



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»



**Разработка методики получения ^{37}Ar
для калибровки двухфазного эмиссионного детектора RED-100**

Ага-Курбонова Ф.Б

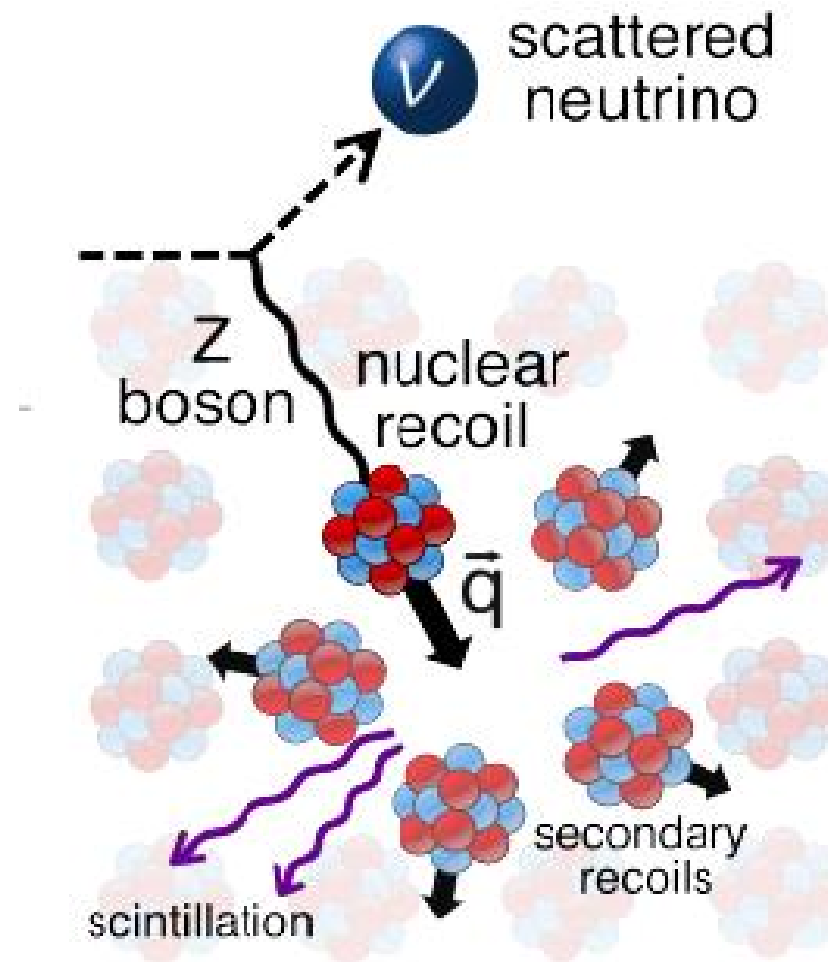
Москва 2025

Упругое когерентное рассеяние нейтрино (антинейтрино) на атомном ядре

Сечение процесса УКРН пропорционально количеству нейтронов в ядре:

$$\sigma_{\text{coh}} \sim 0.4 \times 10^{-44} N^2 (E_\nu^2) [\text{см}^2]$$

где N - количество нейтронов в ядре,
 E_ν - энергия нейтрино, МэВ.

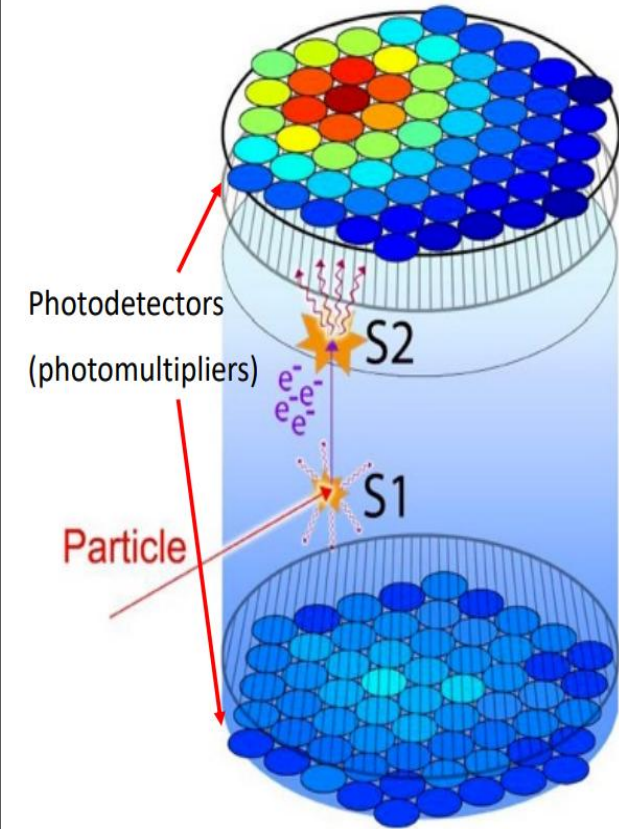


Схематическое изображение процесса УКРН.

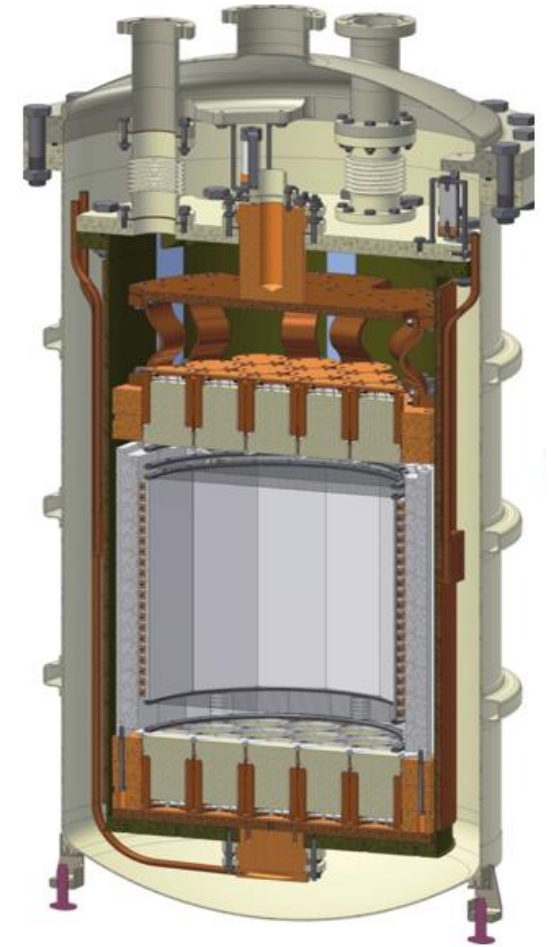
Двухфазный эмиссионный детектор на основе сжиженного аргона

Детектор РЭД-100

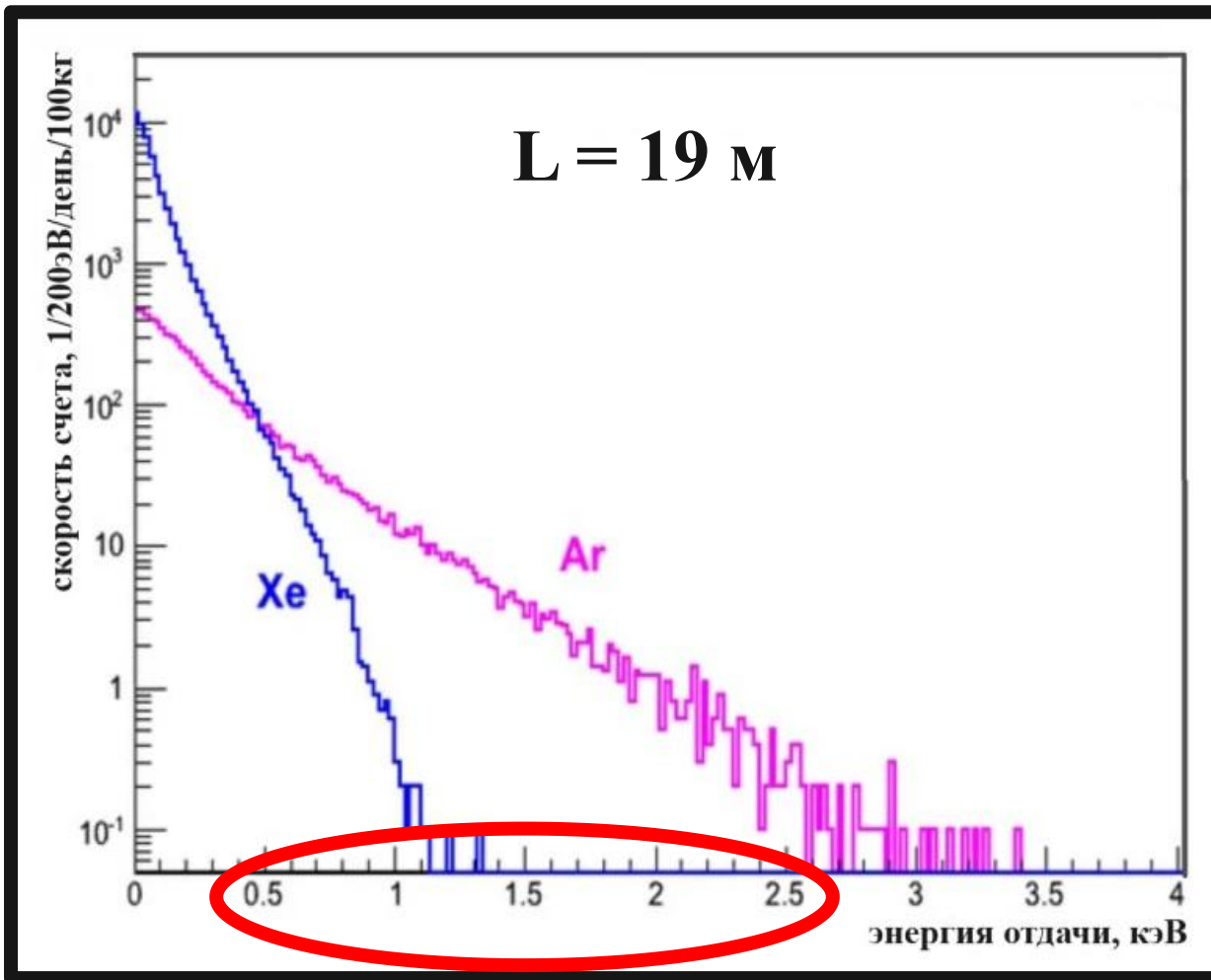
- двухфазный эмиссионный детектор содержит ~ 77 кг LAr;
- матрицы из 26 ФЭУ Hamamatsu R11410-20 (19 в верхней матрице, 7 в нижней) с использованием спектросместителя ТФБ;
- криогенная система детектора обеспечивает работоспособность детектора при температуре $-186\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Технология двухфазного метода регистрации частиц.



Вид в поперечном разрезе детектора.



Актуальным является процесс энергетической калибровки детектора в области энергий ~ 1 кэВ

Зависимость ожидаемой скорости счета нейтрино от энергии ядер отдачи в детекторе РЭД-100.

Выбор ^{37}Ar в качестве калибровочного изотопа

В течении 35 суток распадается в стабильный изотоп. Ниже приведена реакция распада:

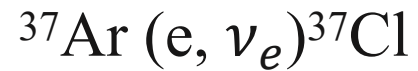


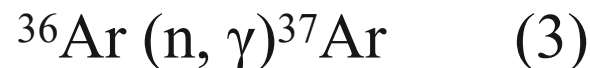
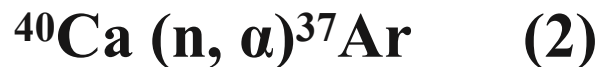
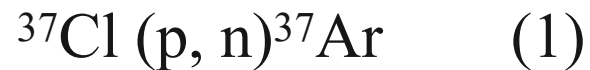
Таблица 1. Характеристики распада атома ^{37}Ar .

Способы распада(захват электронов)	Вероятность всех распадов	Суммарное энерговыделение в детекторе(кэВ)
К-оболочка	0,9021	2,82
L-оболочка	0,0872	0,27
M-оболочка	0,0107	0,0175

С помощью ^{37}Ar можно провести **однородную объёмную калибровку**, путём добавления его в рабочее вещество, так как он хорошо растворяется в жидком благородном газе.

Наработка ^{37}Ar

Радиоизотоп ^{37}Ar может быть получен с помощью нижеприведенных реакций.



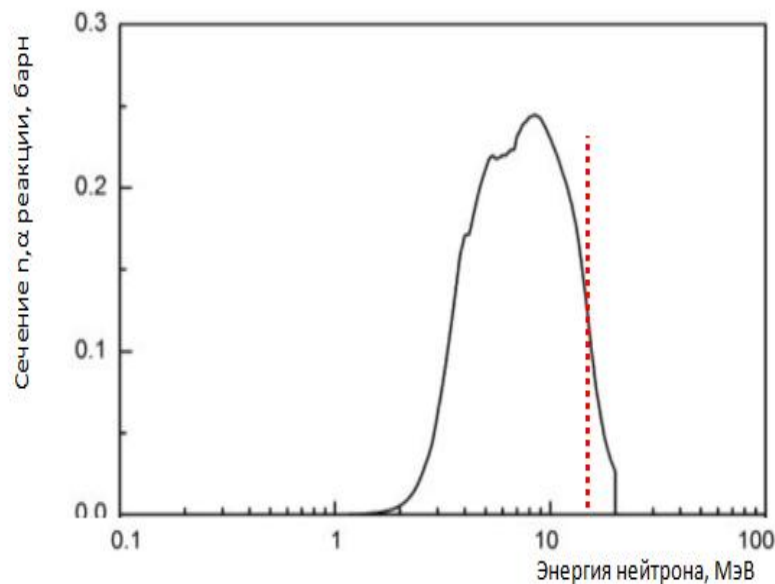
В данной работе наработка ^{37}Ar была проведена с помощью реакции (3).

Преимущества:

- минимальная степень загрязненности нарабатываемого ^{37}Ar ;
- реализуема в лабораторных условиях;

Облучение – генератор ДТ

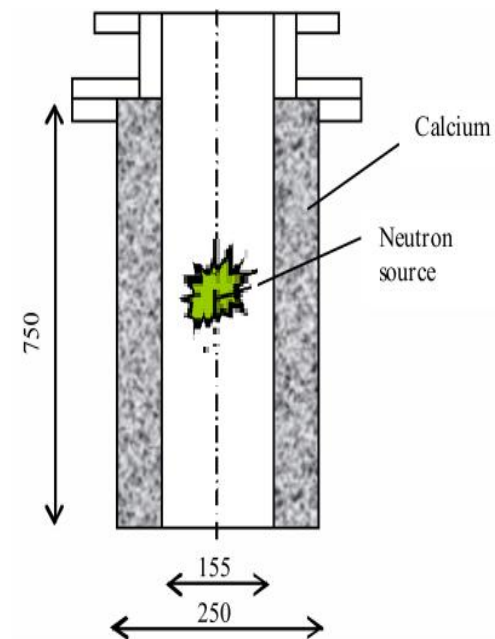
- энергия нейтронов - 14,1 МэВ;
- поток нейтронов 4×10^8 нейт./см²×сек в 4п;
- время непрерывного облучения 20 часов.



Зависимость сечения от энергии нейтрона.

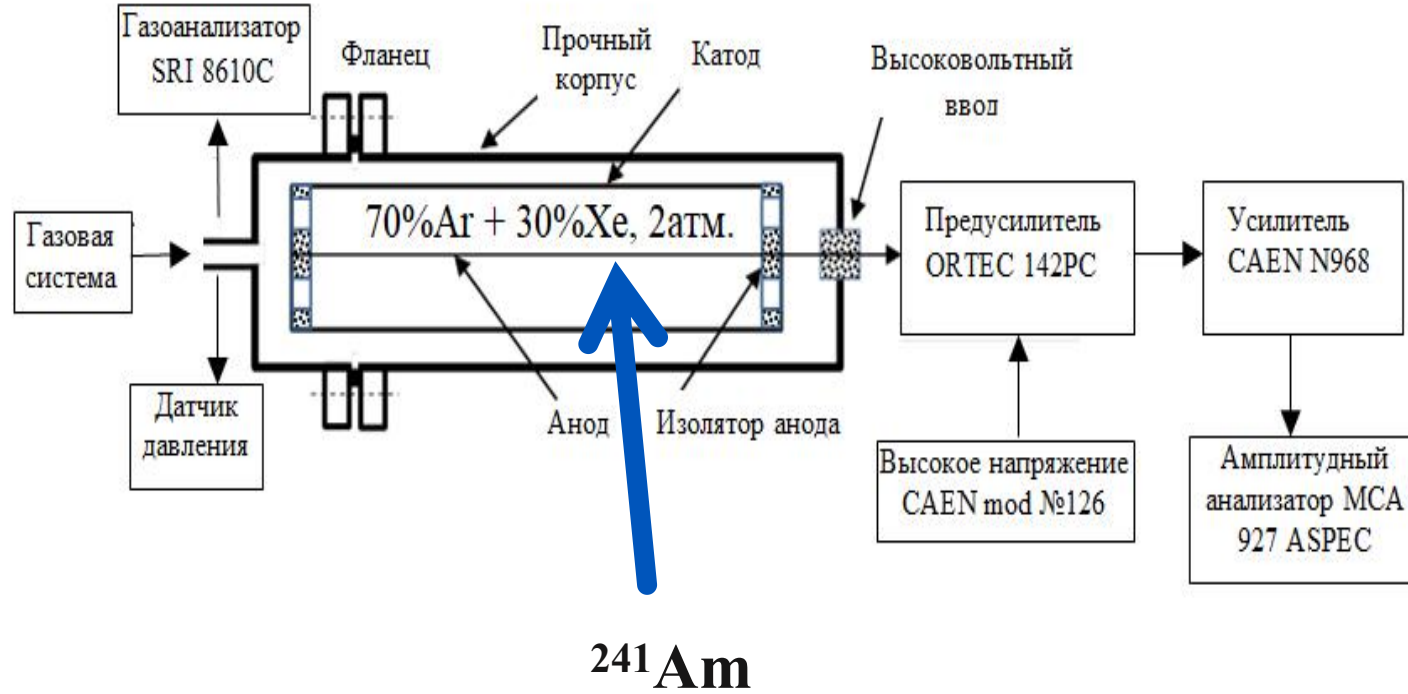
МИШЕНЬ

- мишень ~4 кг кальциевой стружки с размерами ~ 5×10×0,5 мм;
- объем контейнера ~ 22,6 л;
- Заполнен аргоном ВЧ, давление 2 атм (абс), общая масса конструкции ~20 кг



Контейнер, заполненный кальцием. Размеры приведены в мм.

Измерение активности ^{37}Ar



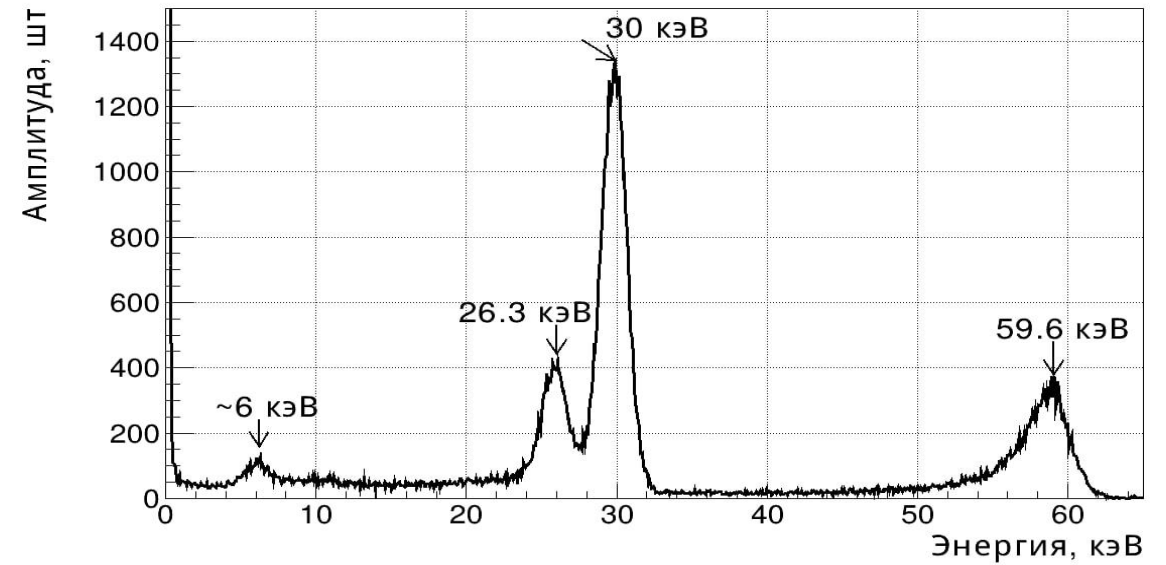
Блок-схема установки по измерению активности ^{37}Ar .



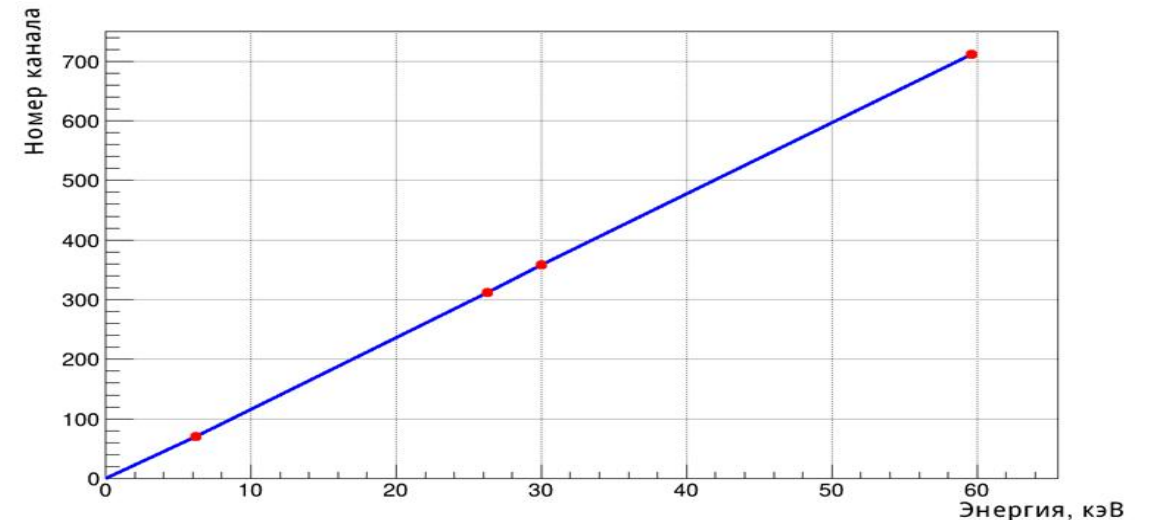
Фото пропорционального счётчика.

Этапы процедуры измерения активности

- заполнение счетчика смесью 70%аргона+30%ксенона при давлении 2 атм (абс) с использованием обычного аргона марки ВЧ;
- измерение амплитудного спектра сигналов от внешнего источника ^{241}Am с целью привязки шкалы анализатора к шкале энергий;
- получение калибровочной прямой.

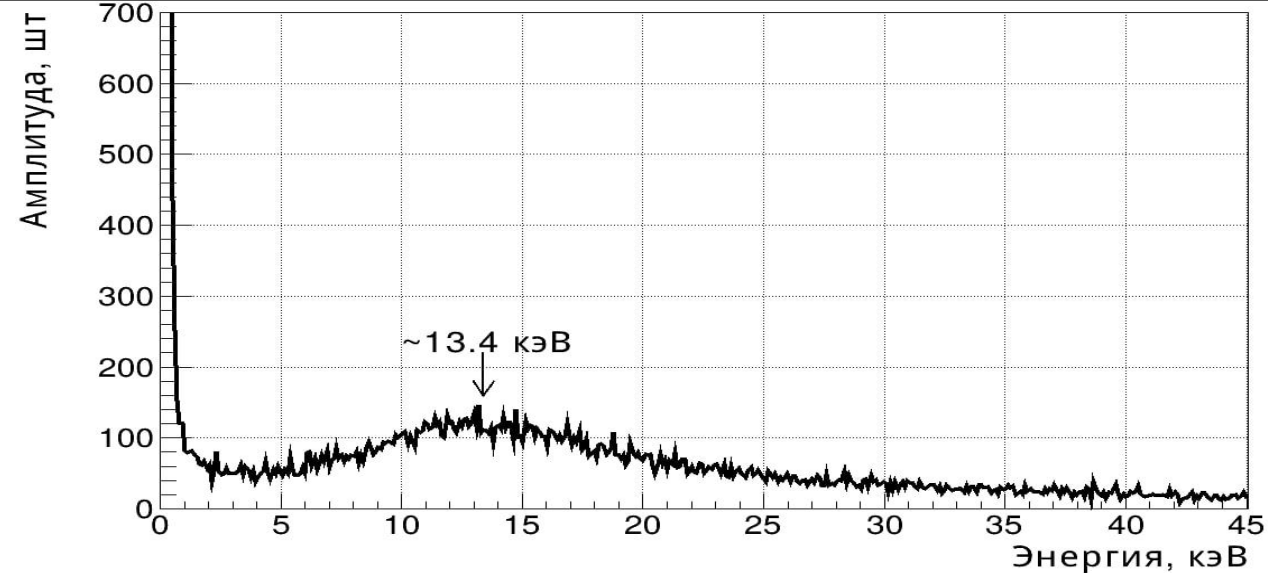


Спектр ^{241}Am в пропорциональном счётчике

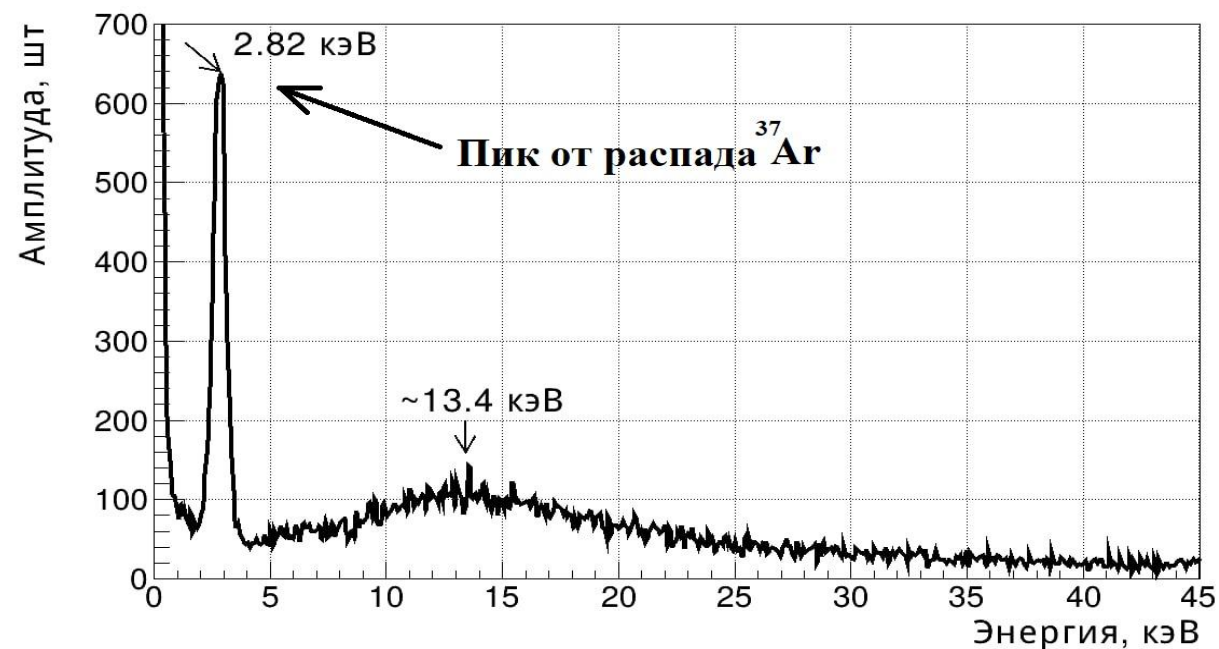


Зависимость канала анализатора от энергии.

- измерение спектра ионизационных потерь космических мюонов за время 10 000 секунд
- откачка указанной смеси и формирование новой, где обычный аргон был заменен на аргон из объема с облученным кальцием
- измерение спектра ионизационных потерь космических мюонов за время 10 000 секунд в новой смеси

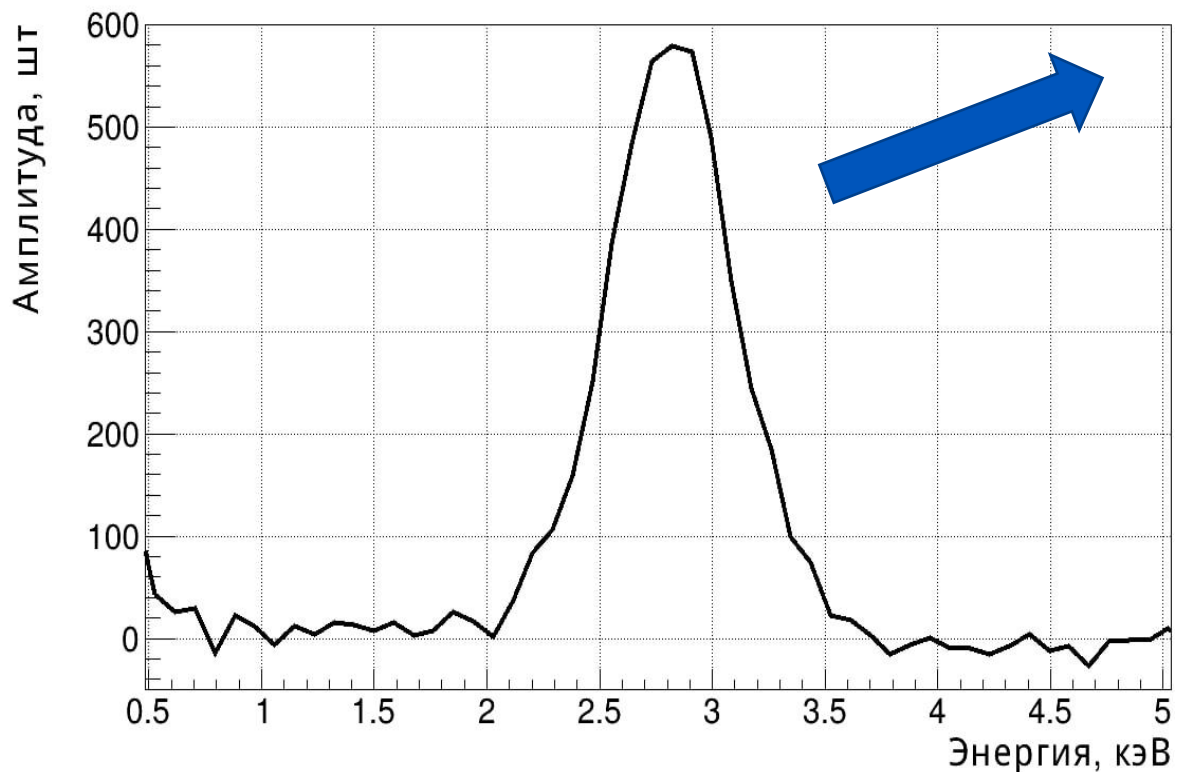


Ионизационные потери мюонов в



Спектр после добавления ^{37}Ar из облученной мишени.

Активность выделенного ^{37}Ar



Разность спектров от мюонов до и после добавления ^{37}Ar в пропорциональном счётчике.

Разность спектров в районе энергии ~ 3 кэВ, демонстрирующая пик от распадов ^{37}Ar , содержит 3676 отсчетов, полученных за время 10 000 сек и позволяет рассчитать активность содержащегося в счетчике ^{37}Ar , что соответствует $\sim 0,37$ Бк.



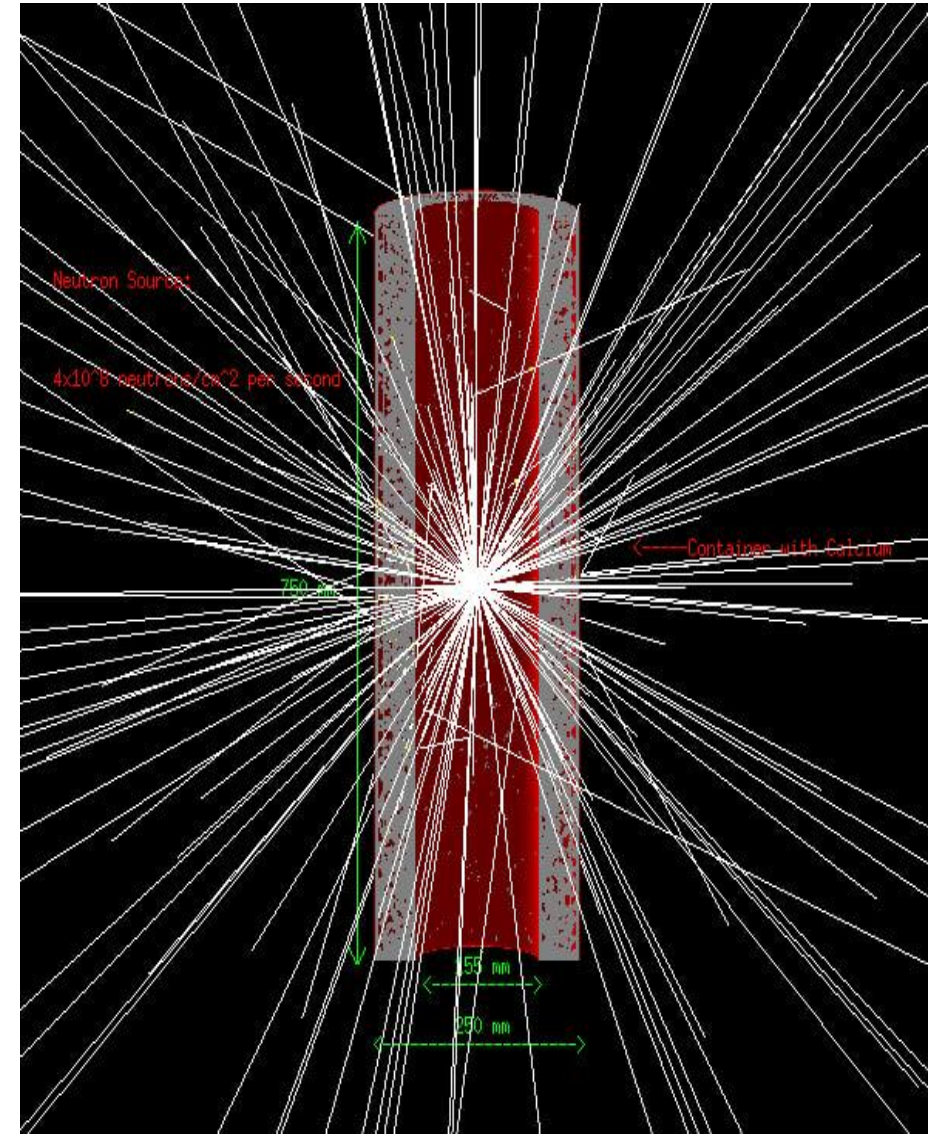
С учетом соотношения количества ^{37}Ar в активном объеме счетчика ($\sim 0,28$ л) и полного количества ^{37}Ar , содержавшегося в облученном объеме с кальциевой стружкой (~ 44 л), полная активность выделенного из мишени с кальциевой стружкой калибровочного материала на момент измерений составила ~ 58 Бк.

Оценка эффективности выделения ^{37}Ar

Моделирование процесса наработки ^{37}Ar было выполнено при помощи метода Монте-Карло с использованием программного пакета Geant4 с учётом геометрии и материалов конструкции (контейнер, заполненный кальциевой стружкой), технических данных D-T генератора и условий облучения.

Результаты моделирования показали, что за 20 часов облучения в используемой мишени было образовано около $\sim 2,5 \times 10^{10}$ атомов ^{37}Ar . С учётом времени распада ^{37}Ar , времени выдержки облучённого образца, транспортировки и нагрева емкости с облученным кальцием, время отведенное на измерение активности выделенного калибровочного изотопа в пропорциональном счётчике оценка эффективности экстракции составляет $\sim 2,6\%$ от общего количества наработанного ^{37}Ar в образце.

Полученная активность выделенного ^{37}Ar достаточна для калибровки детектора РЭД-100.



Модель контейнера в разрезе

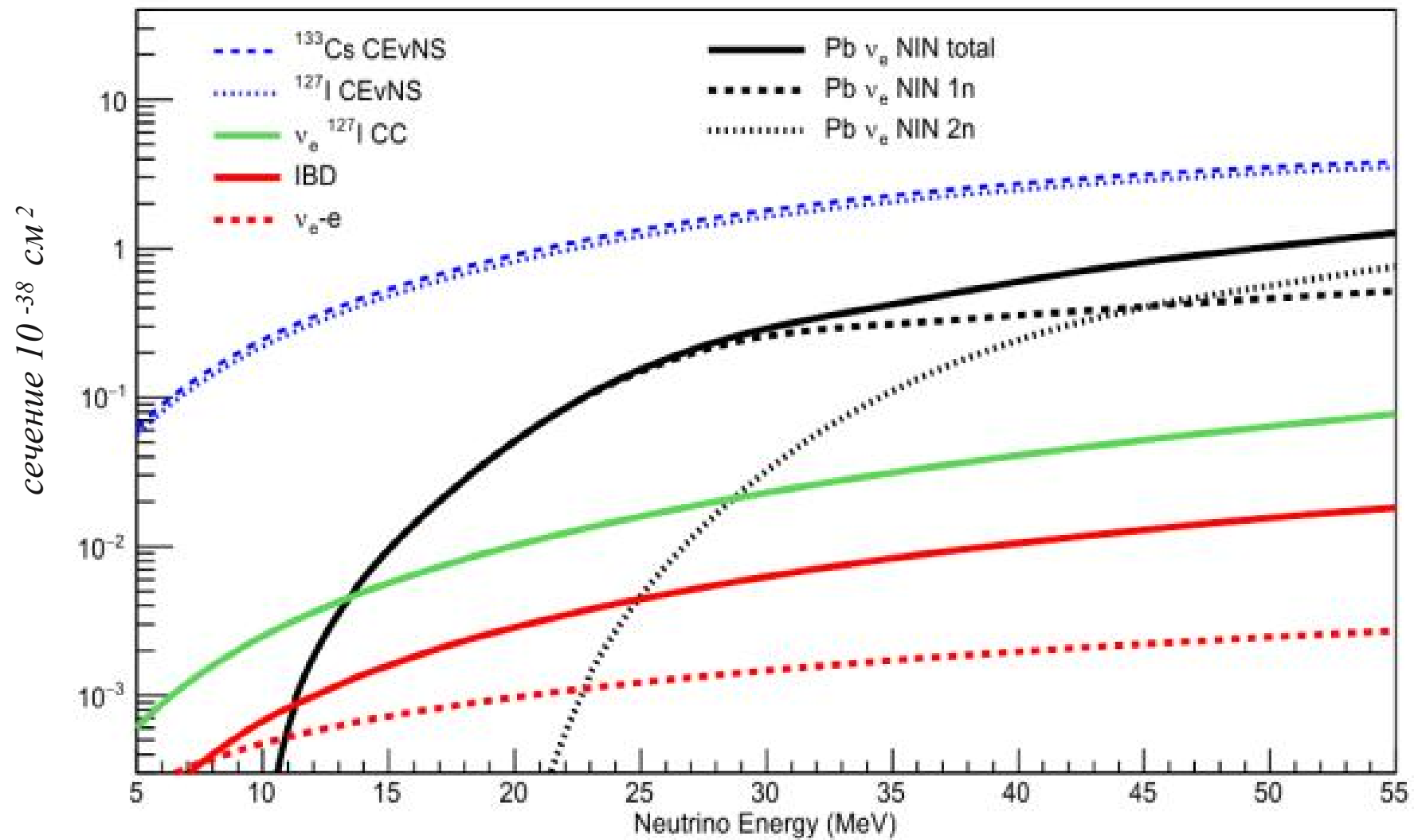
Заключение

- С целью проведения объемной энергетической калибровки РЭД-100 в области ~ 1 кэВ был выбран изотоп ^{37}Ar ;
- Проведена наработка изотопа ^{37}Ar при облучении образцов кальциевой стружки нейтронами от D-T генератора с энергией 14,1 МэВ;
- Измерена активность полученного изотопа ^{37}Ar ;
- Получены оценки эффективности выделения изотопа ^{37}Ar наработанного из облученной нейтронами кальциевой стружки.

Благодарим Российский Научный Фонд за финансовую поддержку работ по модернизации установки РЭД-100 в рамках контракта № 22-12-00082 от 13 мая 2022 года.

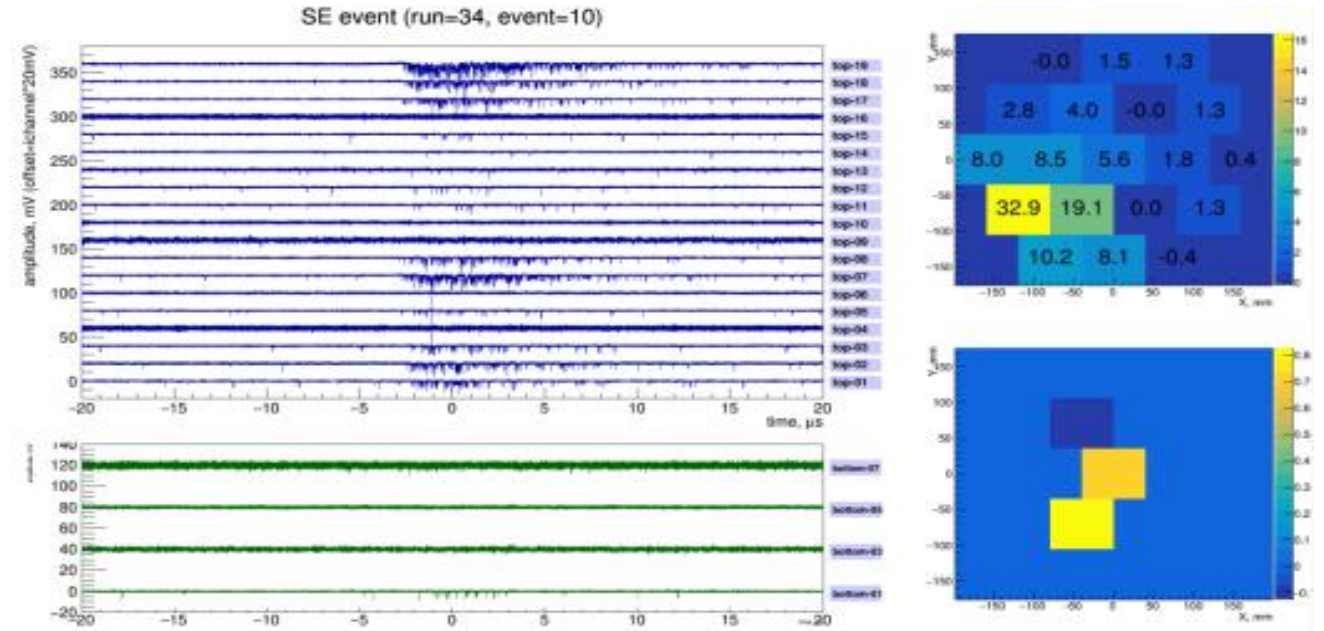
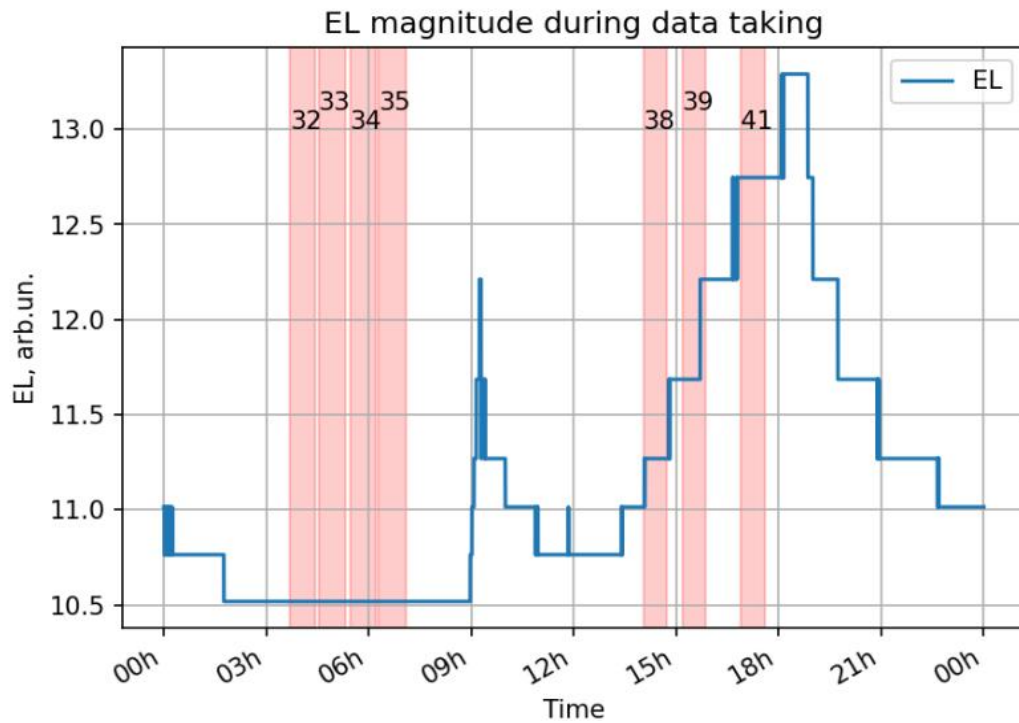


Спасибо за внимание!

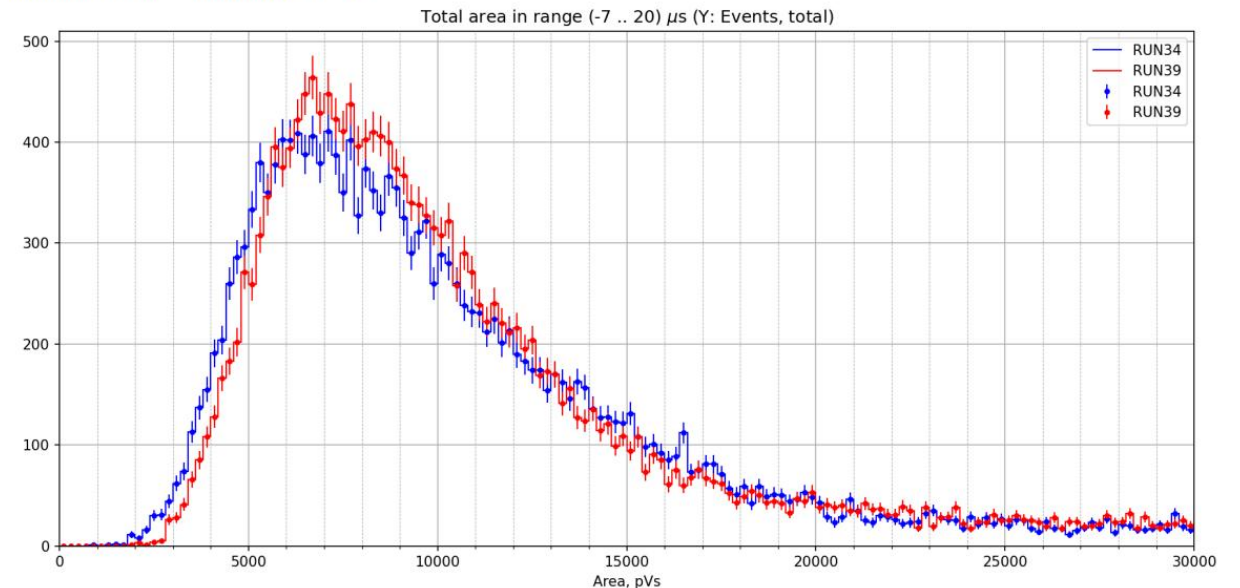


3. Обработка и анализ данных с добавлением ^{37}Ar в РЭД-100

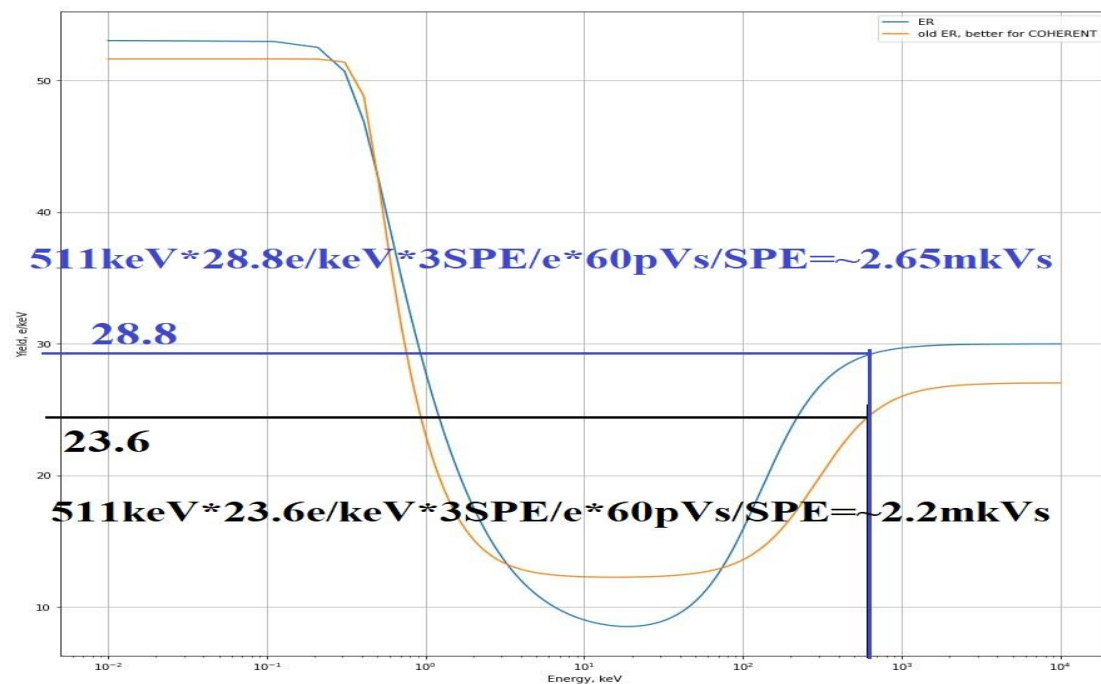
Во время последнего сеанса в РЭД-100 добавили выделенный ^{37}Ar в рабочее вещество и циркулировали его по всему объему, в целях равномерного распределения радиоактивного источника по всему объему. В течение ~ 10 часов набирали данные с и без добавления ^{37}Ar .



Полное число событий (RUN34,39)

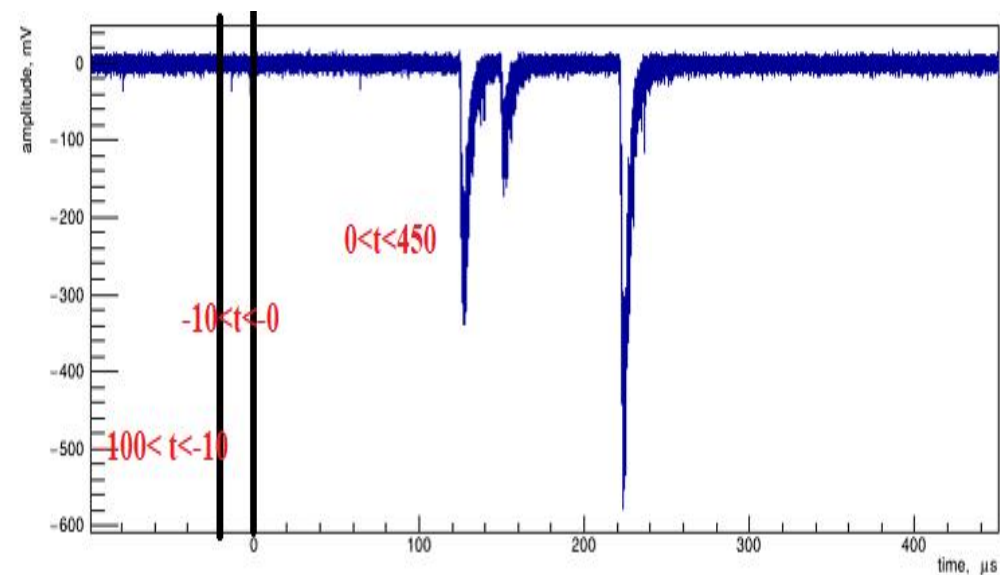


γ калибровка детектора

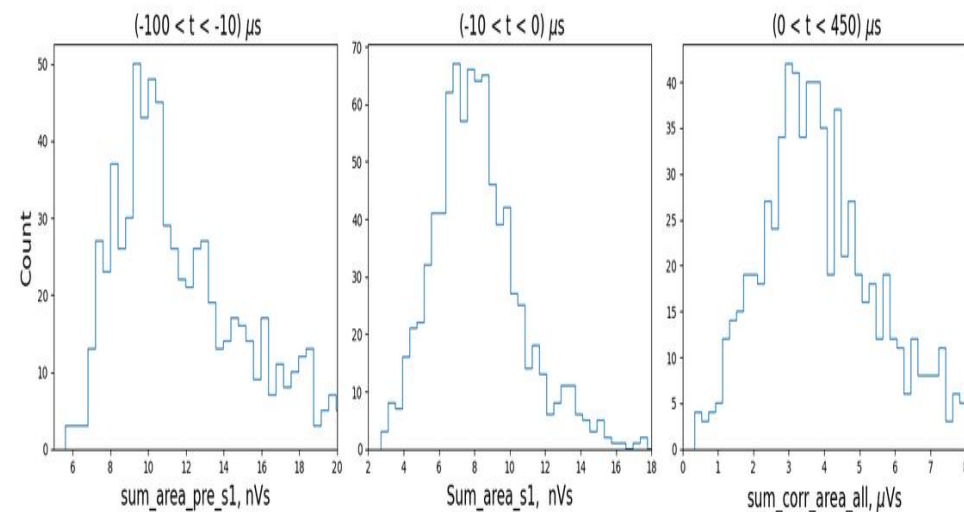


Зависимость ожидаемого выхода электронов от энергии γ-квантов в детекторе РЭД-100.

*NEST (метод моделирования благородных элементов) — которая имитирует процессы сцинтилляции, ионизации и электролюминесценции в благородных элементах.

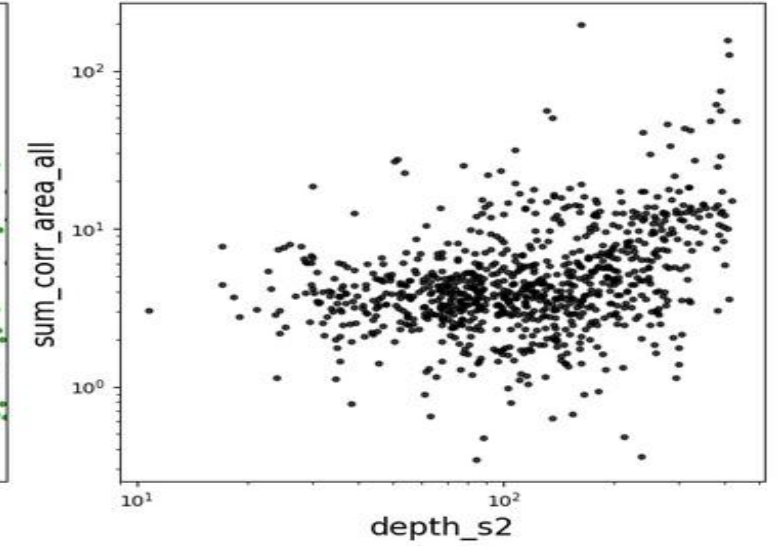
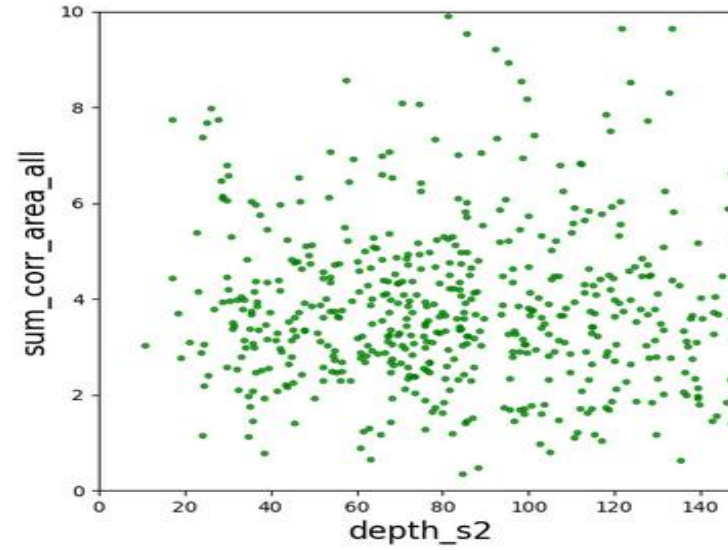
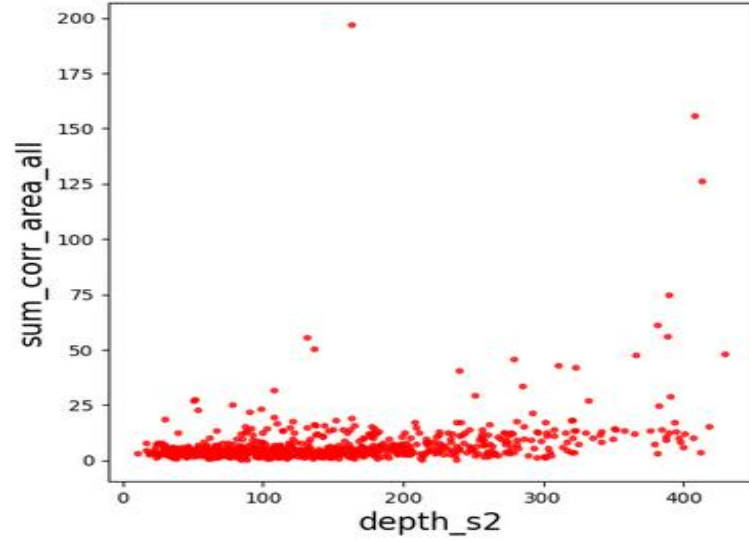


Sum area in RUN51

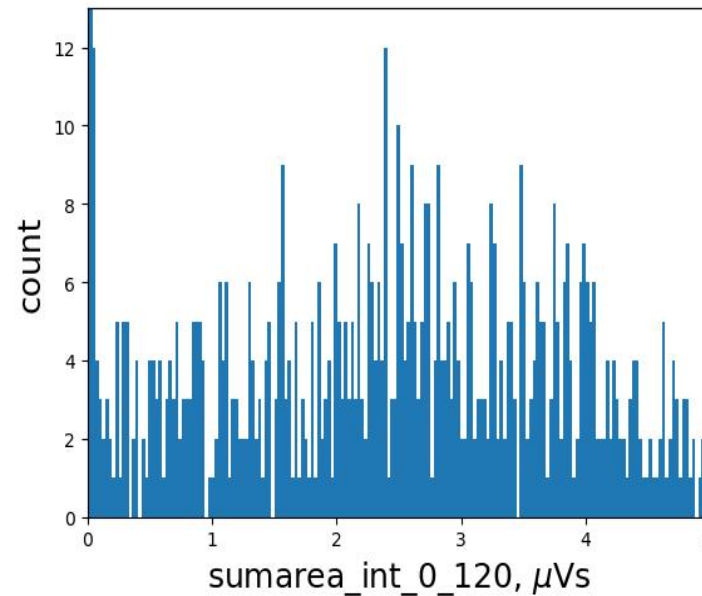
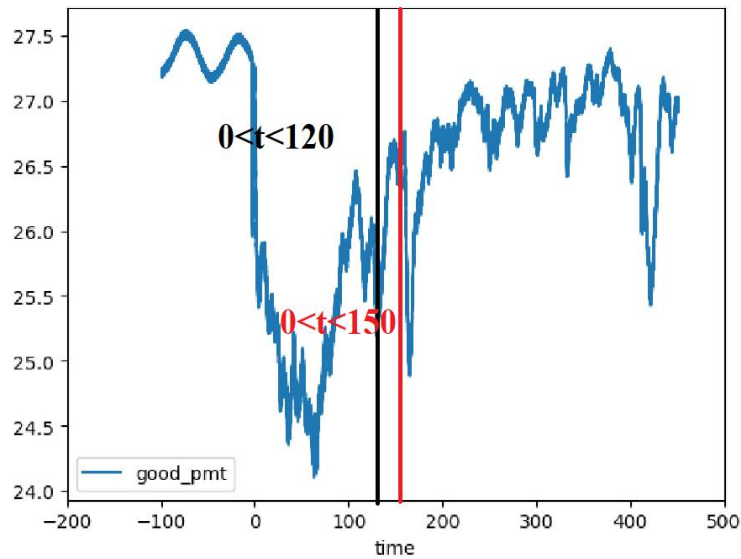


Анализ данных от источника ^{22}Na

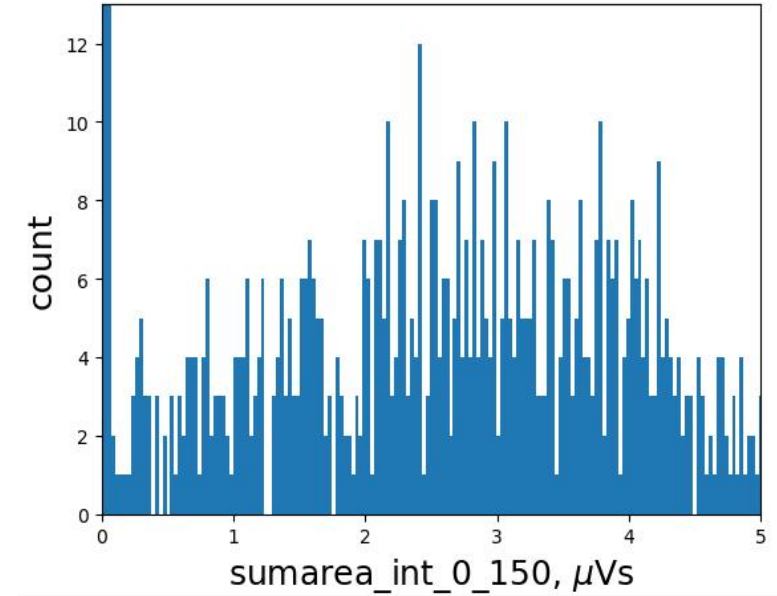
Correlation depth_s2 vs sum_corr_area_all

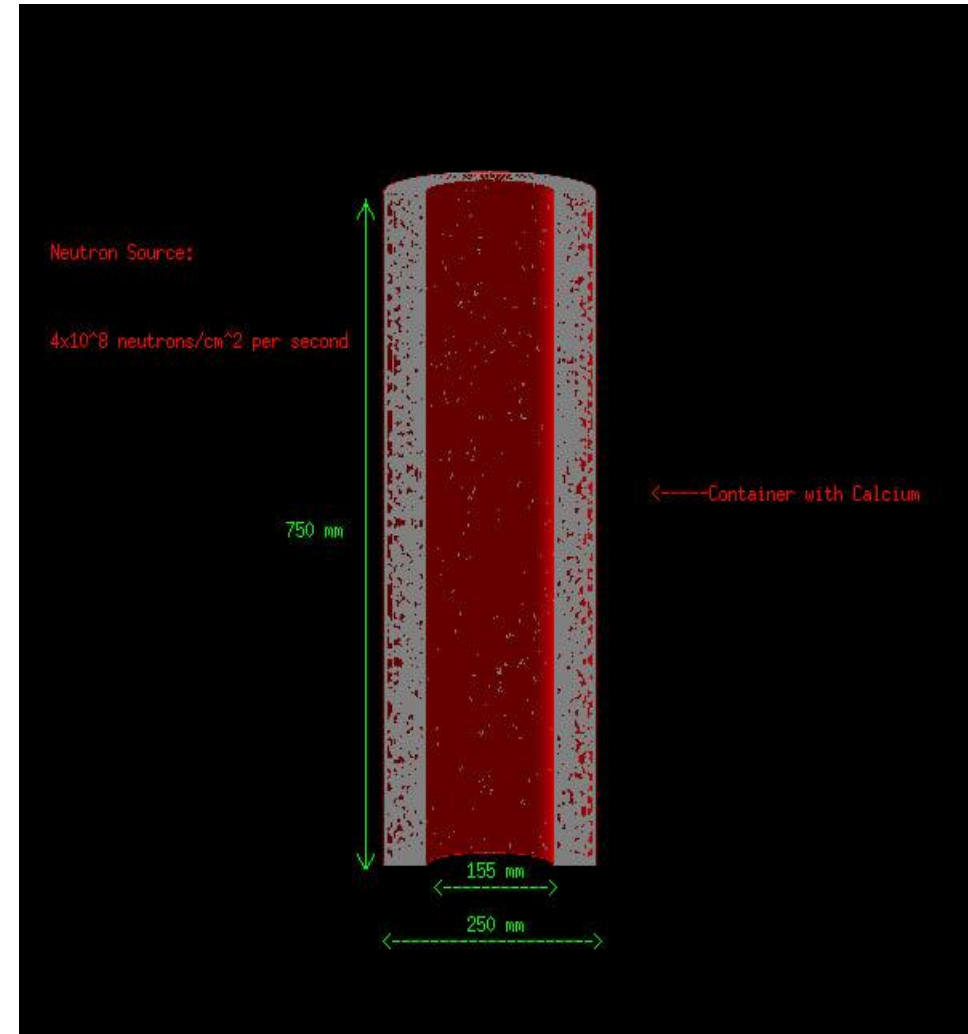


sumarea_int_0_120



sumarea_int_0_150





Energy in gas and difference energy pre_post

