM и PSI, оформление таможенных документов (Зинатулина, Фомина);

2. Подготовка оборудования для мю-триггера, держателей германиевых детекторов, создание мишени, отправка оборудования в TUM, тестовые предварительные измерения в TUM (Гусев, Шевчик, Казарцев);

3. Подготовка эксперимента, настройка пучка и тестирование, проведение измерений, мониторинг (Зинатулина, Гусев, Шевчик, Румянцева, Казарцев, Фомина, Ширченко и Белов);

4. Симуляции, анализ данных, подготовка публикаций (Румянцева, Ширченко, Житников и Белов).

Риски и дублирующие схемы:

- Возможна задержка по приобретению материалов и изготовления мю-триггера. На этот случай у нашей группы имеется вариант Б – использование нашей модернизированной ранее (в 2019 г) газовой мишени (мю-триггер находится внутри нее). В данном варианте есть только один нюанс, который связан с тем, что придется изготавливать специальный конструктив для крепления твердой мишени внутри мишени.

- По той же причине, возможна общая задержка всех транспортный передвижений, а также перенос пучкового времени на следующий год

Второй год исследований:

1-2 квартал –> продолжение анализа данных по сеансу первого года, приобретение изотопически-обогащенных Mo-96, Ca-40 и Fe-56, отправка материалов (мишеней) и необходимого дополнительного оборудования в TUM; интегрирование и тестирование экспериментальной установки в TUM;

3 квартал –> отправка оборудования и тестовые измерения в PSI (сентябрь), обсуждение анализа данных по сеансу 1го года на выездных заседаниях с коллаборантами, подготовка публикации;

4 квартал –> Совместно с коллаборантами проведение он-лайн (3-4 недели) и офф-лайн (2 недели) измерений на мюонном пучке piE1 (PSI, Швейцария, Филлиген) с использованием твердых мишеней Mo-96, Mo-100, Mo-nat и в зависимости от 2020 возможно Se-76 – октябрь-ноябрь; предварительный анализ данных, написание отчета и подготовка публикации.

Распределение задач по участникам:

1. Приобретение изотопически-обогащенных элементов, организация их отправки в PSI, оформление таможенных документов (Зинатулина, Фомина);

2. Создание мишени, отправка оборудования и тестирование экспериментальной установки, совместно с зарубежными коллегами (Гусев, Шевчик, Казарцев, Румянцева);

3. Подготовка эксперимента, настройка пучка и тестирование, проведение онлайн и офлайн измерений, мониторинг (Зинатулина, Гусев, Шевчик, Румянцева, Казарцев, Фомина, Ширченко и Белов);

4. Симуляции, анализ данных, получение и обсуждение предварительных результатов на выездных заседаниях совместно с зарубежными коллегами, подготовка публикаций (Зинатулина, Румянцева, Ширченко, Житников и Белов).

Риски и дублирующие схемы:

- В зависимости от того, как будет проведен сеанс в 2020 года, план измерений мишеней может быть изменен. Если пучковое время будет перенесено на 2021 год, решением возможной проблемы может быть дополнительный запрос в комитет в конце 2020 на выделение дополнительного пучкового времени.

 - Могут возникнуть сложности приобретением некоторых изотопически-обогащенных мишеней. На этот счет также возможна замена этих мишеней на другие.

<u>Третий год исследований:</u>

1 квартал –> по необходимости приобретение изотопически-обогащенных изотопов (в случае их недостатка в сеансе 2го года), создание мишени, продолжение анализа данных после сеанса 2021 года, проведение общего заседания совместно с зарубежными коллегами и обсуждение результатов;

2 квартал –> отправка материалов и оборудования для дальнейшего тестирования, продолжение анализа данных и подготовка итоговых публикаций;

3 квартал –> проведение измерений в PSI (Ca-40, S-32), анализ данных по 2021 и 2022 году, обсуждение результатов на выездных заседаниях, подготовка публикаций;

4 квартал –> анализ данных, написание отчетов в комитет, и подготовка публикаций по проекту, представление научных результатов прошедшего эксперимента на научных выездных заседаниях/конференциях.

<u>Распределение задач по участникам:</u>

1. Приобретение изотопически-обогащенных элементов, оформление таможенных документов (Зинатулина, Фомина);

2. Отправка материалов и оборудования в TUM, тестирование оборудования в TUM совместно с зарубежными коллегами (Гусев, Шевчик, Казарцев);

3. Подготовка эксперимента, тестирование, запуск, мониторинг (Зинатулина, Гусев, Шевчик, Житников, Румянцева, Казарцев, Фомина, Ширченко и Белов);

4. Основная обработка данных, подготовка публикаций, представление научных результатов по проекту на конференциях, обсуждение анализа данных на выездных заседаниях (Румянцева, Ширченко, Житников и Белов, Фомина).

<u>Риски и дублирующие схемы:</u>

 - В зависимости от того, как будет проведен сеанс в 2021 г, план измерений мишеней может быть изменен. Решение Б -- дополнительный запрос в комитет в конце 2020 на выделение дополнительного пучкового времени.

3.5 Имеющийся научный задел по проекту

Как уже говорилось выше, эксперименты по мюонному захвату проводились ранее в 1998-2006, результаты этих экспериментов опубликованы в Известиях Академии Наук и других зарубежных журналах, тезисах научных конференций, разработана программа набора данных, имеется частичное оборудование для осуществления/возобновления серий таких экспериментов.

Что касается используемых методов и подходов в целом, то коллектив имеет как 15-летний опыт ядерно-спектроскопических исследований ОМЗ, так и многолетний опыт участия в 2b-экспериментах (TGV и NEMO, GERDA, Majorana).

Основные результаты, полученные за это время:

Важно заметить, что большая часть полученных результатов была измерена **<u>впервые.</u>**

1. В серии экспериментов на пучке вторичных мюонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ исследовались угловые корреляции в ОМЗ на различных ядрах. На кремниевой мишени ^{28}Si с наилучшей на настоящий момент точностью были измерены корреляционные характеристики разрешенного мю-перехода и получена оценка на величину индуцированного псевдоскалярного взаимодействия g_P (Nucl.Phys. A587, (1995) 577; Nucl.Phys. A671, (2000) 647).

2. На мюонной фабрике PSI измерены корреляционные параметры мю-перехода первого запрета на ядре ^{16}O и получены оценки величины скалярного взаимодействия Gs (Nucl.Phys. A699, (2002) 917). Следует особо отметить, что в этом эксперименте были созданы газовые мишени, а также была отработана методика их использования.

Методики обеих работ являются новаторскими. Как и в настоящем проекте, в указанных экспериментах перед нами стояла задача исследования парциальных мю-переходов путем регистрации гамма-квантов, разряжающих определенные возбужденные уровни дочерних ядрах (^{28}Al и ^{16}N). Сложность состояла в том, что измерялись не только интенсивности, но и профиль этих гамма-линий, уширенных за счет эффекта Доплера. В ходе осуществления проектов 1-2 мы отработали методику измерений и обработки данных, развили и усовершенствовали методы полупроводниковой ядерной спектроскопии.

3. Исследован ОМЗ на ядре ^{48}Ti, определены скорости полных и парциальных переходов ОМЗ на возбужденные уровни ^{48}Sc и ^{47}Sc (ОМЗ с вылетом нейтрона). На основании полученных результатов были произведены новые расчеты ЯМЭ 2b-распада ^{48}Ca (Yad.Fiz. 67, 1224 (2004); Phys.Atomic Nuclei 67 (2004) 1202);

4. Впервые была измерена скорость ОМЗ в ^{48}Ca (1.214(8)*10^6 1/сек). Сравнение этой величины со скоростью ОМЗ на ^{40}Ca позволило обнаружить отклонение в правиле Примакова, описывающем зависимость скорости ОМЗ от числа нуклонов в ядре (Nucl.Phys. A724 (2003) 493). Кроме того, было выполнено сравнение теоретических и экспериментальных скоростей ОМЗ на ядре ^{48}Ca (Europhys.Lett. 58 (2002) 666);

5. Проведен прецизионный анализ спектров, сопровождающих ОМЗ аргона и неона, измеренных с хорошей точностью при отработке методики газовых мишеней. Получены полные и парциальные скорости ОМЗ в этих ядрах (Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 67 (2003) 1640).

6. Проведен цикл измерений ОМЗ на обогащенных мишенях ^{76}Se, ^{150}Sm и ^{106}Cd, а также соответствующих натуральных мишенях Se, Sm и Cd. Получены полные и парциальные скорости ОМЗ в этих ядрах. Предварительные результаты были опубликованы в Известиях РАН (Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 72 (2006) 737-743; Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 74 (2010) 825-828).

Основные результаты цикла работ, были опубликованы в известном международном рецензируемом журнале – «Ordinary muon capture studies for the matrix elements in $\beta\beta$ decay» / D. Zinatulina, V. Brudanin, V. Egorov et al. // **Phys. Rev. C 99** (2019) 024327.

По полученным результатам была защищена кандидатская диссертация Зинатулиной Д.Р.

7. В 2018 г проведены измерения с ^{100}Mo и ^{100}Ru, получены спектры мезорентгеновского излучения, которыми была дополнена существующая библиотека подобных спектров, созданная в нашем отделе ранее (muxrays.jinr.ru),

результаты были опубликованы в Ядерной Физике (Зинатулина Д.Р., 2019. Vol. 82, no. 3. P. 228.) и в международном журнале Euro.Phys. (D. Zinatulina, Ch. Briançon, V. Brudanin et al. // EPJ Web Conf . --- 2018 . --- Vol. 177 . --- P. 03006.)

8. В 2019 году проведен цикл измерений ОМЗ на обогащенных мишенях ^{82}Kr, ^{130}Xe и ^{24}Mg (в рамках гранта РФФИ № 18-32-00383). Получены предварительные результаты по полным скоростям ОМЗ в этих ядрах. Результаты были представлены комитету по распределению пучкового времени в PSI в годовом отчете. Окончательные результаты предполагается опубликовать в Известиях РАН или Ядерная Физика.

Стоит отметить, что большинство исследований было проведено при поддержке РФФИ (гранты № 02-02-16800 и №06-02-16587, успешно выполненные в 2002-2003, 2006 гг.)

4. Оценка необходимых кадровых ресурсов

Сотрудники ЛЯП ОИЯИ: разработка и создание мишеней, МК-симуляции, проектирование установки и ее модернизация, приобретение детекторов, сборка и тестирование их в ОИЯИ, проведение эксперимента (монтаж, тестирование оборудования и электроники, настройка пучка, дежурство на установке, набор и анализ онлайн данных, набор оффлайн данных, калибровка, текущий ремонт), оффлайн анализ, подготовка публикаций по Проекту.

Детальная информация по кадровым ресурсам сотрудников ОИЯИ:

ФИО	Должность	Обязанности	Эквивалент полной занятости (FTE)
В.В. Белов	мнс	Анализ данных, МК-симуляции	0.4
В.Б. Бруданин	н.отд	Административная работа, контроль проекта	0.2
К. Н. Гусев	снс	Координатор детекторной части эксперимента, конструктивы, тестирование	0.4
И.В. Житников	мнс	Анализ данных	0.3
Д. Р. Зинатулина	снс	Руководство всеми работами и участие в них	1.0
С.В. Казарцев	мнс	Система мюонной фильтрации данных, конструктивы, набор данных	0.6
Н.С. Румянцева	мнс	Набор и анализ данных	0.6
М. В. Фомина	мнс	Подготовка измерений, анализ данных	0.3
М.В. Ширченко	снс	Заместитель руководителя проекта, координатор анализа данных, набор данных	1.0
Ю.А. Шитов	н.сек	Набор и анализ данных	0.3

Е.А. Шевчик	с.инж-р	Проектирование экспериментальной установки, система фильтрации данных, профиль пучка	0.5
Общий FTE (Инженеры): 0.5, Общий FTE (научн. сотр): 5.1, Итоговый FTE: 5.6			

Сотрудники PSI, Швейцария: A.Knecht, S.M. Vogiatzi – помощь в проведении монтажа/демонтажа и онлайн измерений, организационные работы по PSI, частичный анализ данных;
Сотрудники TUM, Германия: T. Comellato, M. Schwarz, S.Schönert, C. Wiesinger – предоставление двух HPGe детекторов, помощь в организации получения и транспортировки всего оборудования в PSI, помощь в изготовлении креплений для детекторов, оптимизация системы набора данных и анализ данных;
Сотрудник ALABAMA, США: I.Ostrovskiy – обогащенная мишень ^{136}Ba, участие в проведении измерений, подготовка публикаций;
Сотрудники Университета Ювяскюля, Финляндия, Ювяскюля:
I.Suhonen, L. Jokiniemi – расчет ЯМЭ моделей в обычном мюонном захвате, интерпретация полученных результатов и сравнение с ЯМЭ моделями, подготовка публикаций по результатам оптимизации моделей;
Сотрудник UZH, Швейцария, Цюрих: L.Baudis – предоставление одного HPGe детектора, помощь в анализе данных;
Сотрудник KU LEUVEN, Бельгия, Левен: T. Cocolios – дежурство на сеансе измерений, возможное предоставление одного детектора;
Сотрудник RCNP, Университет Осаки, Япония, Осака: H. Ejiri – анализ офф-лайн данных, интерпретация полученных результатов с расчетной протон-нейтронной моделью, подготовка публикаций по Проекту;
Сотрудники UTM, Малайзия, Йохор Бахру: I.H. Hashim, F. Othman – анализ офф-лайн данных, интерпретация полученных результатов с расчетной протон-нейтронной моделью.

5. Оценка необходимых материальных ресурсов.

Для проведения экспериментального сеанса на мюонном пучке piE1 PSI (Швейцария) требуется достаточное количество сотрудников группы ОИЯИ для непрерывного дежурства (4 смены в сутки, по 8 часов каждая) в control room в течении всех измерений (монтаж оборудования, настройка и управление мюонного пучка, онлайн и оффлайн набор данных, контроль за работой установки). Оплата их пребывания в г.Филлиген, Швейцария (авиаперелет + аренда автомобиля + суточные + проживание + по необходимости приобретение доп.материалов для ремонта), а также дополнительных поездок для тестирования оборудования в TUM (Германия) и PSI (Швейцария), составляет $35,000-30,000 в год.

Для проведения экспериментов по проекту **MONUMENT** необходимы затраты на следующие материалы и оборудование (~$227,000):
- ^{76}Se, ^{96}Mo, ^{40}Ca, ^{56}F, ^{32}S – обогащенные стабильные изотопы (по 2 гр каждая);
- ^{nat}Ba, ^{nat}Ca, ^{nat}F, ^{nat}S – смеси природного происхождения (по 2 гр каждая);
- механическая конструкция самой мишени и ее крепления к выходному окну

мюонного пучка;
- 3 сцинтилляционные пластины (по 0,05-0,08 $м^2$) для системы активной мюонной фильтрации экспериментальных данных;
- 3 ФЭУ (*H10721-20)* – съем сигналов с пластин системы активной мюонной фильтрации экспериментальных данных;
- спектросмещающее (WLS) оптоволокно – 0.3 км;
- 1 сцинтилляционная пластина (по 0,07 $м^2$) для профиля мюонного пучка;
- 25 SiPM – индивидуальный съем сигнала с 20 канавок (+5 про запас) на сцинтилляционной пластине для контроля профиля мюонного пучка;
- 2 HPGe детектора (n-типа);
- 2 крейта (VME и NIM) с контроллером и блоками FADC;
- механическая конструкция для крепления детекторов;
- компьютеры и сменные жесткие диски для хранения данных (2 ТБ на неделю сбора данных);
- расходные материалы (оптич.клей и смазка, кабели, разъемы, инструменты, электронные платы и т.п.)

Вклад в создание и проведение совместного (**ОИЯИ + PSI + TUM + UZH + UTM + ALABAMA + RCNP + KU LEUVEN**) эксперимента **MONUMENT:**
- изготовление креплений для детекторов;
- тестирование детекторной системы;
- посредничество при транспортировке детекторной системы в TUM/PSI/ОИЯИ;
- тестирование и оптимизация системы набора данных;
- сравнение результатов и оптимизация расчетных моделей относительно экспериментальных данных;
- проведение регулярных рабочих совещаний коллаборации и подготовка совместных публикаций.

6. Краткий анализ сильных и слабых сторон, возможностей, угроз

Сильные стороны проекта:

- использование в качестве мишеней для мюонного захвата изотопически-обогащенных элементов сразу отсекает присутствие других ядер в мишени, при захвате мюона в которых могут получаться возбужденные уровни ядра, которые разряжаются гамма-квантами с энергией близкой или такой же, как и интересующая нас;
- использование монохроматичного и узкоколлимированного пучка отрицательных мюонов, чтобы подавляющая часть мюонов останавливалась именно в мишени (пучок отрицательных мюонов piE1 в PSI предоставляет такую возможность, обладая интенсивностью 10 кГц при моменте 28 МэВ/с);
- использование системы по контролю профиля мюонного пучка упрощает настройку интенсивности мюонного пучка, а также позволяет провести более точную его фокусировку;
- использование системы активной мюонной фильтрации экспериментальных данных, позволяет однозначно определить момент прихода мюона с

точностью до 5 нс, что, в свою очередь, делает возможным разделение регистрируемого излучения на мгновенное (prompt) и задержанное (delayed);

- использование системы сбора данных (DAQ) на быстрых флэш-АЦП. Такая система имеет очень короткое время передачи данных и отличную временную привязку, а также за счет применения специальных трапецеидальных фильтров позволяет дополнительно улучшить энергетическое разрешение;
- полученные с помощью новой системы сбора данных мезорентгеновские спектры будут способствовать надежной идентификации линий, а также обеспечат нормировку по количеству мюонов, остановившихся в данном химическом элементе, что позволит нам избежать перерасчета абсолютной эффективности (учет телесного угла);
- прецизионное измерение временных и энергетических распределений гамма-лучей за счет применения системы германиевых детекторов различного объема, характерной особенностью которых является высокое энергетическое разрешение. За счет этого появляется возможность точной идентификации изучаемых переходов, заселяющих конкретные состояния дочерних ядер.

К слабым сторонам относятся:

- резкое снижение эффективности регистрации детекторов в энергетическом диапазоне свыше 3 - 4 МэВ (этот момент может быть улучшен с использованием современных HPGe детекторов большого объема);
- большой вклад статистической ошибки измерений при итоговом балансе интенсивностей парциальных вероятностей мюонного захвата на связанные состояния дочернего ядра (этот вопрос также может быть решен с помощью использования инвертированных коаксиальных детекторов с лучшим разрешением и возможностью разделения сигнала по pulse-shape анализу);
- несовершенство расчетных моделей ЯМЭ по мюонному захвату на данный момент, что может явиться причиной не совсем верной интерпретации экспериментальных результатов с точки зрения расчетных моделей.

Потенциальную конкуренцию нашему проекту в ближайшие годы могли бы составить только ранее проводимые измерения по зарядово-обменным (n,p) и (p,n) реакциям. Но, как уже упоминалось выше (гл. 2.1), о существовании таких экспериментов, как (n,p)-реакции (проверка правого плеча, как в случае с ОМЗ) на данный момент нет достоверной информации. К тому же действительный вклад зарядово-обменных реакций в расчеты ЯМЭ, по крайней мере для безнейтринной моды двойного бета-распада, на сегодняшний день не оправдался.

ПРИЛОЖЕНИЯ