

КОНСТРУКЦИЯ ГАЗОВОЙ И ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МЮОННОГО ЗАХВАТА В ^{130}Xe , ^{82}Kr И ^{24}Mg

*В. В. Белов, В. Б. Бруданин, К. Н. Гусев, В. Г. Егоров, И. В. Житников,
Д. Р. Зинатулина¹, С. В. Казарцев, Н. С. Румянцева, Е. А. Шевчик,
М. В. Ширченко, Ю. А. Шитов, М. В. Фомина*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлено описание элементов измерительной системы мюонного захвата с различными мишенями (газовыми и твердотельными). С помощью системы отбора мюонных событий и германиевых детекторов высокой чистоты (HPGe) проведены прецизионные измерения время-энергетических распределений, сопровождающих захват мюона в изотопически обогащенных ядрах ^{130}Xe , ^{82}Kr и ^{24}Mg . Описаны оптимальные параметры измерительной системы мюонного захвата для обеспечения максимальных остановок мюонов в исследуемых мишенях и набора эффективной статистики во время измерений. Исходная система позволяет с хорошей точностью отделять мезорентгеновские события от гамма-излучения, что является критичным в подобных исследованиях, а также она применима для будущих измерений с другими мишенями.

The description of the muon capture system units with different targets (gas and solid-state) is presented. Using the muon events selection system and high-purity germanium (HPGe) detectors, precise measurements of the time-energy distributions following ordinary muon capture in the isotopically enriched ^{130}Xe , ^{82}Kr , and ^{24}Mg nuclei were performed. The optimal parameters of the muon capture measuring system to ensure maximum muon stops in the targets under study and to collect effective statistics during measurements are reported. The system makes it possible to separate muonic X-ray events from gamma radiation with high accuracy, which is critical in such studies, and is also suitable for future measurements with other targets.

PACS: 23.40.-s; 23.40 Bw; 41.85.Lc; 46.70.De; 29.27.Hj; 37.20.+j; 29.30.Ep; 29.40.-n; 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

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 с нарушением СР-инвариантности. Открытие $0\nu\beta\beta$ -распада может пролить

¹E-mail: zinatulina@jinr.ru

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 для $0\nu\beta\beta$, в зависимости от использованной модели ядра, дают результаты, различающиеся в 2–3 раза. Именно поэтому было предложено [1–3] интенсифицировать экспериментальные и теоретические усилия, направленные на оптимизацию модели расчета ЯМЭ для $0\nu\beta\beta$, через измерения обычного мюонного захвата (ОМЗ).

Целью данной работы является разработка элементов измерительной системы ОМЗ для оптимизации работы на модифицированной конфигурации системы мюонного тракта в Институте Пауля Шеррера (PSI, Швейцария). Задачи работы определяются требованиями модифицированной конфигурации мюонного тракта $\pi E1-2$. Среди прочих можно отметить сокращение расстояния между выходным окном и самой мишенью, как следствие — обеспечение устойчивости конструктивных элементов мишени в связи с непосредственной близостью мишени к выходному окну мюонного тракта.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Идея экспериментов по мюонному захвату основана на точном измерении время-энергетического распределения γ -лучей после захвата мюона в ядрах с помощью системы отбора мюонных событий и высокочистых германиевых детекторов. Эти распределения предоставляют богатую экспериментальную информацию, и все они являются полезным вкладом в расчеты ЯМЭ для 2β -распадов [2, 3]. Полные скорости мюонного захвата в конкретных изотопах определяются путем анализа временного распределения задержанных γ -квантов. С помощью баланса интенсивностей задержанных γ -квантов определяются парциальные вероятности мюонного захвата на связанные состояния дочернего ядра [4–6]. Выходы короткоживущих изотопов находятся с использованием off-line измерений [7]. Важным побочным продуктом измерений являются спектры мезорентгеновского излучения. Они представляют собой неустрашимый фон в наших измерениях и используются при идентификации энергетических спектров, а также при нормировке [8–10].

Первые эксперименты по исследованию ОМЗ в целях получения полных и парциальных скоростей мюонного захвата в различных ядрах проводились нашей группой на пучках $\mu E4$ и $\mu E1$ мезонной фабрики в Институте Пауля Шеррера с 2000 по 2006 г. [4–6, 8, 9]. Первоначальная энергия протонов ускорителя PSI составляла 600 МэВ при токе до 2 мА. Пучок отрицательных мюонов формировался с помощью набора магнитных элементов (квадрупольных линз, поворотных и сверхпроводящих магнитов и т. д.), изменяющих фокусировку и энергию пучка (с конечным импульсом 20–30 МэВ/с с $\Delta p/p$ на уровне 2%), и четырех заслонок, задающих геометрию и интенсивность пучка (чаще всего интенсивность выбиралась около 10^4 с⁻¹, а диаметр до 6 см).

В зависимости от года измерений экспериментальная установка была двух видов: для измерений только твердых мишеней [6], которые не требовали специального окружения мишени (экспериментальная установка представлена на рис. 1, а); для сеансов измерения, проводимых как с твердыми, так и с газообразными мишенями [4],

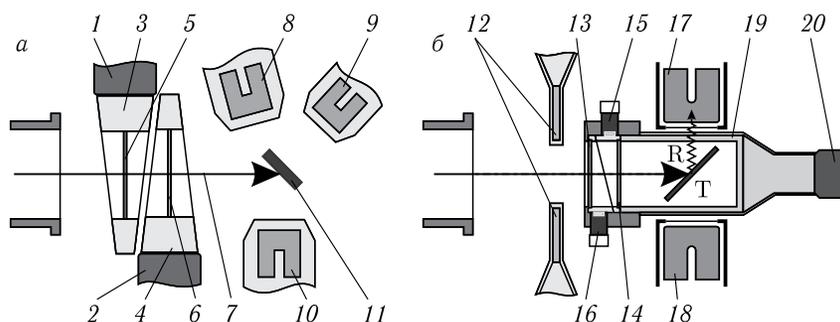


Рис. 1. а) Схема экспериментальной установки с твердыми мишенями: 1, 2 — ФЭУ; 3, 4 — световоды; 5 — счетчик С1; 6 — счетчик С2; 7 — направление мюонного пучка; 8, 9, 10 — HPGe γ -детекторы; 11 — твердотельная мишень; б) схема экспериментальной установки для измерения газовых и твердых мишеней: 12 — формирующее входное окно (сцинтилляционный вето-счетчик С0); 13, 14 — пролетные счетчики С1 и С2; 15, 16 — ФЭУ счетчиков С1 и С2; 17, 18 — HPGe γ -детекторы; 19 — вето-счетчик С3; 20 — ФЭУ счетчика С3; Т — мишень (в случае с газами вещество мишени распределено по всему объему сосуда С3)

конструкция, которая позволяла проводить измерения с газовыми мишенями под различным давлением (см. рис. 1, б).

Экспериментальная установка, представленная на рис. 1, а, находилась на расстоянии около 20–30 см от выходного окна, а мишень располагалась за двумя сцинтилляционными счетчиками С1 и С2. Сцинтилляторы С1 и С2 были включены на совпадения и определяли момент прихода мюона:

$$\mu_{\text{stop}} = C1 \wedge C2. \quad (1)$$

Измерения проводились на мюонном пучке $\mu E4$, параметры которого не требовали дополнительного формирования на входе в установку.

Конструкция мишени, изображенная на рис. 1, б, состояла из мюонного счетчика С0 на входе в мишень, расположенного на расстоянии 10 см от выходного окна сепаратора, двух тонких (0,5 мм) пролетных счетчиков С1 и С2, за которыми следует сама мишень, окруженная чашеобразной камерой-счетчиком С3. Корпус мишени, представленный на рис. 2, был сконструирован для измерения газовых мишеней при атмосферном давлении, а также для размещения в нем твердых материалов. При исследовании таких благородных газов, как криптон, необходима информация о низкоэнергетичной области. Для этой задачи был сконструирован сосуд, работающий под атмосферным давлением.

Счетчик С3 является газовым сосудом и одновременно с пролетными счетчиками используется для определения триггера μ -stop

$$\mu_{\text{stop}} = \overline{C0} \wedge C1 \wedge C2 \wedge \overline{C3} \quad (2)$$

и дискриминации высокоэнергетичных электронов от распада мюонов. Бета-распад остановившихся в мишени мюонов является фоновым процессом, альтернативным ОМЗ. Испущенные в процессе бета-распада электроны имеют высокую энергию до

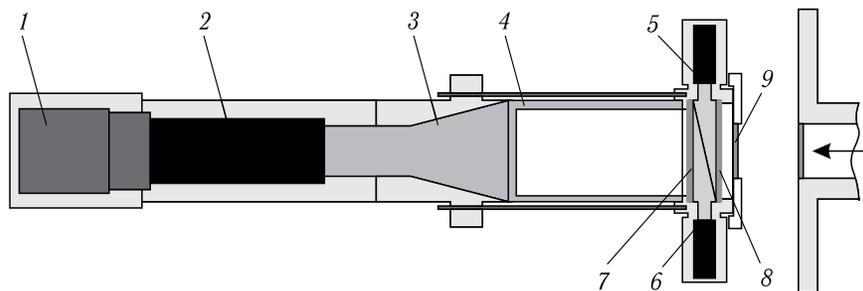


Рис. 2. Схематическое изображение газовой мишени: 1 — делитель высокого напряжения ФЭУ; 2 — ФЭУ ХР2020; 3 — световод; 4 — газовая камера-счетчик СЗ из пластмассового сцинтиллятора; 5, 6 — ФЭУ счетчиков С2 и С3; 7 — счетчик С2; 8 — счетчик С3; 9 — алюминизированный лавсан

50 МэВ — мишелевские электроны, которые нарушают работу германиевых детекторов и производят интенсивное тормозное излучение. Газовая камера изготовлена из материалов с низким Z , в результате чего поглощение низкоэнергетичных γ -квантов в стенках счетчика СЗ пренебрежимо мало, что позволяет измерять их с помощью германиевых детекторов без заметных искажений интенсивности.

После 2006 г. проект был закрыт в связи с капитальной реконструкцией мюонных трактов в PSI. Однако вопрос теоретических расчетов ЯМЭ с целью уточнения ядерных моделей по-прежнему остается актуальным. Для интерпретации полученных расчетов вновь понадобились экспериментальные данные, а именно результаты по ОМЗ [1–3]. В связи с этим программа исследований была возобновлена нашей группой в 2017 г. [10]. Модернизированный пучок отрицательных мюонов $\pi E1$ (PSI) с моментом 20–33 МэВ/с используется группой по исследованию редких мезорентгеновских переходов в радиоактивных изотопах [11, 12] и имеет подходящие параметры для изучения ОМЗ. В рамках сотрудничества с этой группой в конце 2019 г. были проведены тестовые измерения газовых мишеней ^{130}Xe и ^{82}Kr , а также твердой мишени ^{24}Mg .

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Изменения выходных камер ускорителя и системы регистрации и обработки данных, последовавшие за модернизацией пучка, потребовали пересмотра постановки эксперимента. В рамках подготовки к сеансу были изучены особенности конструкций сепаратора и детектирующих систем. На основании полученной информации выдвинуты требования к изучаемым мишеням и ходу проведения эксперимента.

Требования к конструкции газовой мишени. При проведении экспериментов с газовой мишенью важным обстоятельством является возможность быстрого и надежного переливания газа из баллона в объем мишени. Специфика эксперимента не предусматривает длительного хранения газа внутри газовой мишени, поэтому образец после измерений переливается обратно в баллон. Для наиболее эффективного процесса ОМЗ давление газа внутри камеры счетчика может достигать 2 атм.

Геометрия событий ОМЗ в случае газовой и твердой мишеней различна, поэтому методики настройки интенсивности и фокусировки пучка для них отличаются. В слу-

чае газовой мишени использование дополнительных изотопов, помещенных в полезный объем, невозможно, поэтому настройка пучка производится с помощью известных конструкционных материалов детектора. Измерение интенсивностей мезорентгеновского излучения входящих в состав материалов атомов позволяет сделать оценку положения центра распределения ОМЗ и подобрать нужные параметры пучка [8–10].

В измерениях 2019 г. (рис. 3) предполагалось использование массива HPGe-детекторов «Miniball» из эксперимента ISOLDE [13, 14], что накладывало ряд ограничений на геометрические размеры «мертвого» объема газовой мишени. Перемещение детекторов осуществляется в сферической системе координат с центром в точке остановки пучка вдоль радиусов. Регулировка азимутальных и зенитных углов ограничена соседними детекторами и системой охлаждения, поэтому изменение данных величин в течение одного сеанса при переходе от твердой к газовой мишени крайне не рекомендовано. Таким образом, для максимизации эффективности регистрации продуктов ОМЗ в области захвата необходимо минимизировать количество конструкционных материалов и вспомогательных регистрирующих устройств.

Требования к твердым мишеням. Твердые мишени используются как для калибровки и настройки пучка (^{nat}Th , ^{nat}Au , композитная мишень), так и для исследования ОМЗ в них (^{24}Mg). Они составлены из нескольких слоев фольги, суммарная толщина которых подобрана таким образом, чтобы полностью остановить мюонный пучок и не создавать дополнительный мертвый слой для продуктов реакции.

Мишень помещается вне объема камер сепаратора, поэтому при установке разгерметизация и последующая их вакуумизация не требуется. Перед выходным фланцем пучка установлены мюонные счетчики, используемые для синхронизации событий германиевых детекторов с фактом прохода мюона.

ГАЗОВАЯ МИШЕНЬ

Для сеанса 2019 г. была изготовлена газовая мишень специальной конструкции, базируемая на модели мишени предыдущих измерений ОМЗ 2006 г. Выбор такой мишени объясняется тем, что и криптон, и ксенон являются благородными дорогостоящими газами и легко могут диффундировать через микропоры. Поэтому при исследованиях для предотвращения потерь благородного газа возникают повышенные

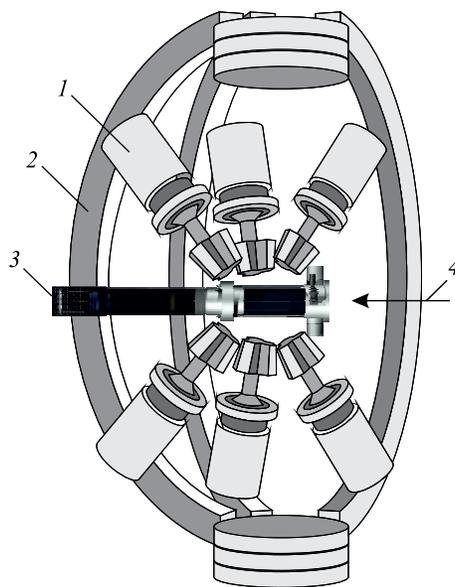


Рис. 3. Схема экспериментальной установки с газовой мишенью сеанса 2019 г.: 1 — трехсегментные HPGe-детекторы с сосудом Дьюара (кластеры «Miniball»); 2 — рама с регулировкой угла наклона, поворота и длины выноса; 3 — газовая мишень; 4 — направление движения пучка

требования к герметичности мишени. При измерениях ксенона и криптона необходимо минимизировать поглощение низкоэнергетичных γ -квантов и обеспечить максимальный процент мюонных остановок в газе, а не во входном окне мишени или других конструктивных материалах.

Давление газа в заполненной камере-счетчике может достигать 2 атм, поэтому в модернизированной версии были пересмотрены некоторые механизмы уплотнения, проведены испытания и подобраны подходящие размеры лавсановых пленок, используемых в качестве входного окна газовой мишени. Было установлено, что пленка из алюминизированного лавсана толщиной 500 мкм и диаметром 50 мм выдерживает избыточное давление до 6 атм.

После заполнения объема мишень необходимо в максимально сжатые сроки установить на ось пучка с целью сохранения эффективного пучкового времени. Для этого используется переходной фланец (рис. 4), имеющий выходное окно со стороны объема мишени из алюминизированного лавсана толщиной 500 мкм. Оно служит одновременно предохранительным разделительным барьером в случае разгерметизации мишени и деградером пучка. Такая конструкция позволяет оперативно заменить мишень без вакуумирования объема камер сепаратора в течение 30–60 мин.

Для оптимизации светосбора сцинтилляционные счетчики были заменены на новые в соответствии с размерами существующей мишени. Материалом для счетчиков служит пластмассовый сцинтиллятор на основе полистирола с добавками РТР и РОРОР. Световоды изготовлены из полиметилметакрилата, а не из пластмассового сцинтиллятора для исключения паразитной загрузки от сопутствующего ОМЗ излучения. В качестве фотоприемников использовались модульные ФЭУ Hamamatsu H6780 и Photonis XP2020, обладающие хорошими временными характеристиками, необходимыми для регистрации и синхронизации событий ОМЗ. Сигналы с фотоумножителей поступают на вход FlashADC измерительной системы MIDAS [15]. Исходная система отбора мюонных событий за счет новых сцинтилляционных счетчиков и модульных ФЭУ с хорошими временными характеристиками позволяет четко отсеивать полезные события, сопутствующие ОМЗ, от мезорентгеновского излучения.

Во избежание подмешивания остаточного объема газа, а также для экономии времени при смене каждый газ помещается в собственную мишень непосредствен-

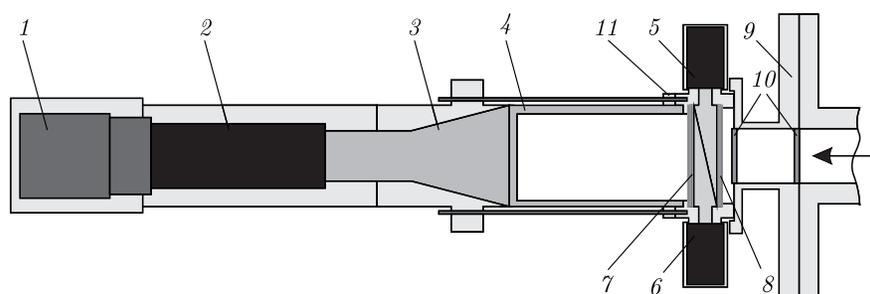


Рис. 4. Схематическое изображение газовой мишени: 1 — делитель высокого напряжения ФЭУ; 2 — ФЭУ XP2020; 3 — световод; 4 — газовая камера-счетчик СЗ из пластмассового сцинтиллятора; 5, 6 — ФЭУ счетчиков С2 и С3; 7 — счетчик С2; 8 — счетчик С3; 9 — переходной фланец; 10 — алюминизированный лавсан; 11 — уплотнительный фланец

но перед установкой на пучок (за 1–2 ч). Счетчики С3 используют один и тот же фотоумножитель ХР2020, переносимый с одной мишени на другую. Интенсивность счета С1 и С2 (фотоумножители Н6780) предварительно настроена на одну и ту же величину с использованием образцового источника бета-излучения).

Переливание газа из баллона в объем мишени осуществляется в три этапа. После подключения газовой мишени через смеситель с пятью отводами к вакуумному посту, газовой ловушке, манометру и баллону с газом начинается процесс ее вакуумирования (рис. 5, а). При этом воздух также удаляется из объемов соединительных трубок, газовой ловушки и смесителя. Вентили V1 и V2 открыты, V3 закрыт.

По достижении вакуума порядка 10^{-5} мбар вентиль V2 перекрывается и мишень оставляется на шестичасовую проверку герметичности. После успешной проверки вентили V1 и V2 закрываются, вакуумный пост отключается и начинается этап вымораживания газа (рис. 5, б). Открывается вентиль V3 и ловушка, внутренний объем которой не превышает 3 см^3 , помещается в сосуд с жидким азотом. Газ из баллона объемом 500 см^3 и исходным давлением 2 атм заполняет свободный объем, вымораживаясь в газовой ловушке. По истечении 10–15 мин температура последней сравнивается с температурой азота, а давление, контролируемое манометром, падает до значения, близкого к 0 атм, что свидетельствует о практически полном вымораживании газа в ней (табл. 1).

На последнем этапе (рис. 5, в) вентиль V3 между баллоном и ловушкой перекрывается, и открывается вентиль V2. Газовая ловушка извлекается из жидкого азота, и газ, нагреваясь, заполняет весь доступный объем. Поскольку объем газовой мишени составляет 725 см^3 и значительно превышает объем соединительных трубок и газовой ловушки, практически весь газ после перекрытия вентилей V2 остается внутри первой. Таким образом, потери при переливании газа из баллона в объем мишени составили не более 5%. Мишень отсоединяется от смесителя и устанавливается в рабочее поло-

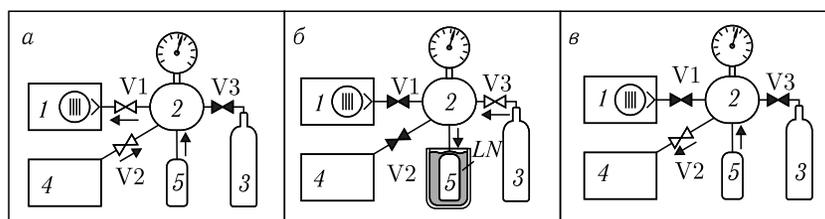


Рис. 5. Схема переливания газа из сосуда хранения в газовую мишень: 1 – вакуумный насос; 2 – смеситель; 3 – баллон с газом; 4 – газовая мишень; 5 – газовая ловушка; V1, V2, V3 – запорные газовые вентили; а) этап вакуумирования; б) этап выморозки газа; в) этап заполнения газовой мишени

Таблица 1. Температура кипения и плавления газов

Параметр	Азот	Криптон	Ксенон
Температура кипения, °С	-196	-153	-108
Температура плавления, °С	-210	-157	-112

жение. Рабочее давление газа в камере-счетчике газовой мишени составляет 1,6 атм. При обратной переливке газа из камеры в баллон для хранения было обнаружено, что общие потери газа во время переливки и измерений ОМЗ в исходной конфигурации составили не более 15%. Таким образом, сделан вывод, что сконструированная камера является оптимальной и применима в дальнейших измерениях ОМЗ.

ТВЕРДАЯ МИШЕНЬ

В табл. 2 приведены параметры твердых мишеней, используемых для калибровки (^{nat}Th , ^{nat}Au) и настройки пучка, а также для самих измерений мюонного захвата (в случае с ^{24}Mg).

Таблица 2. Параметры твердых мишеней

Изотоп		Толщина слоя, мм	Количество слоев
Композитная мишень	^{nat}Cu	1,0	1
	^{nat}Zr	0,8	1
	^{nat}Cd	1,0	1
	^{nat}Mo	1,0	1
	^{nat}Zn	0,5	1
	^{nat}Al	0,1	4
	ПВХ	1,0	2
^{nat}Th		0,8	2
^{nat}Au		0,1	10
^{24}Mg (2 г, металлические фольги)		0,2	8

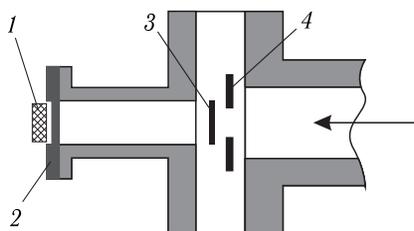


Рис. 6. Схема установки твердых мишеней: 1 — мишень; 2 — фланец из АБС-пластика; 3 — входной счетчик мюонов; 4 — мюонное ведро

Для установки твердых мишеней был изготовлен алюминиевый переходной фланец с заглушкой из АБС-пластика $((\text{C}_8\text{H}_8)_x(\text{C}_4\text{H}_6)_y(\text{C}_3\text{H}_3\text{N})_z)$. Образец мишени должен устанавливаться сразу после пластикового фланца (рис. 6).

Материалы позволяют дополнительно настроить фокусировку и импульс мюонного пучка, так как имеют в своем составе элементы с известными мезорентгеновскими линиями.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В течение каждой измерительной кампании параметры пучка подбирались таким образом, чтобы в мишени останавливалось не менее 95% мюонов. Среднее количество μ_{stop} в веществе мишени во время экспериментов составляло от $3 \cdot 10^3$ до $25 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$,

а суммарное время экспозиции — от 50 до 120 ч в зависимости от мишени и ее изотопического обогащения. При этом измерения были разделены на несколько этапов.

Этап настройки пучка. Настройка интенсивности и фокусировка пучка для твердых мишеней производилась с использованием композитной мишени, состоящей из 5 секторов различных материалов (рис. 7). Мишень устанавливалась вплотную к выходному окну сепаратора, изготовленного из АБС-пластика, что позволило определить минимальный импульс мюонного пучка по линиям мезорентгеновского излучения углерода и азота. Она состояла из 3 слоев: на алюминиевой пластине были расположены 5 сегментов металлической фольги — Cu, Zr, Cd, Mo, Zn. На выходе пучка мишень была покрыта слоем ПВХ-пленки.

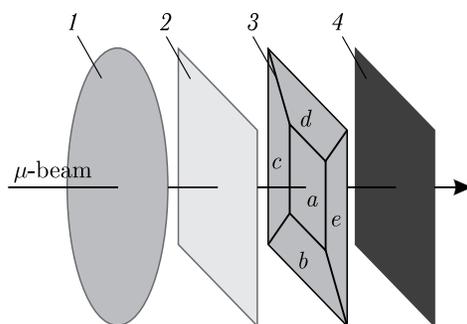


Рис. 7. Схематическое изображение композитной мишени для настройки параметров пучка: 1 — выходное окно сепаратора из АБС-пластика; 2 — алюминиевая (Al) фольга; 3a — кадмиевая (Cd) фольга; 3b — цинковая (Zn) фольга; 3c — циркониевая (Zr) фольга; 3d — медная (Cu) фольга; 3e — молибденовая (Mo) фольга; 4 — пленка ПВХ

По серии измерений интенсивности известных мезорентгеновских линий изотопов, входящих в состав мишени, производилась оценка пространственного распределения мюонного пучка, а также определялась оптимальная величина импульса пучка. Если импульс пучка был слишком мал, то в спектре преобладали линии алюминия, углерода и азота. При избыточной величине импульса в спектре проявлялись мезорентгеновские линии хлора. Оптимум соответствовал максимуму мезорентгеновских пиков $K_{\alpha}(2p-1s)$ и $K_{\beta}(3p-1s)$ от кадмия.

Этап измерения ОМЗ на ^{24}Mg . Измерение ОМЗ на ^{24}Mg проводилось в геометрии, совпадающей с этапом настройки и калибровки. При этом параметры пучка не изменялись в сравнении с этапом настройки, а лишь поэтапно увеличивалось количество слоев фольги ^{24}Mg до достижения максимальной интенсивности реакций ОМЗ.

Рабочий импульс мюонного пучка для измерений ^{24}Mg был 33 МэВ/с. Общая длительность измерений на пучке для ^{24}Mg составила 52 ч, после чего мишень была перемещена на измерения накопленных долгоживущих продуктов в низкофоновый германиевый детектор.

Этап измерения $^{\text{nat}}\text{Th}$, $^{\text{nat}}\text{Au}$. Для определения эффективности детекторов малого объема (в измерениях 2019 г. их было два с бериллиевым окном) в области энергий от 18 кэВ до 1,4 МэВ обычно используют γ -линии и рентгеновские лучи от источников ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{60}Co . Детекторы большого объема в сеансе 2019 г. были предназначены для исследования более высокоэнергичной области (вплоть до

10 МэВ). Помимо наличия вышеупомянутых стандартных радиоактивных источников они были откалиброваны в off-line режиме с использованием известных мезорентгеновских линий ториевой и золотой мишеней для получения калибровки по эффективности в жесткой области. Для этого использовались линии с энергиями 5591,0, 5763,1, 2302(2), 2341,2(2) и 2477,8 кэВ (для золота) и 6021,8, 6070,7, 2795,8, 2829,6 и 2915,2 кэВ (для тория) [16, 17].

Этап настройки газовой мишени. После смены твердой мишени на газовую была изменена геометрия германиевых детекторов таким образом, чтобы минимизировать расстояния до центра газовой мишени и охватить максимальный телесный угол. Для настройки пучка использование композитной мишени было невозможно, поэтому применялся метод максимизации мезорентгеновских линий $K_{\alpha}(2p-1s)$ для изотопов газовой мишени. При этом минимизировались линии углерода, содержащегося в материале пластмассового сцинтиллятора, и кислорода, находящегося в воздухе переходного фланца (рис. 8).

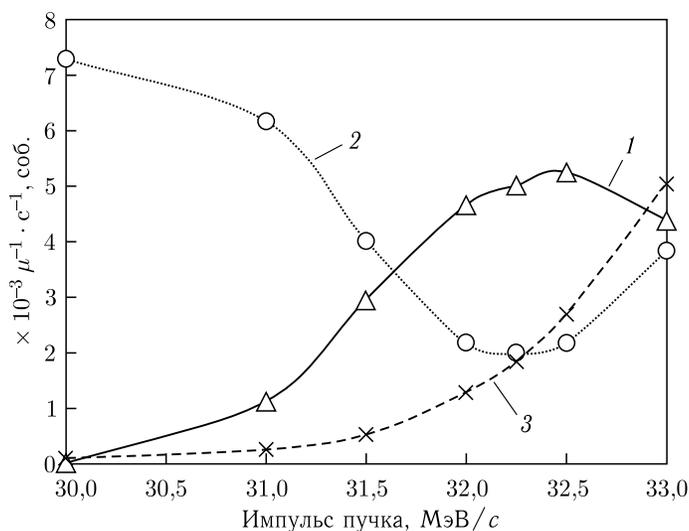


Рис. 8. Зависимость интенсивностей мезорентгеновских линий $K_{\alpha}(2p-1s)$ в газовой мишени для ^{82}Kr (1), углерода (2) и кислорода (3) от величины импульса пучка мюонов

Отметим, что увеличение импульса пучка приводит к увеличению интенсивности мюонного пучка, что может обуславливать рост интенсивностей мезорентгеновских линий $K_{\alpha}(2p-1s)$ кислорода. В то же время для газов процесс захвата мюона не является точечным процессом, и «хвосты» распределения захватывают материалы газовой мишени.

Этап измерения ^{82}Kr и ^{130}Xe . Для измерений использовались изотопически обогащенные благородные газы ^{82}Kr (99,9%) и ^{130}Xe (99,9%) объемом 1 л каждый. Рабочий импульс мюонного пучка для газовых мишеней выбран 32,25 МэВ/с с интенсивностью мюонов 10^4 с^{-1} . Общая длительность измерений на пучке для ^{82}Kr и ^{130}Xe составила 120 и 72 ч соответственно. После измерений каждая из мишеней была перемещена на измерения накопленных долгоживущих продуктов в низкофоновый германиевый детектор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена изготовлению газовой и твердой мишеней измерительной системы мюонного захвата в ^{130}Xe , ^{82}Kr и ^{24}Mg , изучение которых позволяет уточнить расчетные модели ядерных матричных элементов для 2β -распадов, а также глубже понять структуру ядер.

Исходная конфигурация мишеней позволила получить следующие результаты:

— минимизированы потери при переливании газа из баллона в объем мишени (5 %);

— потери газа во время измерений ОМЗ и переливок в исходной конфигурации составили не более 15 %;

— за счет использования специальной конструкции газовой мишени (камера-счетчик из материала с низким Z), а также тонкой настройки мюонного пучка число остановок мюонов в газовой мишени составляет 95 % от общего потока входящих в мишень мюонов;

— использование модульных ФЭУ Hamamatsu H6780 и Photonis XR2020, обладающих хорошими временными характеристиками, позволяет проводить качественный отбор полезных событий по времени.

Полученная конфигурация мишеней дает возможность ее использования в дальнейших экспериментах с другими мишенями (как твердыми, так и газовыми). С помощью полученной конфигурации измерительной системы была собрана достаточная для дальнейшего анализа данных статистика.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00383 («Мой первый грант») и гранта ОИЯИ для молодых научных сотрудников 2020 г. № 20-202-03.

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. *Suhonen J., Kortelainen N.* // Czech. J. Phys. 2006. V. 56. P. 519–525.
3. *Jokiniemi L., Suhonen J.* // Phys. Rev. C. 2019. V. 100. P. 014619.
4. *Zinatulina D., Brudanin V., Egorov V., Petitjean C., Shirchenko M., Suhonen J., Yutlandov I.* // Ibid. V. 99. P. 024327.
5. *Zinatulina D., Brudanin V., Briançon Ch. et al.* // AIP Conf. Proc. 2013. V. 1572. P. 122–125.
6. *Зинатулина Д. Р., Громов К. Я., Бруданин В. Б., Бриансон Ш., Егоров В. Г., Петитжан К., Фоминых В. И., Чумин В. Г., Ширченко М. В., Ютландов И. А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. Т. 72, № 6. С. 737–743.
7. *Hashim I. H., Ejiri H., Shima T., Takahisa K., Sato A., Kuno Y., Ninomiya K., Kawamura N., Miyake Y.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. P. 014617.
8. *Zinatulina D., Briançon Ch., Brudanin V., Deshevyykh I., Egorov V., Petitjean C., Perevoshchikov L., Shirchenko M., Vasiliev S., Vylvov T., Yutlandov I.* Mesoroentgen Spectra Catalogue. <http://muxrays.jinr.ru/>.
9. *Zinatulina D., Briançon Ch., Brudanin V., Egorov V., Petitjean C., Perevoshchikov L., Shirchenko M., Yutlandov I.* // Eur. Phys. J. Web Conf. 2018. V. 177. P. 03006.

10. Зинатулина Д. // ЯФ. 2019. Т. 82, № 3. С. 228–234.
11. Knecht A., Skawran A., Vogiatzi S.M. <https://arxiv.org/abs/2004.03314>.
12. Antognini A., Berger N., Mainz U., Cocolios T.E., Dressler R., Eichler R., Eggenberger A., Indelicato P., Jungmann K.-P. et al. // Phys. Rev. C. 2020. V. 101, No. 5. P. 054313.
13. The Isotope mass Separator On-Line facility (ISOLDE). <https://isolde.web.cern.ch/>.
14. Warr N., Van de Walle J., Albers M., Ames F., Bastin B., Bauer C., Bildstein V. et al. // Eur. Phys. J. A. 2013. V. 49, No. 40.
15. MIDAS. https://midas.psi.ch/https://midas.triumf.ca/MidasWiki/index.php/Main_Page.
16. Hartmann F.J., Bergmann R., Daniel H. et al. // Z. Phys. A: Atoms Nuclei. 1982. V. 305, No. 3. P. 189–204.
17. Close D.A., Malanify J.J., Davidson J.P. // Phys. Rev. C. 1978. V. 17. P. 1433–1455.

Получено 16 июня 2020 г.