

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 539.165, 539.123.6

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
РАЗРАБОТКА СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ
БЕТА-ЧАСТИЦ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ
УРАНА И ПЛУТОНИЯ

Студент _____ П. И. Сушкова

Научный руководитель, _____ Д. В. Попов

Научный консультант,
к.ф.-м.н. _____ Г. Д. Долганов

Москва 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
1 Бета-спектрометр	8
1.1 Описание экспериментальной установки	8
1.2 Измерение спектрометрических характеристик ФЭУ	10
1.3 Калибровка шкалы основного детектора с применением моделирования	13
1.4 Калибровка шкалы тонкого пролетного детектора	15
1.5 Экспериментальные данные с калибровочным источником ^{207}Bi и сравнение с результатами других работ	18
1.6 Экспериментальные данные с источниками и тонкими свинцовыми фольгами	21
1.7 Определение оптимального отражателя для сцинтилляторов в детектирующей системе	24
2 Прототип бета-спектрометра установки БЕТА-2	26
2.1 Определение параметров компонент детектирующей системы бета-спектрометра-2	26
2.2 Первые экспериментальные данные	27
Заключение	31
Список использованных источников	33

ВВЕДЕНИЕ

Под руководством Энрико Ферми 2 декабря 1942 года был запущен первый в мире ядерный реактор «Чикагская поленница-1» [1], который впоследствии стал основой Манхэттенского проекта и экспериментально подтвердил возможность осуществления управляемой самоподдерживающейся цепной ядерной реакции. В ответ на это в рамках Советского атомного проекта в 1946 году начал работу первый советский реактор Ф-1 [2], исследования на котором стали основой проектов промышленных реакторов. Благодаря результатам советских и американских ученых в современном мире существует уже более 400 реакторов.

В основе действия ядерного реактора лежит управляемая цепная реакция деления изотопов под действием нейтронов. Так, при взаимодействии нейтрона с ядром ^{235}U образуется два нейтронно-избыточных осколка, которые претерпевают серию бета-распадов с образованием электронов и электронных антинейтрино до возвращения в долину стабильности (рисунк 1). Основной вклад в мощность ядерных реакторов и образование электронных антинейтрино вносят изотопы ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu [3]. В среднем на одно деления ядра урана или плутония образуется порядка 6 антинейтрино в диапазоне энергий от 0 до 10 МэВ.

Таким образом, цепная реакция деления в ядерном реакторе служит мощным источником антинейтрино – частицы, существование которой было предложено В. Паули в 1930 г. для объяснения сохранения энергии и импульса в реакции бета-распада. Экспериментальные результаты, подтверждающие существование электронных антинейтрино, были опубликованы в 1956 г. Ф. Райнесом и К. Коуэном [4–7]. В эксперименте детекторы, расположенные вблизи ядерного реактора комплекса «Саванна-Ривер», регистрировали частицы, образованные в реакции обратного бета-распада:



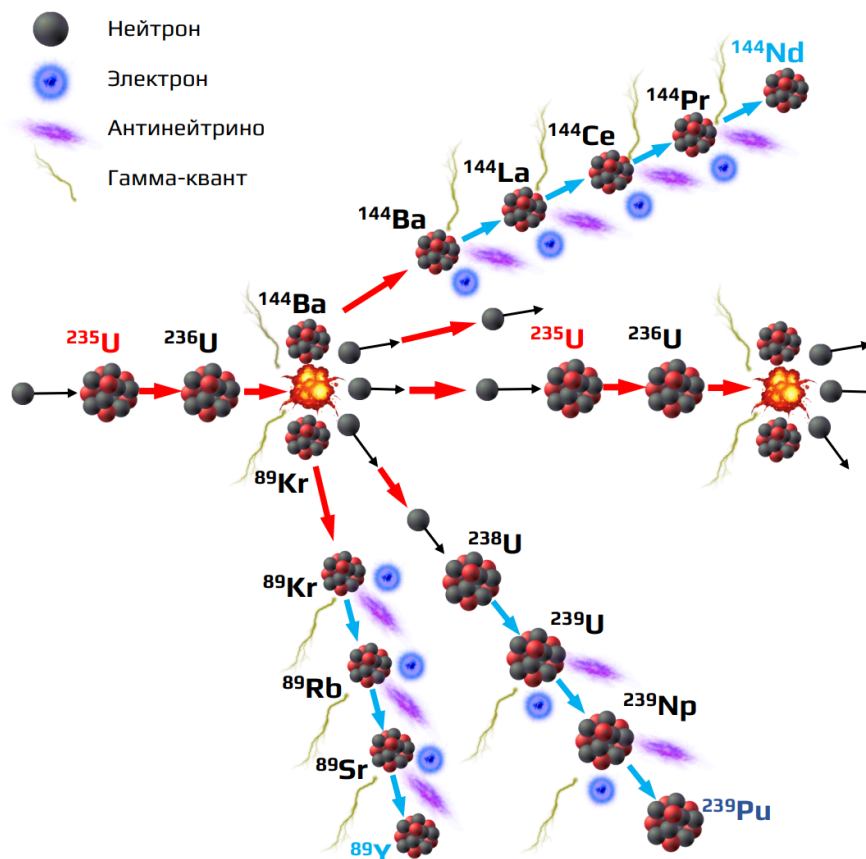


Рисунок 1 — Процессы β -распада осколков деления U^{235} с образованием антинейтрино, электронов и гамма-квантов.

Открытие электронного антинейтрино в реакторном эксперименте положило начало новому научному направлению в физике атомного ядра и элементарных частиц — физике и спектроскопии реакторных антинейтрино. Работы в этой области уже внесли существенный вклад как в фундаментальные исследования (изучение нейтринных осцилляций [8–11], объяснение природы массы нейтрино [12; 13], поиск стерильных нейтрино [14; 15]), так и в прикладную науку (метод удаленного мониторинга реактора [16–20]). Дальнейший прогресс в реакторных экспериментах напрямую зависит от точности знания энергетических спектров антинейтрино, так как неполнота данных может внести систематические неопределенности в анализе результатов.

Теоретическим способом получения спектров реакторных антинейтрино является метод расчета из первых принципов – *ab initio*. Его суть заключается в суммировании спектров от всех бета-активных осколков деления ядерного топлива с учётом индивидуальной активности каждого изотопа. Среди современных моделей, основанных на этом подходе, можно вы-

делить Mueller [21], Estienne-Fallot [22], Letourneau [23] и BESTIOLE [24]. Однако данный метод имеет существенные недостатки. Расчёты осложняются тем, что суммарный спектр формируется за счёт тысяч ядерных переходов. Для части из них экспериментальные данные о схемах распадов либо отсутствуют, либо недостоверны из-за эффекта пандемониума [25]. Дополнительную неопределённость вносит заметный разброс в значениях кумулятивных выходов продуктов деления, приводимых в различных базах данных.

Вторым подходом получения спектров реакторных антинейтрино является метод конверсии, основанный на генетической связи между спектрами электронов и антинейтрино. Данный метод был применен в экспериментах на реакторе Института Лауэ-Ланжевена (ILL) [26–29]. В ходе исследований тонкие фольги изотопов урана и плутония облучались потоком тепловых нейтронов реактора, а возникающие в результате деления бета-частицы выводились из активной зоны и детектировались с помощью магнитного спектрометра BILL [30], что позволяло измерить их энергетический спектр, который впоследствии пересчитывался в спектр антинейтрино. Поскольку деление ^{238}U вызывается быстрыми нейтронами, соответствующий спектр бета-частиц не мог быть измерен в условиях эксперимента ILL и был рассчитан теоретически [31]. В итоге спектр бета-частиц продуктов деления ^{238}U под действием быстрых нейтронов был измерен в эксперименте, проведенном в Техническом университете Мюнхена (TUM) на нейтронном источнике FRM, с последующим пересчетом в спектр антинейтрино [32]. По итогу работ группы ILL и теоретического расчета спектров бета-частиц ^{238}U была создана модель Huber–Mueller, широко применяемая для анализа реакторных нейтринных экспериментов.

Несмотря на прямое измерение спектров бета-частиц от продуктов деления урана и плутония с их последующим преобразованием в спектры антинейтрино, а так же на существование теоретических моделей, в физике реакторных антинейтрино наблюдается две аномалии:

- Реакторная антинейтринная аномалия – это наблюдаемый дефицит электронных антинейтрино от реактора на расстояниях 15-100 м по сравнению с теоретическими предсказаниями [33].
- Спектральная аномалия «bump effect», состоящий в обнаружении из-

быточного числа событий (примерно на 10% больше ожидаемого) от реакторных антинейтрино в области энергий 5–7 МэВ [34; 35].

Уточнение спектров реакторных антинейтрино и совершенствование теоретических моделей остаются актуальными задачами, для которых необходимо продолжение экспериментальных исследований.

Для измерения кумулятивных спектров бета-частиц продуктов деления урана и плутония в НИЦ "Курчатовский институт" на выходе 11 нейтронного пучка исследовательского реактора ИР-8 [2] расположена экспериментальная установка БЕТА. В эксперименте одновременно измеряются спектры бета-частиц от мишеней урана и плутония, а так же спектр фона в одном и том же потоке нейтронов. Такой способ измерения позволяет определять отношения спектров бета-частиц делящихся изотопов, для их дальнейшего сравнения с другими экспериментами.

Основой экспериментальной установки БЕТА (рисунок 2) является дюралюминиевый диск диаметром 60 см, который вращается со скоростью 10 об./сек. Вдоль обода расположены мишени из урана и плутония с размерами 20x30 мм и толщиной 39 мг/см² в количестве по 16 штук для каждого изотопа. Мишени помещены в тонкие оболочки из алюминия, полиэтилена, а так же в фольгу из алюминизированного полиэтилена общей толщиной 13 мг/см². Каждый набор из 16 мишеней, соответствующих U²³⁵ и Pu²³⁹, занимает треть окружности диска, а на оставшейся трети расположены тонкие оболочки без делящегося материала для измерения спектра фона. С одной стороны от центра диска мишени облучаются потоком нейтронов, а с противоположной стороны размещен бета-спектрометр, экранированный от пучка нейтронов защитой из различных материалов.

Спектры бета-частиц продуктов деления урана и плутония регистрируются с помощью сцинтилляционного бета-спектрометра. Бета-частицы, образующиеся при делении ядер, сначала проходят через тонкий пролетный ΔE -детектор на основе пластикового сцинтиллятора диаметром 30 мм и толщиной 160 мкм, который просматривается двумя ФЭУ-97 с противоположных сторон. После пролётного детектора частицы попадают в основной сцинтилляционный детектор, выполненный из кристалла стильбена диаметром 50 мм и толщиной 50 мм, к торцу которого вплотную прилегает ФЭУ-110. Сцинтилляционные детекторы оптически разделены

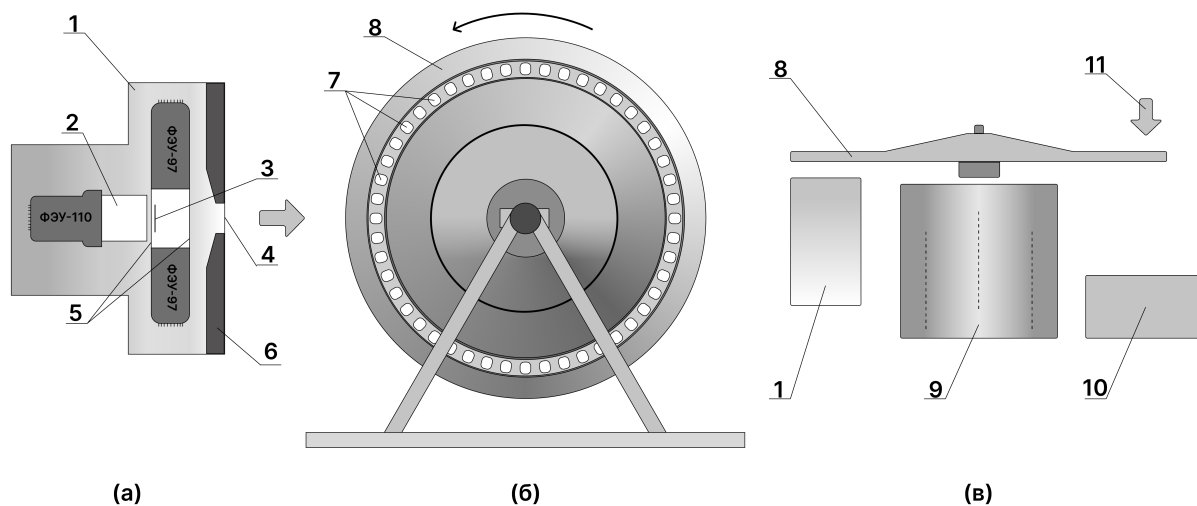


Рисунок 2 — Эскиз экспериментальной установки: **а** — схема бета-спектрометра, **б** — вид спереди, **в** — вид сверху. 1 — бета-спектрометр; 2 — основной пластиковый сцинтиллятор; 3 — тонкий пролетный пластиковый сцинтиллятор; 4 — тонкая майларовая мембрана; 5 — светоотражающие майларовые пленки; 6 — коллиматор; 7 — мишени; 8 — вращающийся дюралюминиевый диск; 9 — комбинированная пассивная защита; 10 — поглотитель нейтронного потока; 11 — нейтронный поток.

между собой светоотражающими покрытиями, а так же размещены в алюминиевом корпусе. Также на пути у бета-частиц перед прохождением через сцинтилляторы установлена тонкая майларовая мембрана, закрепленная в коллиматоре.

При регистрации бета-частиц установкой используется метод совпадений: сигнал записывается только в случае одновременного срабатывания всех фотоэлектронных умножителей, при этом суммируются амплитуды сигналов. Одновременно с регистрацией сигналов с ФЭУ также записывается угловая координата диска. Это необходимо для последующего сопоставления амплитуды сигналов с конкретной мишенью.

Конструкция позволяет одновременно измерять энергетические спектры бета-частиц продуктов деления урана и плутония. Подавление фона происходит за счет размещения бета-спектрометра среди комбинированной защиты, а также способа осуществления регистрации сигналов с помощью метода совпадений с двух сцинтилляционных детекторов.

В настоящее время при поддержке Российского научного фонда планируется полная модернизация установки БЕТА. Поэтому **целью** данной работы является разработка сцинтилляционного спектрометра для изме-

рения энергетических спектров бета-частиц продуктов деления изотопов урана и плутония.

Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

- 1) Провести качественные измерения аппаратурных кривых отклика детектора на набор калибровочных источников гамма- и бета-излучения ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{60}Co , ^{44}Ti , $^{90}\text{Sr-Y}$, ^{207}Bi (электроны конверсии).
- 2) С использованием моделирования методом Монте-Карло выполнить калибровку энергетической шкалы основного Е-детектора.
- 3) Получить энергетические спектры от источника ^{207}Bi с выделенными конверсионными линиями (482 и 991 кэВ), определить энергетическое разрешение при 1 МэВ и провести сравнительный анализ с результатами аналогичных работ.
- 4) Исследовать влияние защитных фольг мишени на форму регистрируемого спектра бета-частиц с помощью тонких свинцовых фольг, а так же алюминизированного полиэтилена, используемого в качестве оболочек мишеней из U^{235} и Pu^{239} в эксперименте БЕТА.
- 5) Провести сравнение светоотражающих материалов (Tyvek, Mylar, Lumirror, ESR 3M) и выбрать идеальный вариант, обеспечивающий максимальный светосбор, для основного сцинтиллятора.
- 6) Собрать прототип бета-спектрометра установки БЕТА-2 и получить первые аппаратурные кривые отклика спектрометра на калибровочные источники.

1. БЕТА-СПЕКТРОМЕТР

Процесс разработки сцинтилляционного спектрометра включает в себя этап моделирования предполагаемых вариантов детектирующей конструкции. Для обеспечения достоверности результатов моделирования необходима предварительная проверка и калибровка созданной модели на основе экспериментальных данных. В рамках настоящей работы нужно получить аппаратные кривые отклика сцинтилляционного детектора на калибровочные источники гамма-квантов и электронов. Экспериментальные результаты будут являться основой для корректировки модели: их воспроизведение подтвердит точность работы моделирования и позволит продолжить дальнейшую работу по подбору будущей конфигурации детектора.

Сцинтилляционный бета-спектрометр, являющийся основным детектором установки БЕТА НИЦ "Курчатовский институт в настоящее время находится в рабочем состоянии рядом с выходом нейтронного пучка реактора ИР-8. В связи с этим проведение калибровочных экспериментов с источниками, имеющими изученные спектры, невозможно, а значит, калибровка моделирования на основе данных этого бета-спектрометра неосуществима. В результате для проведения необходимых экспериментов с калибровочными источниками и настройки модели был создан прототип сцинтилляционного бета-спектрометра установки БЕТА.

1.1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Предварительно для проведения эксперимента создана опорная конструкция, которая обеспечивает соосное расположение компонентов детектирующих устройств, а также надлежащее крепление тонкого сцинтилляционного детектора и расположение калибровочных источников. Конструкция была создана разборной, чтобы в дальнейшем можно было провести эксперименты с различным расположением компонентов детектиру-

ющих устройств, а также выполняет функцию чёрного ящика для светоизоляции ФЭУ. Все составные детали опорной конструкции разработаны в КОМПАС-3D и изготовлены с помощью 3D-печати.

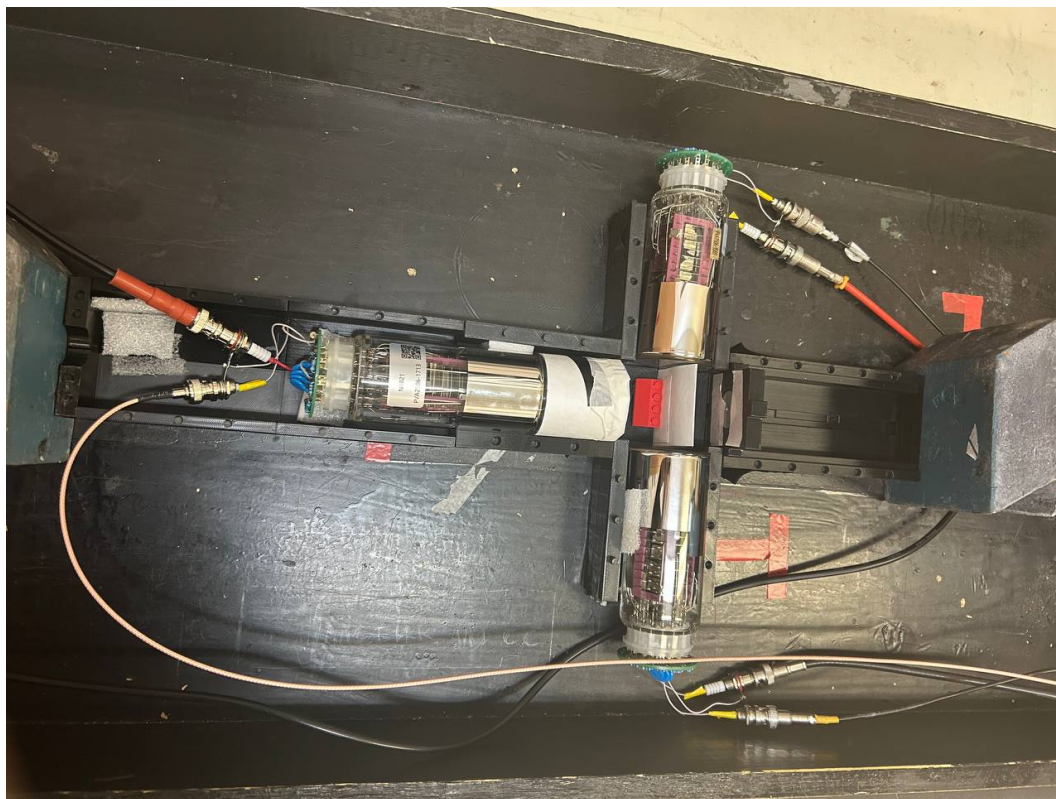


Рисунок 1.1 — Общий вид экспериментальной установки для измерения аппаратных кривых отклика спектрометра на калибровочные источники.

Собранная экспериментальная установка представлена на рисунке 1.1. Детектирующая система состоит из следующего оборудования:

- Тонкий пластиковый сцинтиллятор, состоящий из полистирола, птерфинила и ПОПОП, размерами 5 x 5 см и толщиной 325 мкм, плотностью 1.03 гр/см³.
- Основной пластиковый сцинтиллятор, состоящий из полистирола, птерфинила и ПОПОП, в виде цилиндра длиной 5 см и диаметром 5 см, плотностью 1.03 гр/см³.
- Три фотоэлектронных умножителя GoHi N4021-52mm, с эффективным диаметром фотокатода 46 мм. Два ФЭУ расположены по бокам от тонкого пластикового сцинтиллятора, а третий вплотную прилегает к основному сцинтиллятору.
- Сцинтилляторы обернуты в светоотражающий материал.

1.2. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЭУ

Перед началом основного эксперимента необходимо провести калибровку фотоэлектронных умножителей, а именно: определить область линейности сигналов и рабочий диапазон напряжений. Для выполнения данной задачи была собрана установка, включающая в себя:

- 1) проверяемый фотоэлектронный умножитель (всего их три), подключенный к источнику высокого напряжения.
- 2) оптический диффузор, предназначенный для рассеивания светового пучка.
- 3) LED-драйвер, создающий пучок света регулируемой интенсивности.
- 4) АЦП, принимающий сигналы с ФЭУ.

Схема собранной установки представлена на рисунке 1.2.

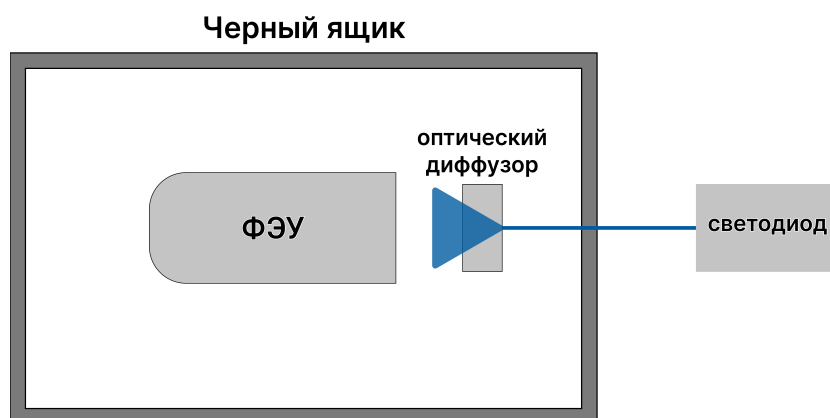


Рисунок 1.2 — Схема установки, собранной для определения спектрометрических характеристик ФЭУ.

Аппаратурная кривая отклика ФЭУ, полученная в каждой серии измерений, аппроксимировалась функцией Гаусса с определением её параметров — среднего значения и стандартного отклонения (рисунок 1.3).

В первую очередь была определена область линейности амплитуд сигналов. Для этого измерялась зависимость отклика ФЭУ от яркости источника при подаваемом напряжении 1250 В. Яркость менялась в диапазоне от 50% до 85% с шагом 5%. По полученным данным построена зависимость дисперсии кривой отклика от ее среднего значения. Из рисунка 1.4 следует,

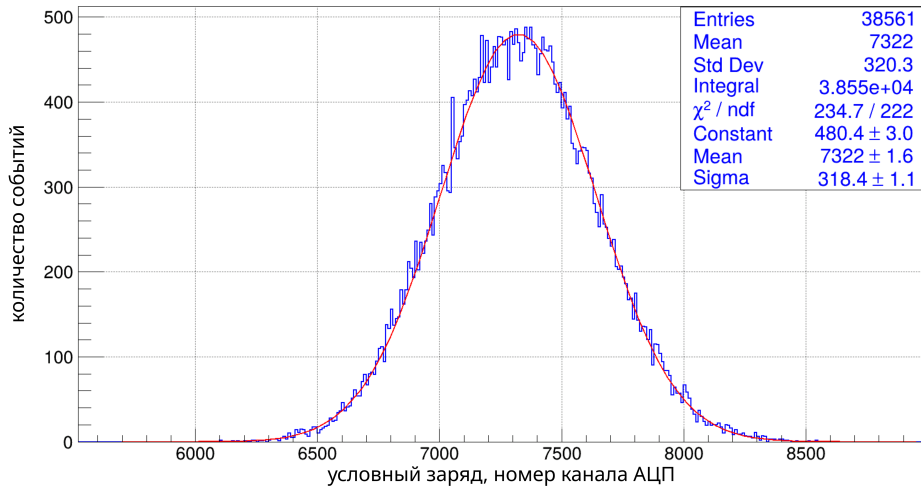


Рисунок 1.3 — Пример аппаратурной кривой отклика ФЭУ на пучок света.

что начиная с области 12000 номера канала закон отклоняется от линейного, то есть ФЭУ переходит в режим насыщения. Данному номеру канала соответствуют амплитуды сигнала около 600 мВ, следовательно, в последующих экспериментах необходимо, чтобы амплитуды сигналов были по величине меньше указанного значения.

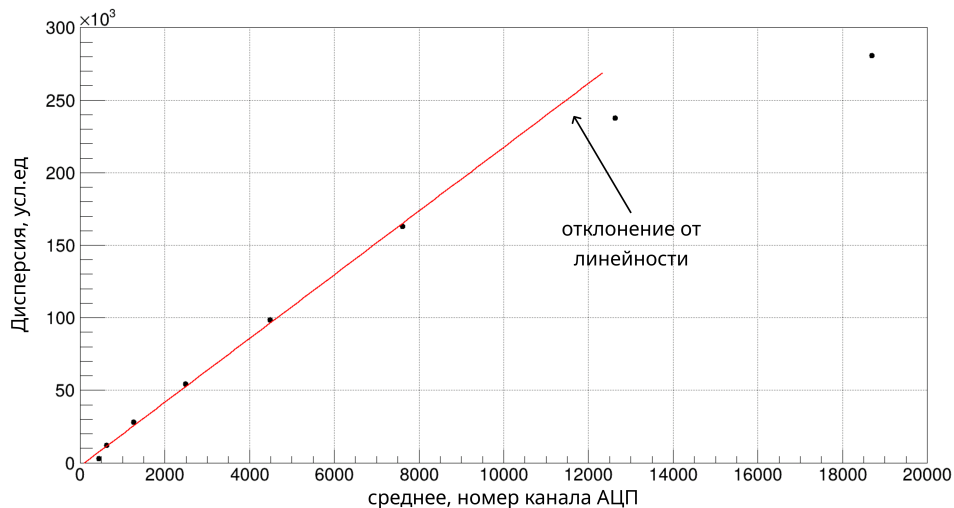


Рисунок 1.4 — Зависимость дисперсии кривой отклика от её среднего значения. Красная линия — результат аппроксимации участка полученной зависимости линейной функцией.

Во второй серии экспериментов с каждым ФЭУ была измерена зависимость отклика ФЭУ на пучок света от подаваемого на него напряжения в диапазоне от 975 В до 1300 с шагом 25 В при яркости источника 75% (для ФЭУ, снимающего сигналы с основного сцинтиллятора) и 80% (для

двух других ФЭУ).

По полученным данным была определена зависимость положения среднего кривой отклика от напряжения, которая аппроксимировалась эмпирической зависимостью:

$$\mu = \frac{a^n}{(n+1)^{kn}} \cdot U^{kn} \quad (1.1)$$

где k — эмпирическая постоянная, зависящая от материала фотокатода ФЭУ (принимает значение в диапазоне 0.6–0.9); n — количество динодов (для ФЭУ GoHi N4021-52mm: $n = 10$); a — свободный параметр. Из рисунка 1.5 видно, что зависимость полностью соотносится с эмпирическим законом (1.1).

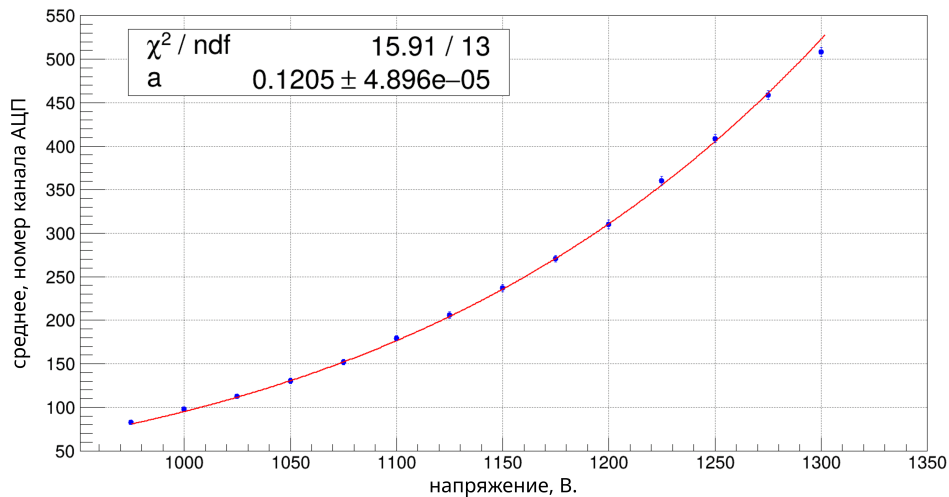


Рисунок 1.5 — Зависимость положения среднего кривой отклика ФЭУ от подаваемого на него напряжения. Красная кривая - результат аппроксимации данных по закону (1.1)

Так же была получена зависимость относительного разрешения (в единицах ПШПВ) от подаваемого напряжения для каждого ФЭУ 1.6

В результате найдена область, в которой относительное разрешение остается постоянным, и определен рабочий диапазон напряжений. В результате эксперимент проводился при напряжении 1200 В, так как в этом случае диапазон амплитуд сигналов от калибровочных источников не превышает значения 600 мВ.

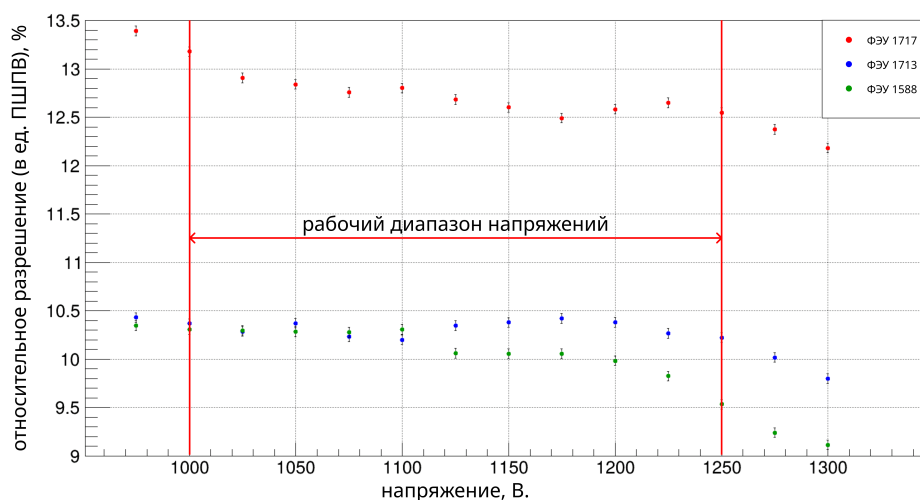


Рисунок 1.6 — Зависимость относительного разрешения кривой отклика ФЭУ от подаваемого напряжения. Где ФЭУ-1717 в бета-спектрометре располагается рядом с основным сцинтиллятором, а ФЭУ-1713 и ФЭУ-1588 рядом с тонким пролетным сцинтиллятором.

1.3. КАЛИБРОВКА ШКАЛЫ ОСНОВНОГО ДЕТЕКТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Начальными данными после каждого измерения являются зарядовые спектры. Для преобразования шкалы детектора в энергетическую необходима калибровка с использованием источников с известными энергетическими спектрами. С этой целью были проведены измерения с источниками ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{60}Co и ^{44}Ti . Поскольку в детекторе используется органический сцинтиллятор, в регистрируемых спектрах четко выражены лишь комптоновские края распределения от гамма-линий этих источников (рисунки 1.7–1.8).

В работе предыдущего семестра калибровка проводилась с помощью определения положение каждого комптоновского края в зарядовых единицах путем аппроксимации соответствующей области спектра функцией Гаусса. Затем, по параметрам полученного распределения, положение края рассчитывалось по формуле:

$$Q = \mu + \frac{\sigma}{2} \tag{1.2}$$

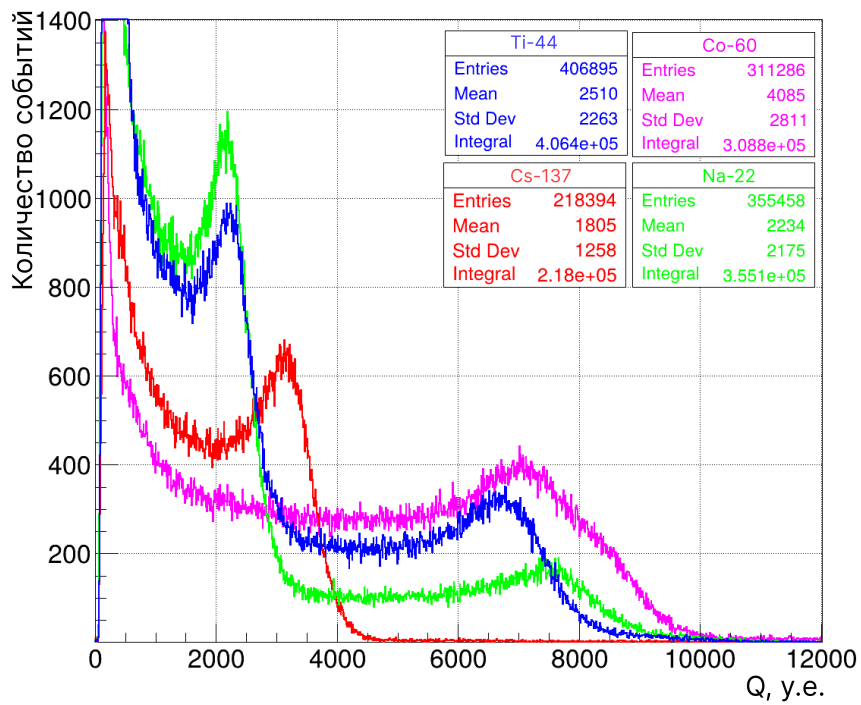


Рисунок 1.7 — Аппаратурная кривая отклика Е-детектора на калибровочные гамма-источники.

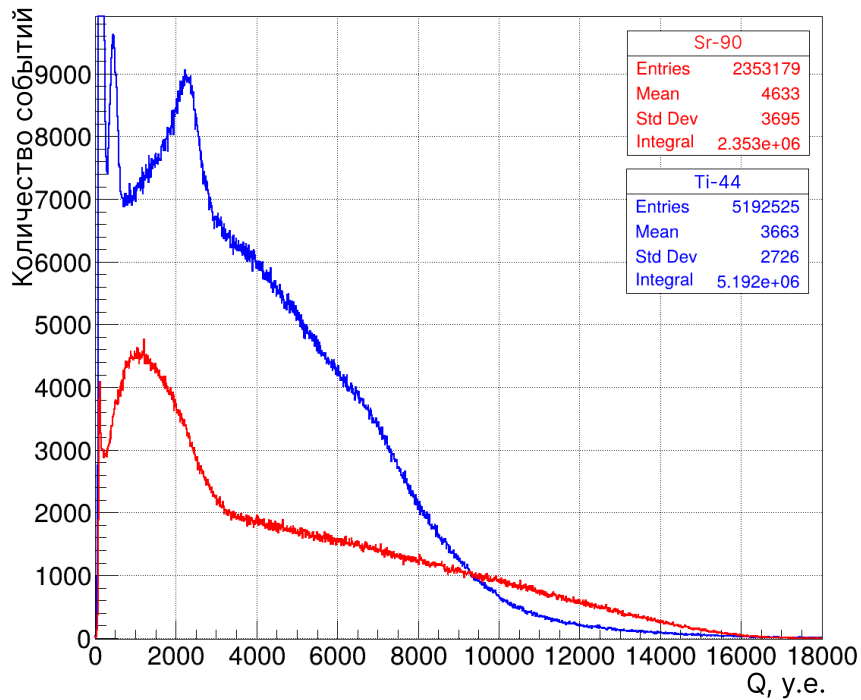


Рисунок 1.8 — Аппаратурная кривая отклика спектрометра на калибровочные источники ^{90}Sr -Y и ^{44}Ti .

где μ – математическое ожидание распределения заряда сигналов, σ – стандартное отклонение распределения заряда сигналов.

Для более точной калибровки шкалы основного детектора применим метод с использованием Монте-Карло моделирования с последующей многопараметрической подгонкой параметров, описывающих шкалу детектора и энергетическое разрешение. Методом Монте-Карло проводится моделирование спектра энерговыведения комптоновских электронов в образце при взаимодействии гамма-квантов от источника с веществом органического сцинтиллятора.

Для параметризации используется эмпирическое соотношение:

$$\sigma(E) = \sqrt{\alpha^2 + \frac{\beta^2}{E} + \frac{\gamma^2}{E^2}} \quad (1.3)$$

где α учитывает неоднородность сцинтиллятора и неточность энерговыведения, β – вклад статистических эффектов регистрации фотоэлектронов и γ – систематический вклад, обусловленный шумами электроники.

Дополнительными параметрами являлись коэффициенты из формулы связи энергии, выделенной в сцинтилляторе, и условного заряда:

$$E = kQ + b \quad (1.4)$$

В результате минимизации параметров методом χ^2 модельные спектры энерговыведения были подогнаны к экспериментальным данным (рисунок 1.9). После калибровки шкалы детектора результаты могут быть представлены также в энергетических единицах (рисунок 1.10). В ходе моделирования определяются параметры связи энергетической и зарядовой шкал для одной серии измерений.

1.4. КАЛИБРОВКА ШКАЛЫ ТОНКОГО ПРОЛЕТНОГО ДЕТЕКТОРА

Калибровочными источниками бета-частиц являются $^{90}\text{Sr-Y}$ и ^{44}Ti . Для отбора событий с бета-частицами использовалась установка в полной конфигурации. Помимо калибровки шкалы основного детектора, необходи-

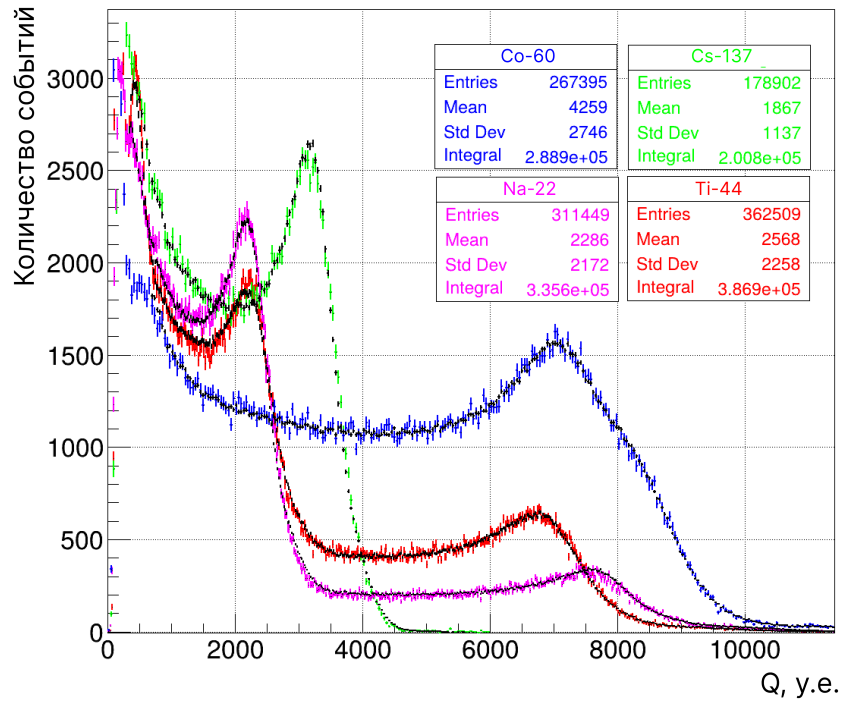


Рисунок 1.9 — Аппаратурная кривая отклика E-детектора на калибровочные гамма-источники. Черные точки - результаты моделирования для каждого набора данных.

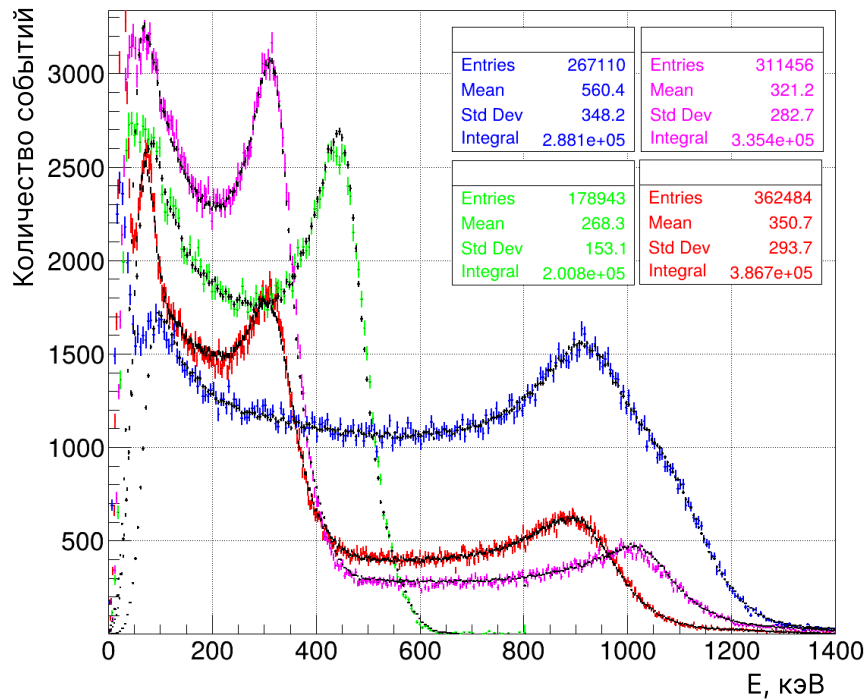


Рисунок 1.10 — Аппаратурная кривая отклика E-детектора на калибровочные гамма-источники в энергетических единицах. Черные точки - результаты моделирования для каждого набора данных.

мо провести калибровку шкалы ΔE -детектора. при прохождении заряженных частиц через тонкий слой вещества распределение их энергетических потерь описывается функцией Ландау. Средние потери энергии частиц при этом рассчитываются с помощью формулы Бете–Блоха. Для получения абсолютного значения потерь в материале величина удельных потерь умножается на плотность вещества и толщину слоя. Распределение Ландау характеризует статистический разброс энергетических потерь вокруг этого среднего значения. Таким образом, при калибровке измерительной системы, регистрирующей сигналы с тонкого пролётного сцинтиллятора, можно использовать среднее значение измеренного заряда Q , сопоставив ему энергию, рассчитанную по формуле Бете–Блоха для пластикового сцинтиллятора с толщиной 325 мкм. Итоговое значение энергопотерь равняется 64.35 кэВ, а спектр по энергосодержанию для использованного источника $^{90}\text{Sr-Y}$ в тонком сцинтилляторе представлен на рисунке 1.11.

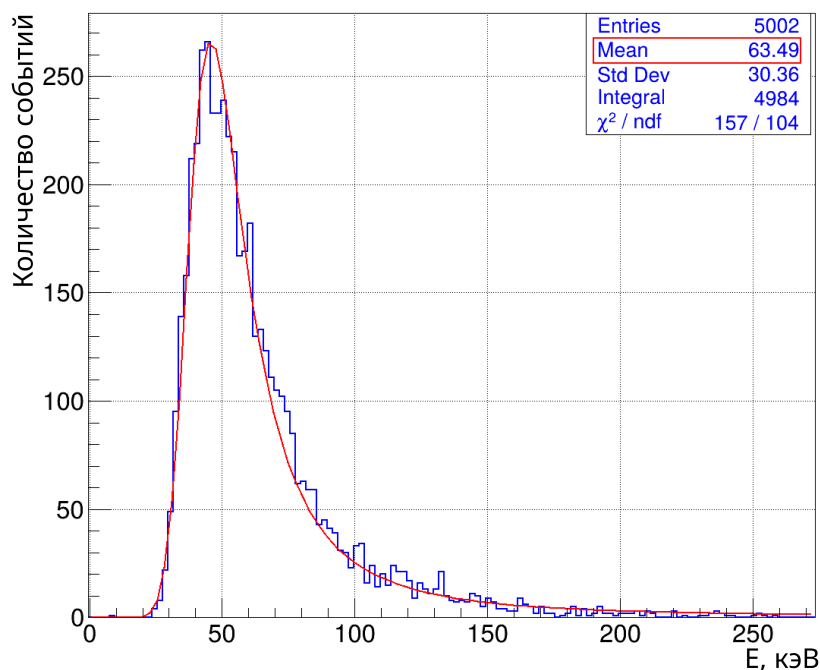


Рисунок 1.11 — Аппаратурная кривая отклика ΔE -детектора на калибровочный источник $^{90}\text{Sr-Y}$ в энергетических единицах. Красная кривая – результат аппроксимации данных сверткой функций Ландау и Гаусса.

После калибровок шкал двух детектирующих систем можно построить итоговые энергетические спектры. Так же с помощью моделирования методом Монте-Карло можно получить спектры по энергосодержанию сцин-

тилляторях, а после процедуры размытия функцией Гаусса и подгонки параметром сравнить их с экспериментом, к примеру спектр с ^{44}Ti рисунке 1.12.

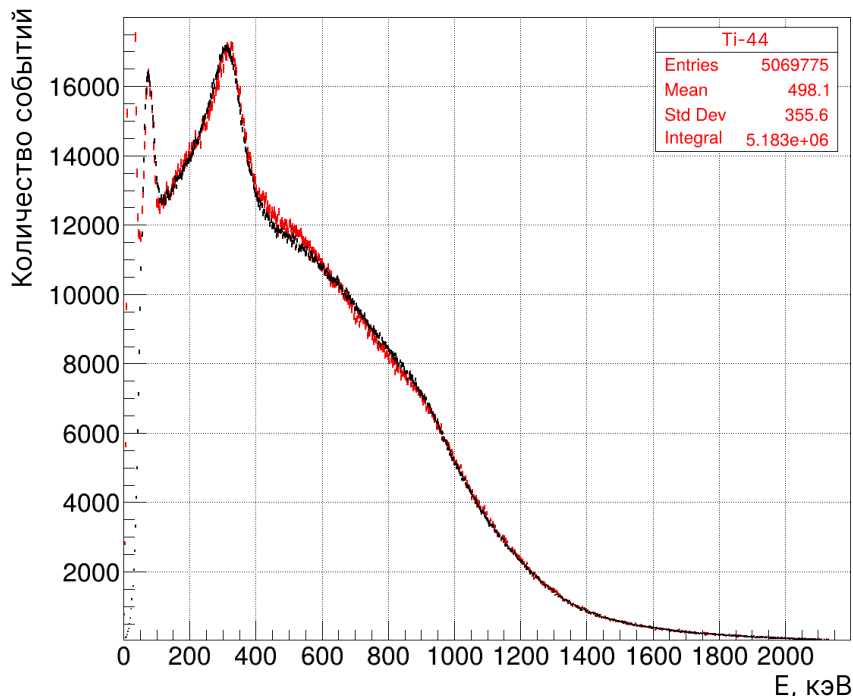


Рисунок 1.12 — Аппаратурная кривая отклика ΔE -детектора на калибровочный источник $^{90}\text{Sr-Y}$ в энергетических единицах. Красная кривая – результат аппроксимации данных сверткой функций Ландау и Гаусса.

1.5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ С КАЛИБРОВОЧНЫМ ИСТОЧНИКОМ ^{207}Bi И СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ДРУГИХ РАБОТ

Одним из наиболее удобных калибровочных источников для бета-спектрометров является ^{207}Bi , который испускает моноэнергетические конверсионные электроны с энергиями 482 и 991 кэВ. На рисунке 1.13 представлена аппаратурная кривая отклика детектора на этот источник, выраженная в энергетических единицах. Энергетическое разрешение (определяемое как отношение полуширины пика к его положению на энергетической

шкале) для пика, соответствующего конверсионным электронам с начальной энергией 991 кэВ, составляет $\sim 22\%$.

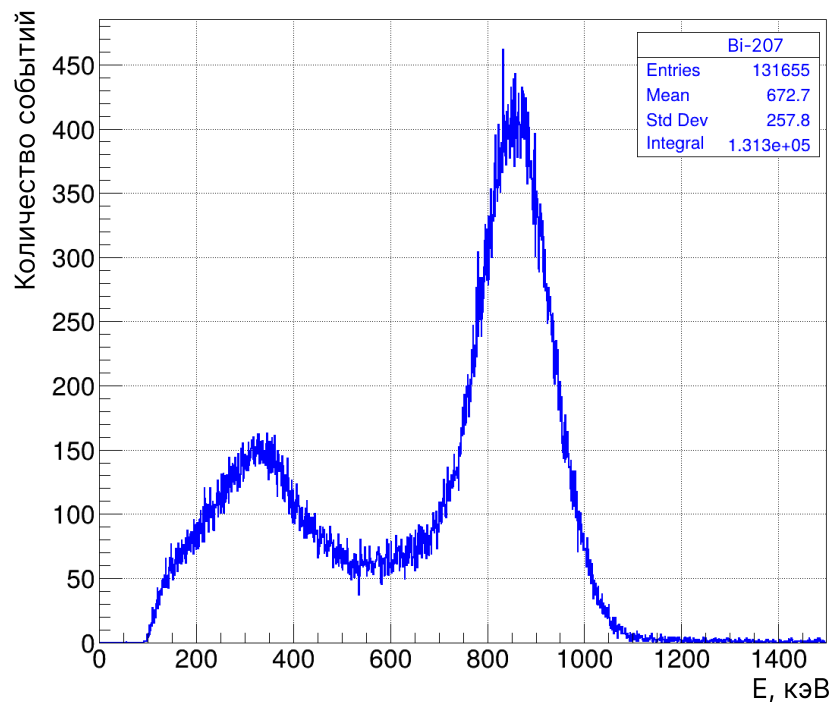


Рисунок 1.13 — Аппаратурная кривая отклика детектора на калибровочный источник ^{207}Bi в энергетических единицах.

Полученные результаты можно сравнить с данными, приведёнными в работе [36], в которой описаны результаты измерений на бета-спектрометре установки БЕТА. В указанной работе энергетическое разрешение для электронов с энергией 991 кэВ составило $\sim 12\%$ (см. рисунок 1.14), что заметно лучше, чем в настоящем измерении.

Существенное различие в величине энергетического разрешения для энергии ~ 1 МэВ между двумя работами объясняется данными фактами:

- 1) В работе [36] использовалась оптическая примазка, обеспечивающая более эффективный сбор света от сцинтиллятора.
- 2) В работе [36] в качестве основного сцинтиллятора применялся кристалл стибьена, световыход которого значительно превышает световыход пластиковых сцинтилляторов, использованных в настоящей работе.

Дополнительно, настоящая работа может быть сопоставлена с результатами, представленными в публикации [37]. В рамках этой работы был

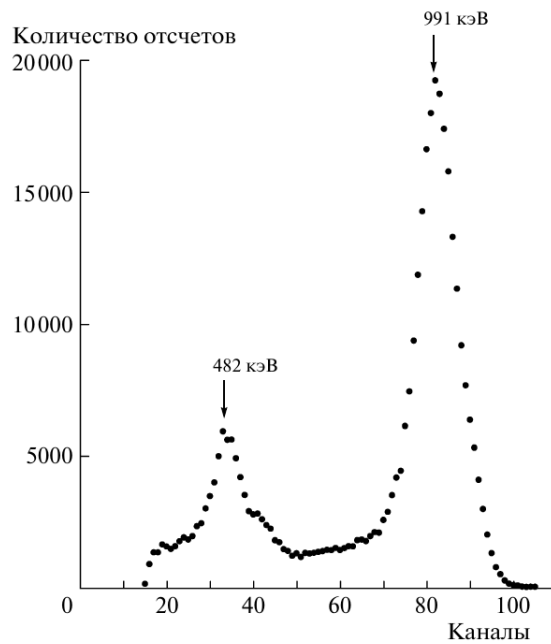


Рисунок 1.14 — Спектр электронов конверсии от источника ^{207}Bi . Энергии пиков 991 и 482 кэВ даны без поправки на потери в воздухе и пленках.

разработан бета-спектрометр, представляющий собой телескопическую систему. Он состоит из двух детекторов, работающих в паре: тонкого кремниевое ΔE -детектора (толщина 500 мкм) и толстого пластикового E -детектора (толщина 7.5 см). Таким образом, концептуально бета-спектрометры, описанные в работе [37] и в настоящей работе, построены по одной и той же схеме.

На рисунке 1.15 представлены экспериментальные спектры отклика детектора на конверсионные электроны от источника ^{207}Bi , полученные авторами работы [37]. Энергетическое разрешение составило $\sim 15\%$ для электронов с энергией 1 МэВ, что лучше значения, полученного в настоящем исследовании ($\sim 22\%$). Однако формы спектров в двух работах существенно различаются. В случае настоящей работы (рисунок 1.13) отчетливо наблюдаются обе конверсионные линии (482 и 991 кэВ), тогда как в работе [37] представлена лишь область спектра вблизи 1 МэВ. Отсутствие низкоэнергетической части спектра в работе [37] авторы объясняют техническими проблемами, которые ограничивали работоспособность их бета-спектрометра в диапазоне энергий ниже 600 кэВ.

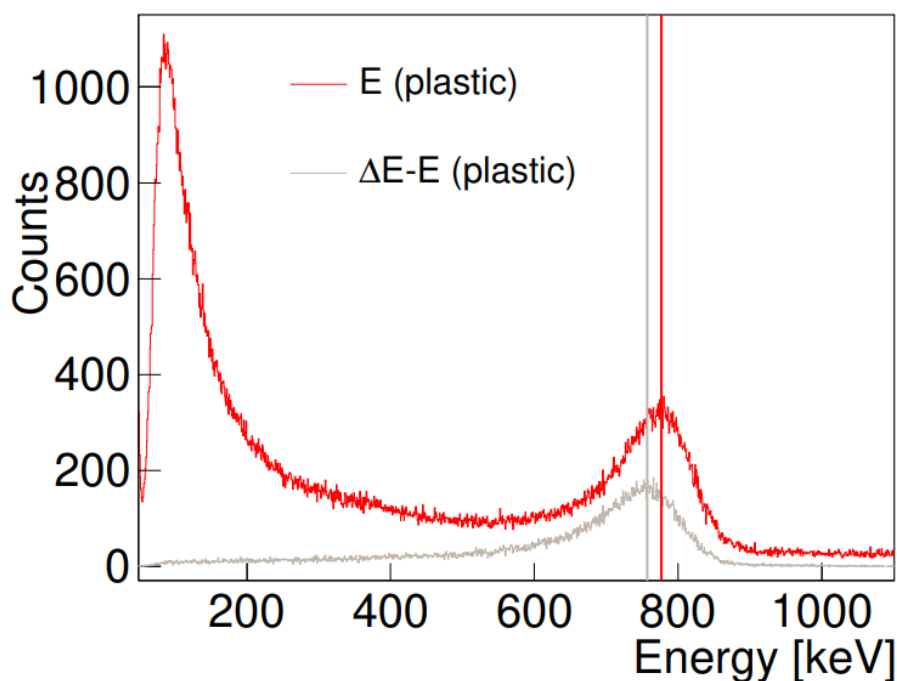


Рисунок 1.15 — Экспериментальный спектр электронов от источника ^{207}Bi с энергией 1 МэВ: красный цвет - без совпадений, серый - по совпадениям с ΔE -детектором. Энергетическое разрешение на 1 МэВ 15%.

1.6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ С ИСТОЧНИКАМИ И ТОНКИМИ СВИНЦОВЫМИ ФОЛЬГАМИ

В эксперименте БЕТА используются мишени из урана и плутония, помещённые в тонкие защитные оболочки: алюминиевую фольгу, полиэтиленовую пленку и фольгу из алюминизированного полиэтилена. Для понимания влияния фольг, в которые помещается источник, на форму спектра бета-частиц были проведены измерения с источником ^{90}Sr -Y и тонкими свинцовыми фольгами толщиной 20, 50 и 100 мкм (рисунок 1.16).

Из представленных результатов видно, что при добавлении свинцовых фольг спектр искажается, а общее число зарегистрированных событий может как увеличиться, так и уменьшиться (все измерения проводились в течение одинакового времени). Изменение спектра в случае добавления свинцовых фольг обусловлено явлением, которое автором работы [36] В.И. Копейкиным принято называть эффектом "разбрызгивания". Физическая природа этого эффекта заключается в следующем: в случае точеч-

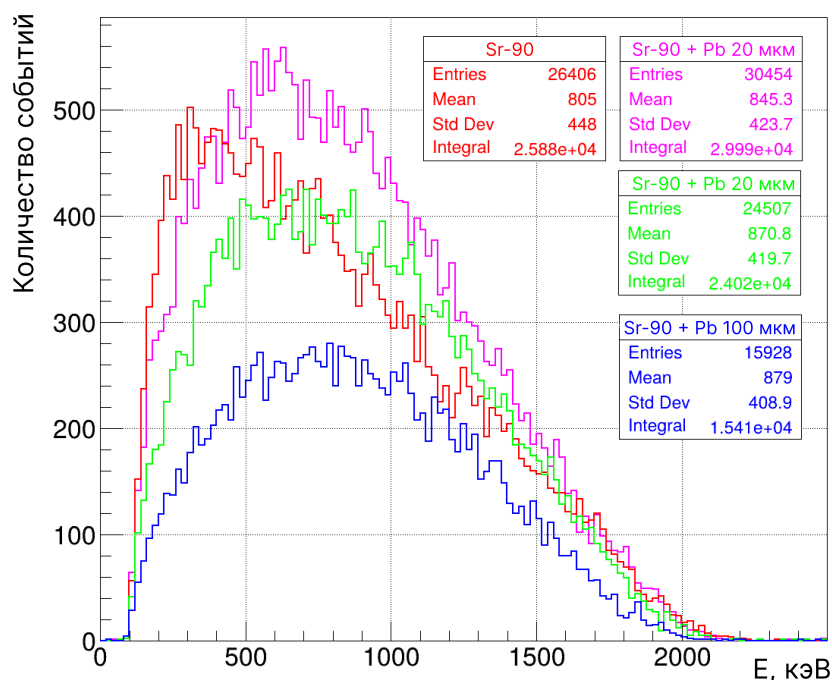


Рисунок 1.16 — Аппаратурная кривая отклика спектрометра на источник $^{90}\text{Sr-Y}$ (с и без свинцовых фольг) в энергетических единицах.

ного источника электроны разлетаются в телесный угол 2π , а при добавлении тонкой фольги, расположенной между источником и детектором, часть электронов, вылетевших под большими углами претерпевают многократное рассеяние в материале фольги. В результате траектория движения электронов изменяется, и часть из них может изменить направление движения в сторону детектора. Так же бета-частицы теряют часть своей энергии в фольге, что приводит к дополнительному смещению спектра.

Аналогичные измерения с тонкими свинцовыми фольгами были проведены и с источником конверсионных электронов ^{207}Bi . Результаты представлены на рисунке 1.17. Как и в случае с $^{90}\text{Sr-Y}$, наблюдается изменение в спектрах с добавлением свинцовых фольг. Пики, соответствующие конверсионным электронам с энергией 991 кэВ смещаются, а так же изменяется количество зарегистрированных событий. Рассеяние в тонких фольгах приводит к уширению пиков, что также хорошо видно на рисунке.

Ранее было сказано, что последняя защитная фольга мишеней из U^{235} и Pu^{239} представляет собой алюминизированный полиэтилен. Образцы данного материала сохранились в лаборатории, поэтому были проведены из-

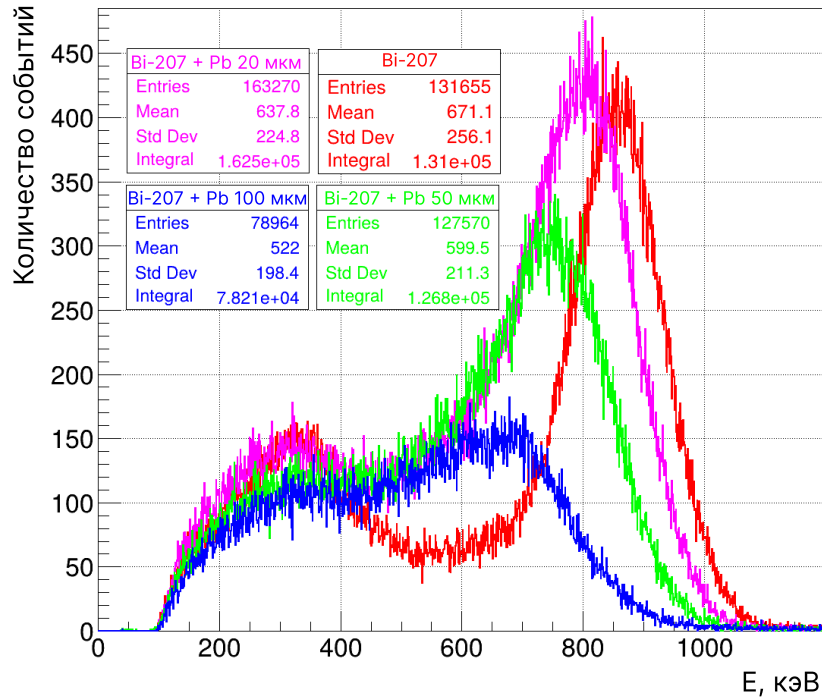


Рисунок 1.17 — Аппаратурная кривая отклика спектрометра на источник ^{207}Bi (с и без свинцовых фольг) в энергетических единицах.

мерения и с ним (рисунок 1.18).

Измерения с алюминизированным полиэтиленом показали, что данный материал также вносит существенные искажения в измеряемый спектр. Характер изменений аналогичен наблюдавшемуся для свинцовых фольг: смещение максимума спектра и уменьшение числа зарегистрированных событий.

По результатам серий измерений с фольгами можно сделать общий вывод: защитные пленки источников излучения значительно искажают регистрируемый спектр бета-частиц. Поэтому в дальнейшем для корректной реконструкции спектра бета-частиц в момент рождения необходимо точно знать толщину, состав и геометрию защитных фольг, а также учитывать их влияние при обработке экспериментальных данных и моделировании методом Монте-Карло.

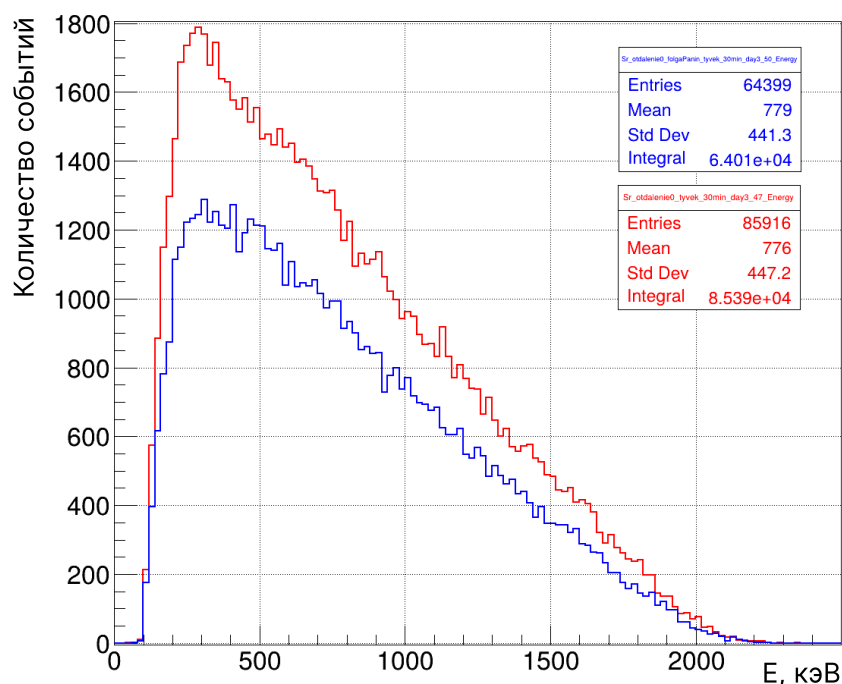


Рисунок 1.18 — Аппаратурная кривая отклика спектрометра на источник ^{90}Sr - Y (с и без алюминизированного полиэтилена) в энергетических единицах.

1.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ ДЛЯ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ В ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ

При прохождении заряженных частиц через материал сцинтиллятора за счёт ионизационных потерь возникают вспышки света — сцинтилляции. Интенсивность вспышки (количество образованных фотонов) прямо пропорциональна энергии, потерянной частицей. Излучение происходит в телесный угол 4π , и лишь часть фотонов достигает фотокатода ФЭУ. Для повышения эффективности светосбора сцинтилляторы помещают в отражатель. Различают два основных типа отражателей: диффузные (рассеивающие свет по всем направлениям) и зеркальные (отражение подчиняется закону Снеллиуса — угол падения равен углу отражения).

Для выбора лучшего отражателя на прототипе бета-спектромера бы-

ла проведена серия измерения с источником ^{137}Cs и светоотражателями:

- 1) Tyvek – диффузный светоотражатель (толщина 275 мкм).
- 2) Mylar – зеркальный светоотражатель (толщина 71 мкм).
- 3) Lumirror – комбинация из диффузного светоотражатель и зеркального (толщина 192 мкм). Используется в экспериментах iDREAM и DarkSide 20k.
- 4) ESR 3M (Enhanced Specular Reflector) – зеркальный светоотражатель (толщина 68 мкм). Используется в экспериментах RED-100 и JUNO.

На рисунке 1.19 приведены аппаратные кривые отклика E-детектора, обернутого в различные отражатели (и без них), на источник ^{137}Cs . По результатам измерений для основного сцинтиллятора выбран отражатель ESR 3M.

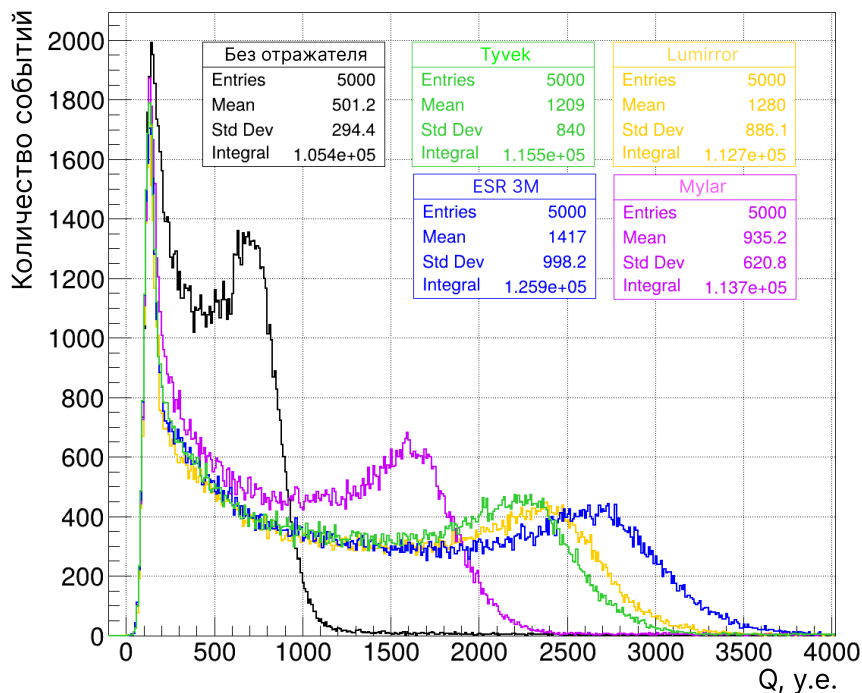


Рисунок 1.19 — Аппаратурная кривая отклика E-детектора, обернутого в различные отражатели (и без них) на источник ^{137}Cs .

2. ПРОТОТИП БЕТА-СПЕКТРОМЕТРА УСТАНОВКИ БЕТА-2

2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТ ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ БЕТА-СПЕКТРОМЕТРА-2

Экспериментальные спектры бета-частиц от изотопов урана и плутония на данный момент измерены до энергий порядка 8 МэВ. Например, в работах группы НИЦ КИ приведено полученное отношение кумулятивных спектров бета-частиц $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$, измеренных группой КИ (НИЦ "Курчатовский институт") и группой ILL (институт Лауэ–Ланжевена) до энергий бета-частиц 8 МэВ (работа [38], рисунок 2.1). Однако по теоретическим расчетам, представленным к примеру в работе [39], верхний предел на энергии образованных бета-частиц лежит выше 8 МэВ.

Одним из способов повышения верхнего предела регистрации бета-частиц является увеличение объема материала основного сцинтиллятора. Так как при взаимодействии бета-частиц с материалом сцинтиллятора их траектория имеет непрямолинейный характер из-за многократного рассеяния. Бета-частиц высоких энергий могут как полностью потерять свою энергию при взаимодействии с материалом сцинтиллятора, так и в результате многократного рассеяния вылететь из материала сцинтиллятора. Поэтому необходимо увеличить размеры основного сцинтиллятора, чтобы предотвратить вылет электронов через боковую поверхность сцинтиллятора, а так же через торец, обращенный к ФЭУ.

Таким образом для будущего бета-спектрометра установки БЕТА-2 был выбран пластиковый сцинтиллятор для Е-детектора с размерами 10

см в диаметре и толщиной 6.5 см. Материал сцинтиллятора – смесь из полистирола, п-терфенила и ПОПОП с плотностью 1.03 гр/см³. Для нового основного сцинтиллятора был выбран ФЭУ Beijing Hamamatsu CR-165, с эффективным диаметром фотокатода 10 см (что соответствует диаметру пластикового сцинтиллятора) и высокой квантовой эффективностью, которая может достигать значения до 40% (рисунок 2.2).

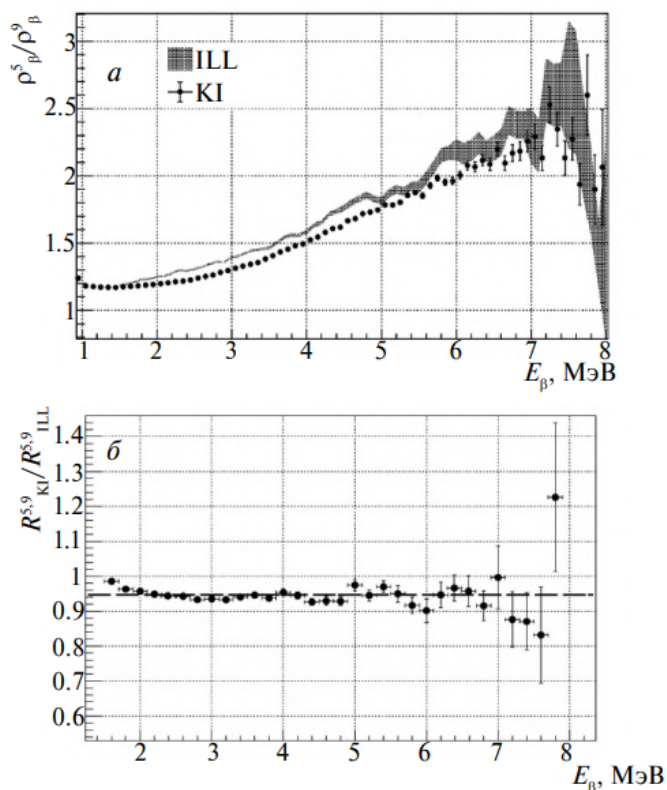


Рисунок 2.1 — Отношение кумулятивных спектров бета-частиц ²³⁵U/²³⁹Pu, измеренных группой КИ (НИЦ “Курчатовский институт”) и группой ИЛЛ (институт Лауэ–Ланжевена). а – отношение спектров бета-частиц КИ и ИЛЛ, б – сопоставление отношения спектров КИ настоящей работы и отношения спектров ИЛЛ.

2.2. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для получения аппаратурных кривых отклика спектрометра на источники излучения, была создана новая сборка, представленная на рисунке 2.3. Сборка включает в себя следующие компоненты:



(а)



(б)

Рисунок 2.2 — ФЭУ Beijing Hamamatsu CR-165. а – вид сбоку. б - вид спереди.

- Тонкий пластиковый сцинтиллятор, состоящий из полистирола, п-терфенила и ПОПОП, размерами 5 x 5 см и толщиной 325 мкм, плотностью 1.03 г/см³.
- Основной пластиковый сцинтиллятор, состоящий из полистирола, п-терфенила и ПОПОП, в виде цилиндра длиной 6.5 см и диаметром 10 см, плотностью 1.03 г/см³.
- Два фотоэлектронных умножителя GoHi N4021-52mm, с эффективным диаметром фотокатода 46 мм, которые расположены по бокам от тонкого пластикового сцинтиллятора.
- Сцинтилляторы обернуты в светоотражающий материал, тонкий сцинтиллятор в tyvek плотностью 0.96 г/см³ и толщиной 0.01 см, а основной сцинтиллятор в Lumirror плотностью 0.96 г/см³ и толщиной 0.01 см.

Все компоненты детектирующей системы расположены в предварительно созданной опорной конструкции, которая обеспечивает соосное расположение детектирующих устройств, а так же надлежащее крепление тонкого сцинтилляционного детектора и расположение калибрующих источников.

На рисунках 2.4–2.5 представлены аппаратные кривые отклика спек-

тронметра на источники излучения в энергетических единицах. Калибровка шкалы основного детектора проводилась с помощью сопоставления каждого комптоновского края гамма-линий в зарядовых единицах их энергии.

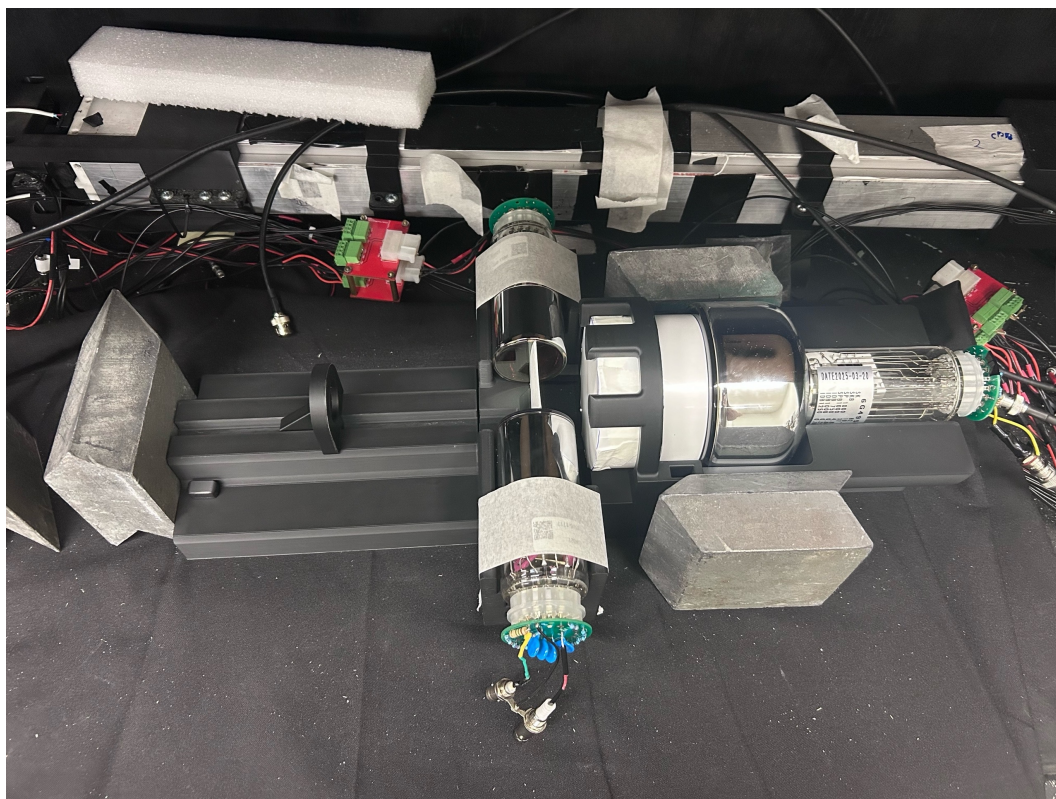


Рисунок 2.3 — Собранный экспериментальная установка для получения аппаратных кривых отклика спектрометра на калибровочные источники.

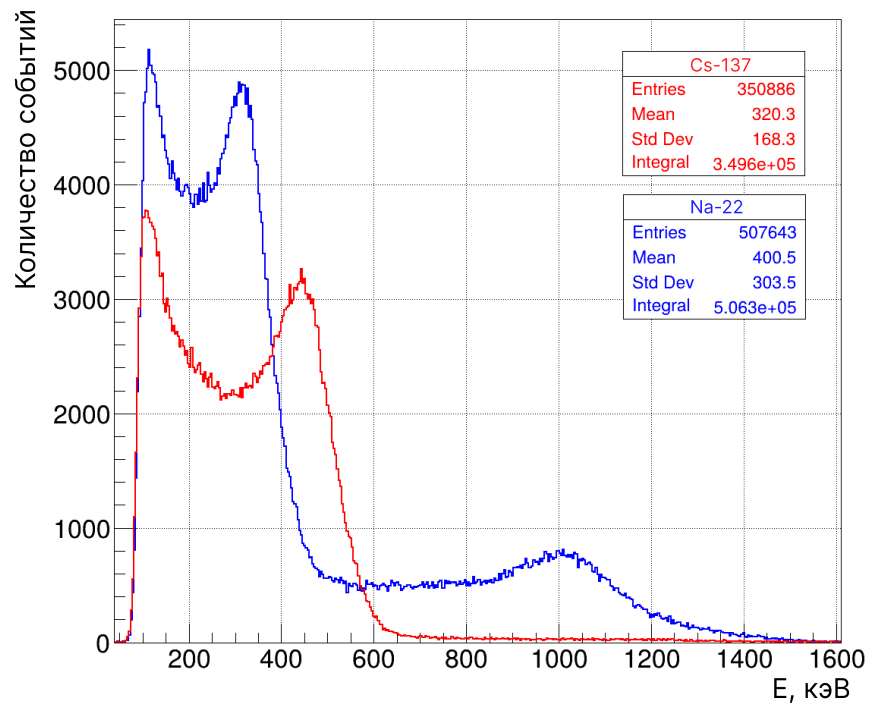


Рисунок 2.4 — Аппаратурная кривая отклика Е-детектора на источники гамма-излучения ^{22}Na и ^{137}Cs в энергетических единицах.

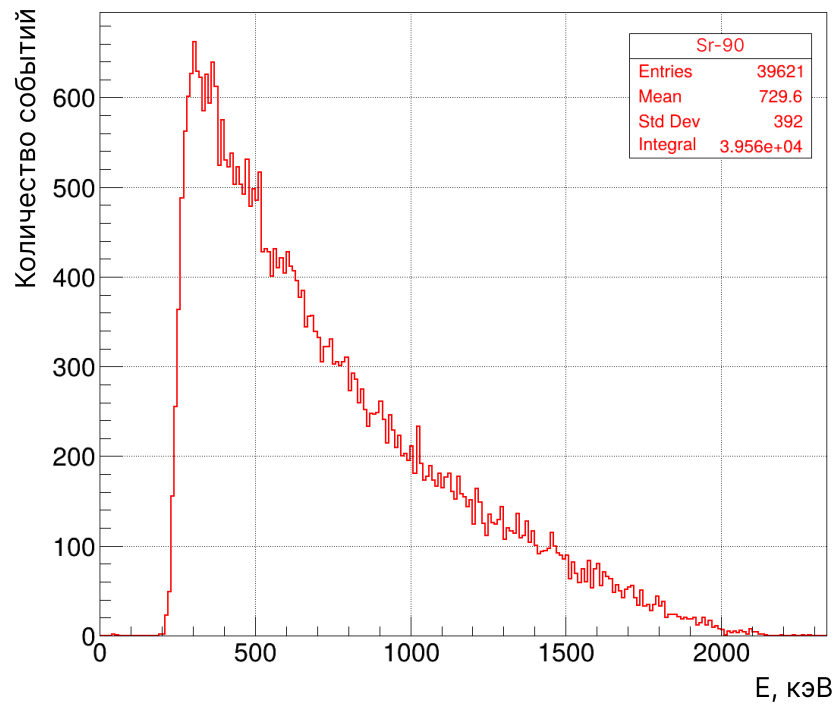


Рисунок 2.5 — Аппаратурная кривая отклика спектрометра на источник $^{90}\text{Sr-Y}$. в энергетических единицах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы за прошедший семестр получены следующие основные результаты:

- 1) Для прототипа сцинтилляционного бета-спектрометра измерены аппаратные кривые отклика пластиковых сцинтилляторов на набор калибровочных источников гамма- и бета-излучения ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{60}Co , ^{44}Ti , $^{90}\text{Sr-Y}$, ^{207}Bi (электроны конверсии).
- 2) С использованием моделирования методом Монте-Карло и многопараметрической подгонки проведена калибровка энергетической шкалы основного детектора с помощью гамма-источников.
- 3) Получены энергетические спектры от источника ^{207}Bi с выделенными конверсионными линиями (482 и 991 кэВ). Энергетическое разрешение для пика 991 кэВ составило 22%. Проведённое сравнение с работой [36] показало, что полученное разрешение больше значения 12%. Данное различие обусловлено двумя причинами: использованием сцинтиллятора из стильбена с более высоким световыходом и применением оптической примазки в указанной работе.
- 4) В серии экспериментов с тонкими свинцовыми фольгами (20, 50, 100 мкм) и с фольгой из алюминизированного полиэтилена выявлено значительное искажение формы спектра бета-частиц: наблюдается смещение спектра как в сторону меньших энергий, так и в сторону больших энергий, уширение пиков и уменьшение полного числа зарегистрированных событий. Данное искажение спектра обусловлено эффектом «разбрызгивания» – явления, когда фольга, перекрывающая точечный источник, сама становится источником электронов, в связи с их многократным рассеянием.
- 5) По результатам сравнительных измерений с четырьмя типами светотражателей (Tyvek, Mylar, Lumirror, ESR 3M) для основного сцинтиллятора выбран отражатель ESR 3M, обеспечивающий наилучший светосбор. Для тонкого пролётного сцинтиллятора сохраняется ис-

пользование Tyvek как оптимального диффузного отражателя.

Собрана и протестирована новая детектирующая система будущей установки БЕТА-2 с увеличенным основным сцинтиллятором (диаметр 10 см, толщина 6.5 см) и новым ФЭУ Beijing Hamamatsu CR-165. Получены первые экспериментальные спектры от калибровочных источников ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{90}Sr -Y.

Автор выражает благодарность сотруднику кафедры № 24 Левцову Ивану Сергеевичу за предоставление источника ^{207}Bi .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Fermi. E.* Experimental Production of a Divergent Chain Reaction // American Journal of Physics. — 1952. — Vol. 20. — P. 536–558.
2. Развитие реакторной экспериментальной базы НИЦ "Курчатовский институт": от пуска Ф-1 до 60-летия реактора ИР-8 / М. В. Ковальчук, В. И. Ильгисонис, Я. И. Штромбах [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. — 2017. — № 3. — С. 4–16. — (Физика ядерных реакторов).
3. *Копейкин В., Скорохватов М.* Особенности протекания реакции обратного бета-распада на протоне в потоке антинейтрино ядерного реактора // Ядерная физика. — 2017. — Т. 80. — С. 142–150.
4. *Reines F., Cowan C. L.* Detection of the free neutrino // Physical Review. — 1953. — Vol. 92. — P. 830–831.
5. *Reines F., Cowan C. L.* A Proposed Experiment to Detect the Free Neutrino // Phys. Rev. — 1953. — Vol. 90, no. 3. — P. 492–493.
6. *Reines F., Cowan C. L.* The neutrino // Nature. — 1956. — Vol. 178. — P. 446–449.
7. Detection of the Free Neutrino: a Confirmation / C. L. Cowan [et al.] // Science. — 1956. — Vol. 124, no. 3212. — P. 103–104.
8. First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Antineutrino Disappearance / K. Eguchi [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2003. — Т. 90, № 2. — С. 021802.
9. Indication of Reactor ν_e Disappearance in the Double Chooz Experiment / Y. Abe [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2012. — Т. 108, № 13. — С. 131801.
10. Observation of Reactor Electron Antineutrinos Disappearance in the RENO Experiment / J. K. Ahn [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2012. — Т. 108, № 19. — С. 191802.

11. Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay / F. P. An [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2012. — Т. 108, № 17. — С. 171803.
12. Neutrino physics with JUNO / F. An [et al.] // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. — 2016. — Vol. 43, no. 3. — P. 030401.
13. Determination of the neutrino mass hierarchy at an intermediate baseline / L. Zhan [et al.] // Phys. Rev. D. — 2008. — Vol. 78, no. 11. — P. 111103.
14. STEREO neutrino spectrum of ^{235}U fission rejects sterile neutrino hypothesis / H. Almazán [et al.] // Nature. — 2023. — Vol. 613, no. 7943. — P. 257–261.
15. Final Search for Short-Baseline Neutrino Oscillations with the PROSPECT-I Detector at HFIR / M. Andriamirado [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2025. — Vol. 134, no. 15. — P. 151802.
16. *Mikaelian L. A.* Neutrino laboratory in the atomic plant // Proceedings of the International Conference "Neutrino 77". Vol. 2. — 1978. — P. 383–385.
17. *Borovoi A. A., Mikaelyan L. A.* Possibilities of the practical use of neutrinos // Soviet Atomic Energy. — 1978. — Vol. 44. — P. 589–592.
18. Neutrino method remote measurement of reactor power and power output / Y. V. Klimov [et al.] // Atomic Energy. — 1994. — Vol. 76. — P. 123–127.
19. First ground-level laboratory test of the two-phase xenon emission detector RED-100 / D. Y. Akimov [et al.] // JINST. — 2020. — Vol. 15, no. 02. — P02020.
20. iDREAM: Industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin nuclear power plant / A. Abramov [et al.]. — 2021.
21. Improved predictions of reactor antineutrino spectra / T. A. Mueller [et al.] // Phys. Rev. C. — 2011. — Vol. 83, issue 5. — P. 054615.
22. Updated Summation Model: An Improved Agreement with the Daya Bay Antineutrino Fluxes / M. Estienne [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2019. — Vol. 123, issue 2. — P. 022502.

23. Origin of the Reactor Antineutrino Anomalies in Light of a New Summation Model with Parametrized β^- Transitions / A. Letourneau [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2023. — Vol. 130, issue 2. — P. 021801.
24. A comprehensive revision of the summation method for the prediction of reactor antineutrino fluxes and spectra / L. Perissé [et al.]. — 2023.
25. The essential decay of pandemonium: A demonstration of errors in complex beta-decay schemes / J. Hardy [et al.] // Physics Letters B. — 1977. — Vol. 71, no. 2. — P. 307–310.
26. Absolute measurement of the beta spectrum from ^{235}U fission as a basis for reactor antineutrino experiments / K. Schreckenbach [et al.] // Phys. Lett. B. — 1981. — Vol. 99. — P. 251–256.
27. *Feilitzsch F. von, Hahn A. A., Schreckenbach K.* Experimental beta-spectra from ^{239}Pu and ^{235}U thermal neutron fission products and their correlated antineutrino spectra // Phys. Lett. B. — 1982. — Vol. 118. — P. 162–166.
28. Determination of the antineutrino spectrum from ^{235}U thermal neutron fission products up to 9.5 MeV / K. Schreckenbach [et al.] // Phys. Lett. B. — 1985. — Vol. 160. — P. 325–330.
29. Anti-neutrino Spectra From ^{241}Pu and ^{239}Pu Thermal Neutron Fission Products / A. A. Hahn [et al.] // Phys. Lett. B. — 1989. — Vol. 218. — P. 365–368.
30. The double focusing iron-core electron-spectrometer “BILL” for high resolution (n, e) measurements at the high flux reactor in Grenoble / W. Mampe [et al.] // Nuclear Instruments and Methods. — 1978. — Vol. 154, no. 1. — P. 127–149.
31. Reactor Anti-neutrino Spectra and Their Application to Anti-neutrino Induced Reactions. 2 / P. Vogel [et al.] // Phys. Rev. C. — 1981. — Vol. 24. — P. 1543–1553.
32. Experimental Determination of the Antineutrino Spectrum of the Fission Products of ^{238}U / N. Haag [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2014. — Vol. 112, no. 12. — P. 122501.

33. The Reactor Antineutrino Anomaly / G. Mention [et al.] // Phys. Rev. D. — 2011. — Vol. 83. — P. 073006.
34. Possible origins and implications of the shoulder in reactor neutrino spectra / A. C. Hayes [et al.] // Phys. Rev. D. — 2015. — Vol. 92, no. 3. — P. 033015.
35. *Huber P.* NEOS Data and the Origin of the 5 MeV Bump in the Reactor Antineutrino Spectrum // Phys. Rev. Lett. — 2017. — Vol. 118, no. 4. — P. 042502.
36. Высокоселективный спектрометр бета-частиц / В. А. Апалин, К. А. Балыгин, В. И. Зайцев [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2012. — № 1. — С. 28.
37. First measurements with a new β -electron detector for spectral shape studies / V. Guadilla [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2024. — Vol. 19, no. 2. — P02027.
38. *Копейкин В. И., Попов Д. В.* Ревизия кумулятивных спектров бета-частиц продуктов деления изотопов ^{235}U , ^{239}Pu и ^{238}U по результатам измерений отношения спектров $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ // Ядерная физика. — 2025. — Т. 88, № 1. — С. 5–9.
39. Comprehensive Revision of the Summation Method for the Prediction of Reactor $\bar{\nu}_e$ Fluxes and Spectra / L. Périssé [et al.] // Phys. Rev. C. — 2023. — Vol. 108, no. 5. — P. 055501.