



Моделирование детектора реакторных антинейтрино на основе пластикового сцинтиллятора

Студент: Д.С. Прокопов

Научный руководитель: Д.В. Попов

Научный консультант: Д.А. Чмыхало

Москва, 2025

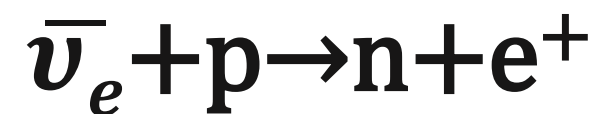


Введение

Нейтринный метод контроля состояния реактора является универсальным и применим для любых типов реакторов (ВВЭР, РБМК, БН).

**Регистрация антинейтринного излучения
позволяет решать следующие задачи:**

- Дистанционный и независимый от оператора энергоблока контроль энерговыработки реактора;
- Мониторинг отработавшего ядерного топлива;
- Выявление несанкционированных режимов работы реактора.



Реакция обратного бета-распада

При регистрации антинейтрино используется метод задержанных совпадений. Сначала регистрируется позитрон, после чего – нейтрон. По энергии позитрона можно восстановить энергию антинейтрино. Нейтрон служит индикатором протекания реакции ОБР.

Цели и задачи

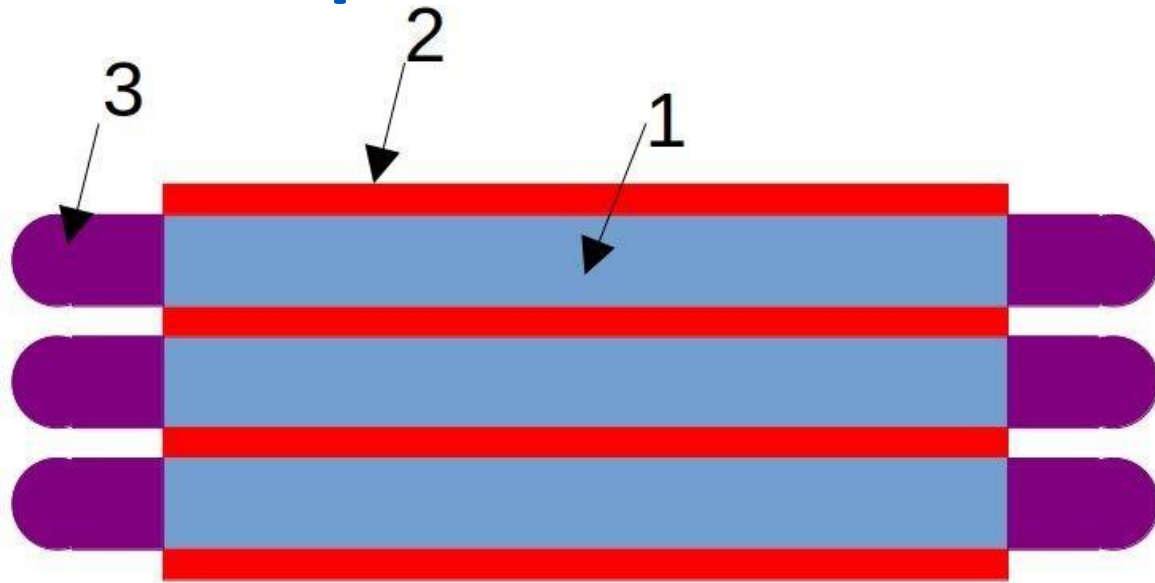
Цель

Моделирование детектора реакторных антинейтрино на основе пластикового сцинтиллятора.

Задачи:

- 1) Разработка библиотеки, описывающей (n, γ) реакции на изотопах кадмия и гадолиния в GEANT4;
- 2) Определение эффективности регистрации нейтронного сигнала в детекторе реакторных антинейтрино с поглотителем на основе кадмия и гадолиния;
- 3) Моделирование сигнальных и фоновых событий и построение их тепловых карт.

Схема сборки детектора реакторных антинейтрино



1 – твердотельный органический
сцинтиллятор 5·5·70 см (полистирол
+ p-терфенил + PPOP);

2 – нейтронный поглотитель;

3 – ФЭУ.

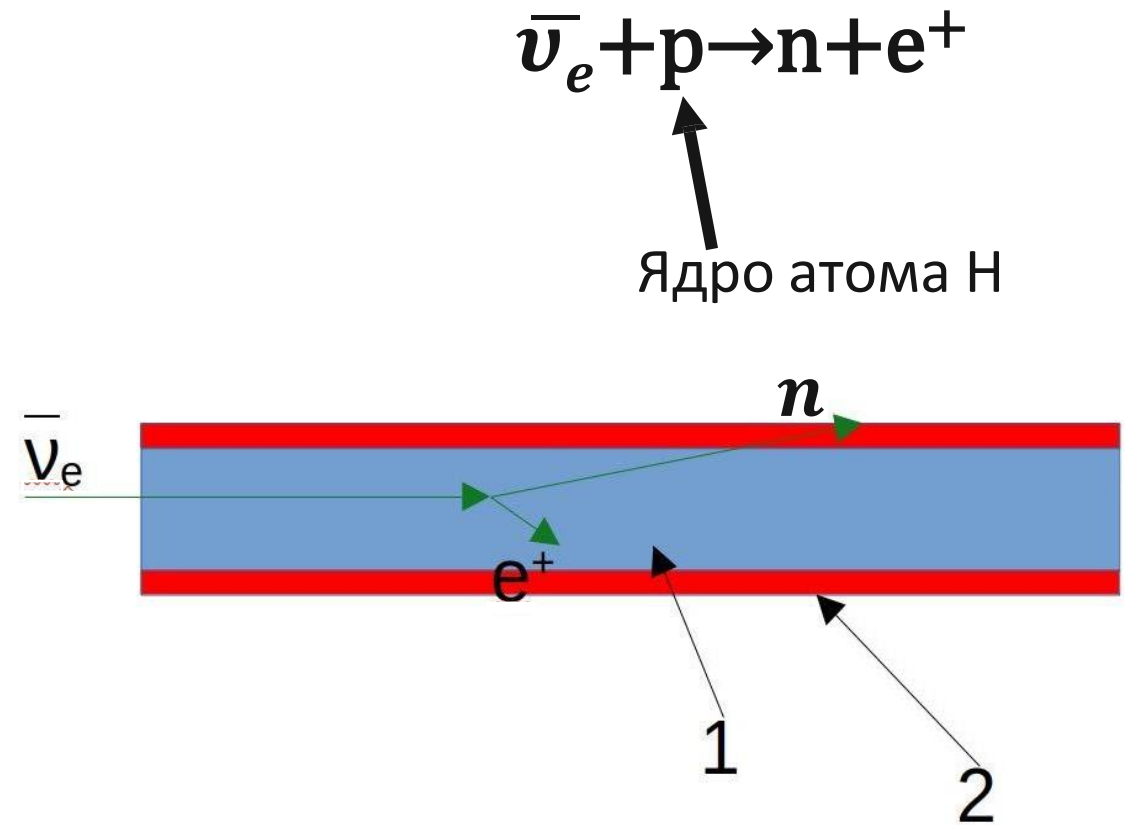
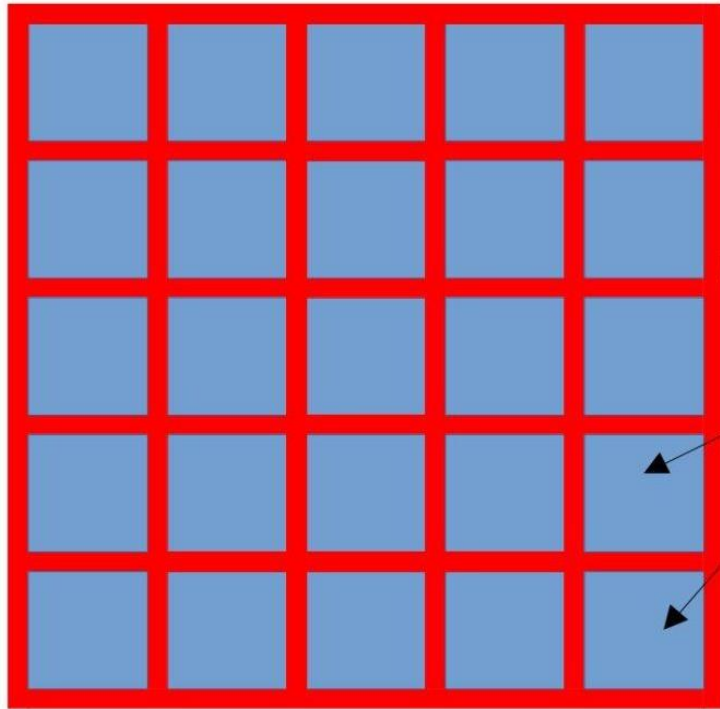


Схема модуля на основе Cd/Gd поглотителей



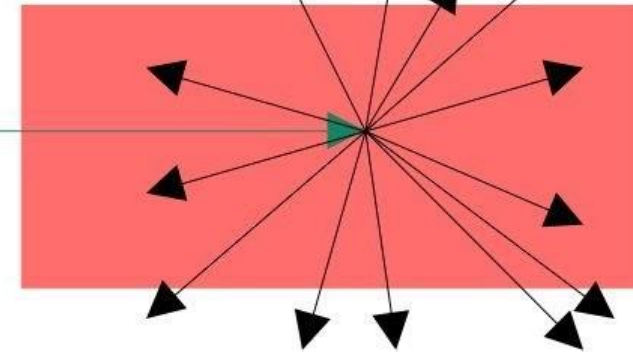
1

1 – Кадмиевый / Гадолиниевый поглотитель в листах;
2 – Сцинтиллятор.

2

Гамма-излучение

n



$$E_{\gamma}(\text{сумм})_{\text{Gd}} \approx 7,94 \text{ МэВ}$$

$$\sigma_{\text{захв. Gd}} = 49000 \text{ барн}$$

$$E_{\gamma}(\text{сумм})_{\text{Cd}} \approx 9,05 \text{ МэВ}$$

$$\sigma_{\text{захв. Cd}} = 3300 \text{ барн}$$

Разработка библиотеки, моделирующей (n,γ) реакции на изотопах Cd, Gd

Формат записи каскадов:

N

$n_1 \quad t_1 \quad E_1 \quad \tau_1 \quad \cos \theta_1 \quad \phi_1 \quad t_2 \quad E_2 \quad \dots$

N – число каскадов;

n_i – число частиц в i -том каскаде;

t_j – тип частицы (гамма-квант, электрон, позитрон);

$E_j, \cos \theta_j, \phi_j$ – энергия и углы вылета частицы относительно направления импульса нейтрона;

τ_j – время между захватом нейтрона и рождением частицы.

| Вещество | Атом, на котором произошел захват | Теоретическая вероятность захвата на атоме, % | Вероятность захвата, рассчитанная методом Монте-Карло, % |
|---|-----------------------------------|---|--|
| $(\text{CH}_2)_n + \text{Gd}(0.1\%)$ | Gd | 27,93 | $27,8 \pm 0,3$ |
| $(\text{CH}_2)_n + \text{Gd}(0.1\%)$ | H | 71,97 | $71,8 \pm 0,2$ |
| $(\text{CH}_2)_n + \text{Gd}(0.1\%)$ | C | 0,1 | $0,11 \pm 0,02$ |
| CdPb | Cd | 99,99 | $99,98 \pm 0,01$ |
| CdPb | Pb | 0,01 | $0,02 \pm 0,02$ |
| $\text{H}_2\text{O} + \text{Gd}(0,1\%)$ | H | 0,45 | $0,42 \pm 0,06$ |
| $\text{H}_2\text{O} + \text{Gd}(0.1\%)$ | Gd | 99,55 | $99,57 \pm 0,02$ |

Таблица 2.1 — Вероятности захвата нейтрона на каждом элементе в различных веществах

Теоретическая вероятность захвата на элементе определялась по формуле:

$$P(X) = \frac{\Sigma_a(X)}{\Sigma_a^{\text{tot}}},$$

где $\Sigma_a(X) = w_X \cdot \sigma_a(X)$ – макросечение захвата нейтрона на элементе X , w_X – массовая доля элемента в веществе, $\sigma_a(X)$ – сечение захвата теплового нейтрона на элементе; Σ_a^{tot} – сумма макросечений по всем элементам в веществе.

Калибровка библиотеки, моделирующей (n,γ) реакции на изотопах Cd, Gd

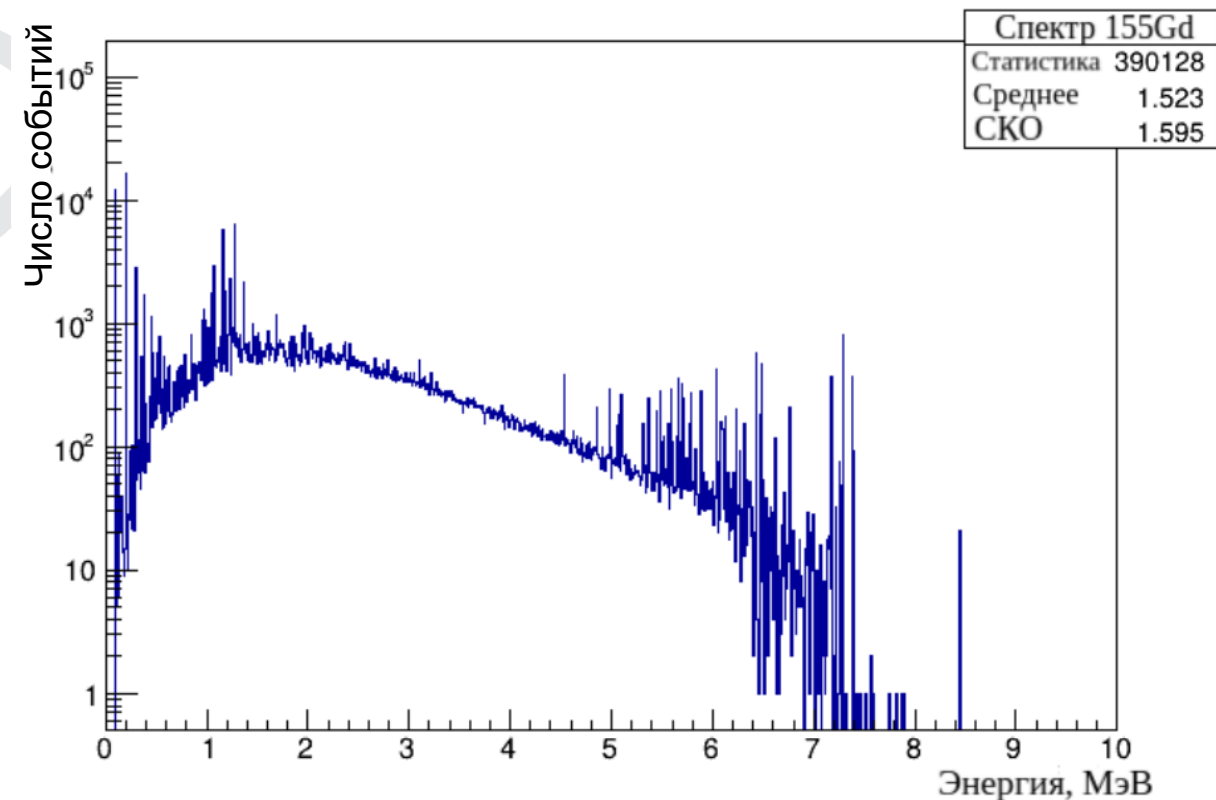


Рис.1. Смоделированный спектр гамма-излучения
(n, γ) реакции на ^{155}Gd

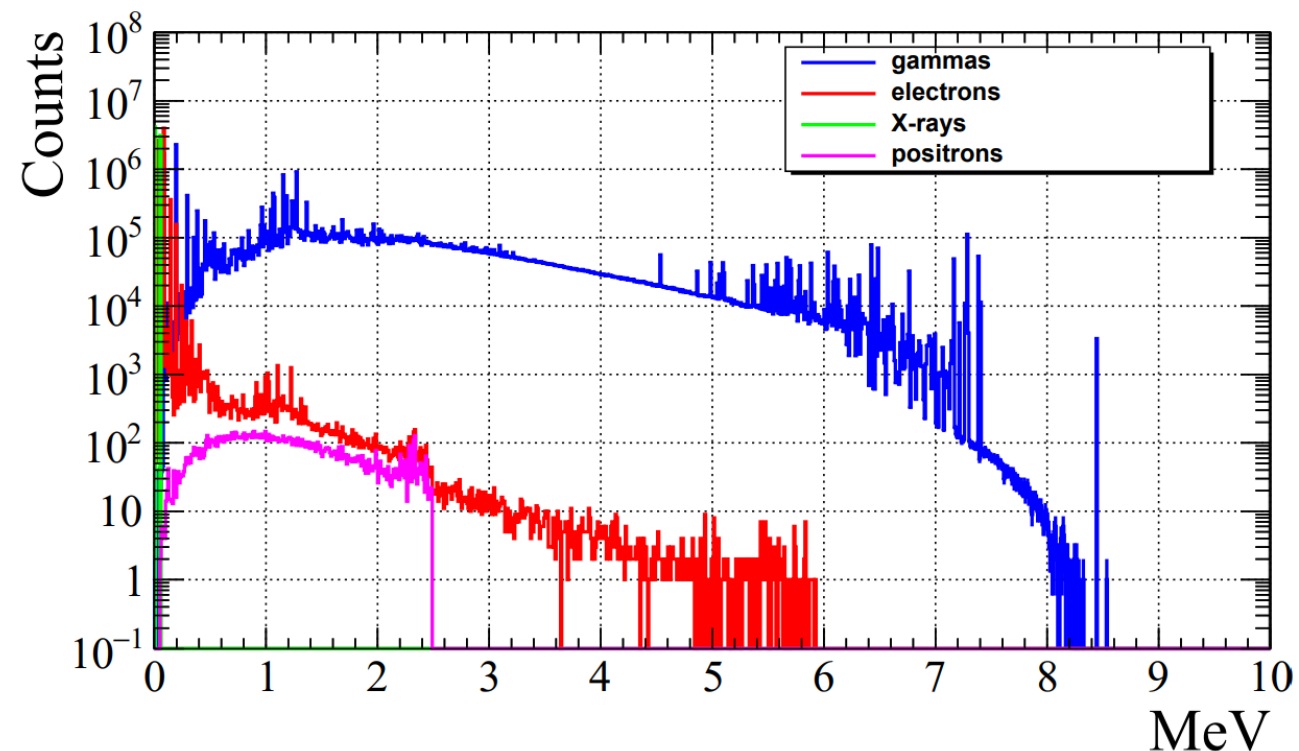
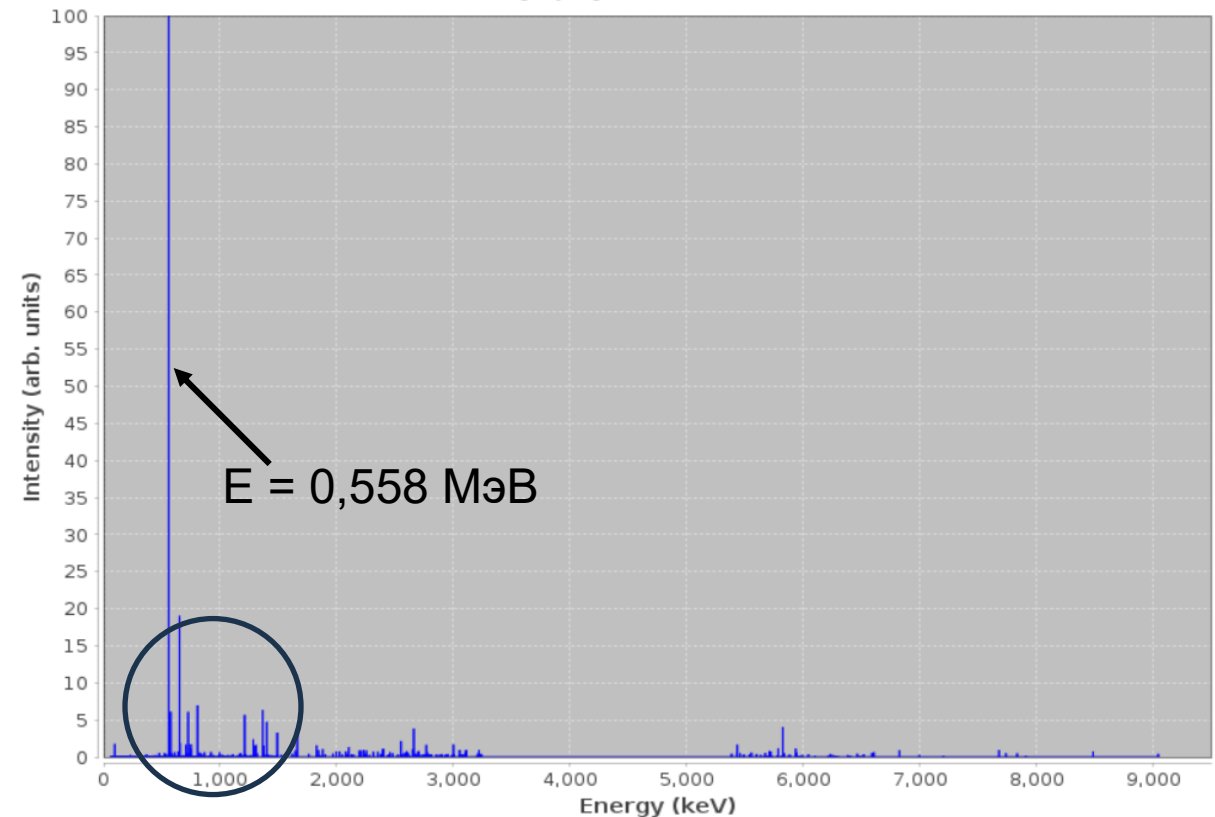
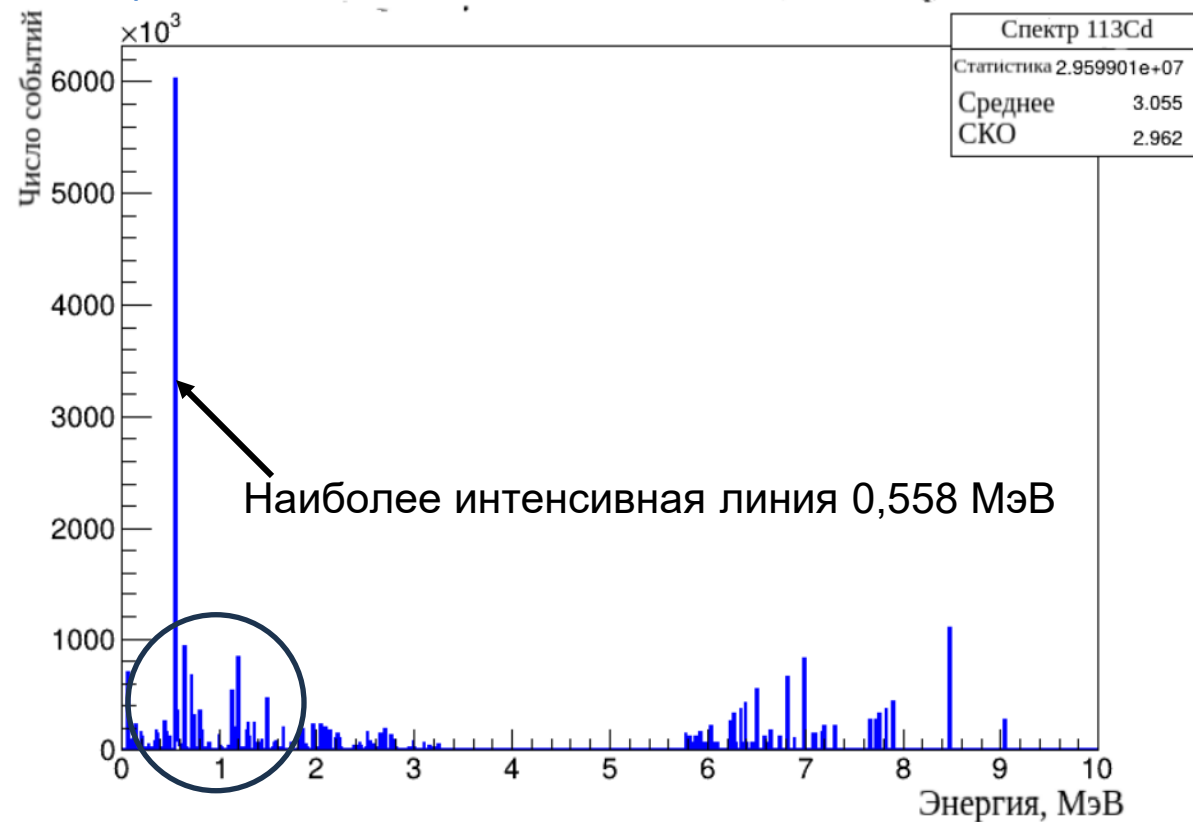


Рис.2. Экспериментальный спектр гамма-излучения
(n, γ) реакции на ^{155}Gd (синий)

Н. Almazan et al. Improved FIFRELIN de-excitation model for neutrino applications. *Eur. Phys. J. A*, 59(4):75, 2023.

Калибровка библиотеки, моделирующей (n,γ) реакции на изотопах Cd, Gd



N. Furutachi, F. Minato, and O. Iwamoto. Statistical properties of thermal neutron capture cross sections calculated with randomly generated resonance parameters. *Phys. Rev. C*, 100(1):014610, 2019.

Определение эффективности регистрации нейтронного сигнала в детекторе с использованием поглотителей на основе Cd и Gd

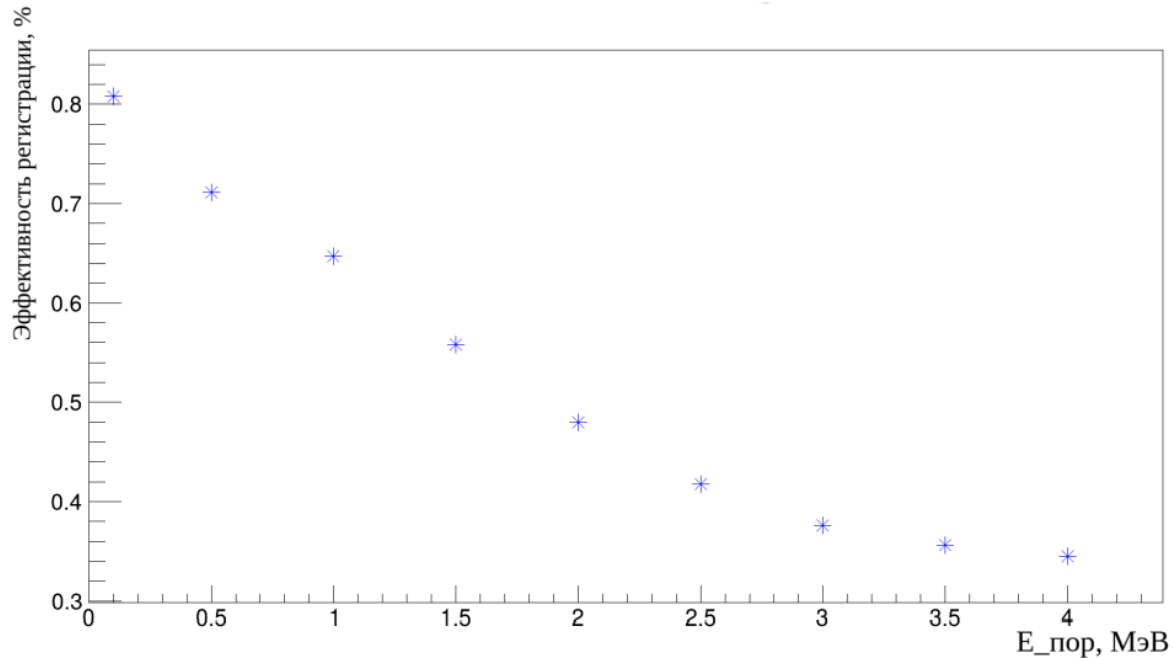


Рис.5. График зависимости эффективности регистрации детектора с кадмиевым поглотителем от пороговой энергии

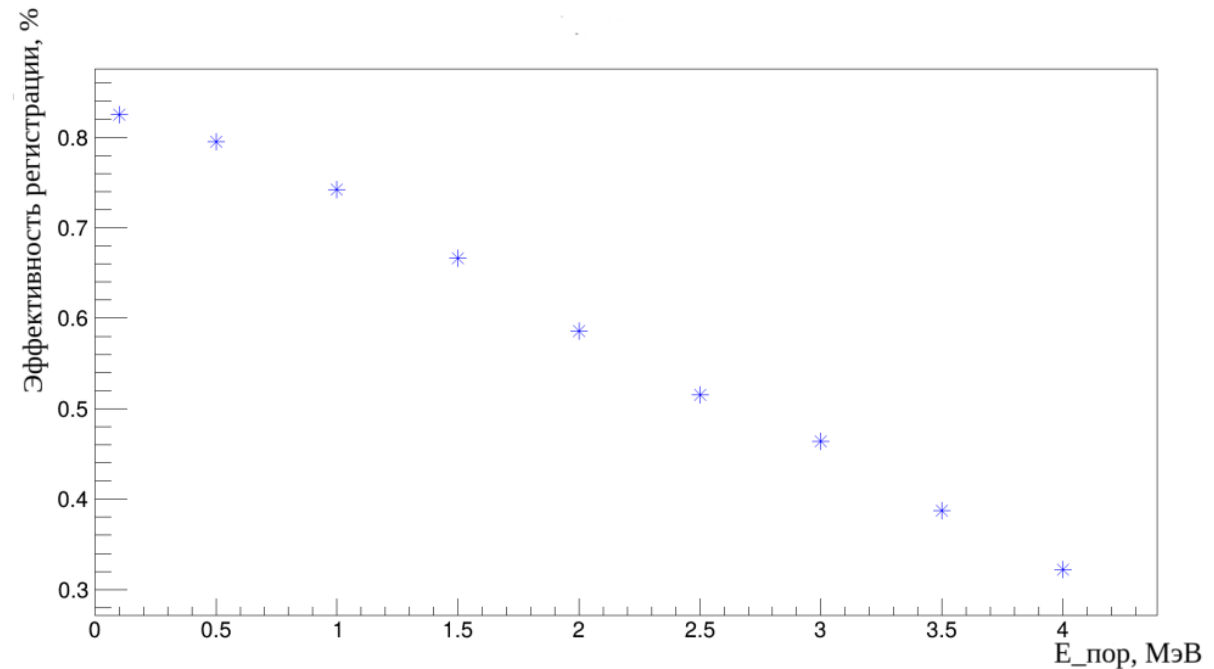


Рис.6. График зависимости эффективности регистрации детектора с гадолиниевым поглотителем от пороговой энергии

При пороговой энергии 3 МэВ фон, связанный с естественной радиоактивностью будет практически нивелирован, эффективность регистрации при этом $\eta_{\text{Cd}} = 38\%$ для кадмиевого поглотителя и $\eta_{\text{Gd}} = 46\%$ для гадолиниевого.

Моделирование сигнальных и фоновых событий

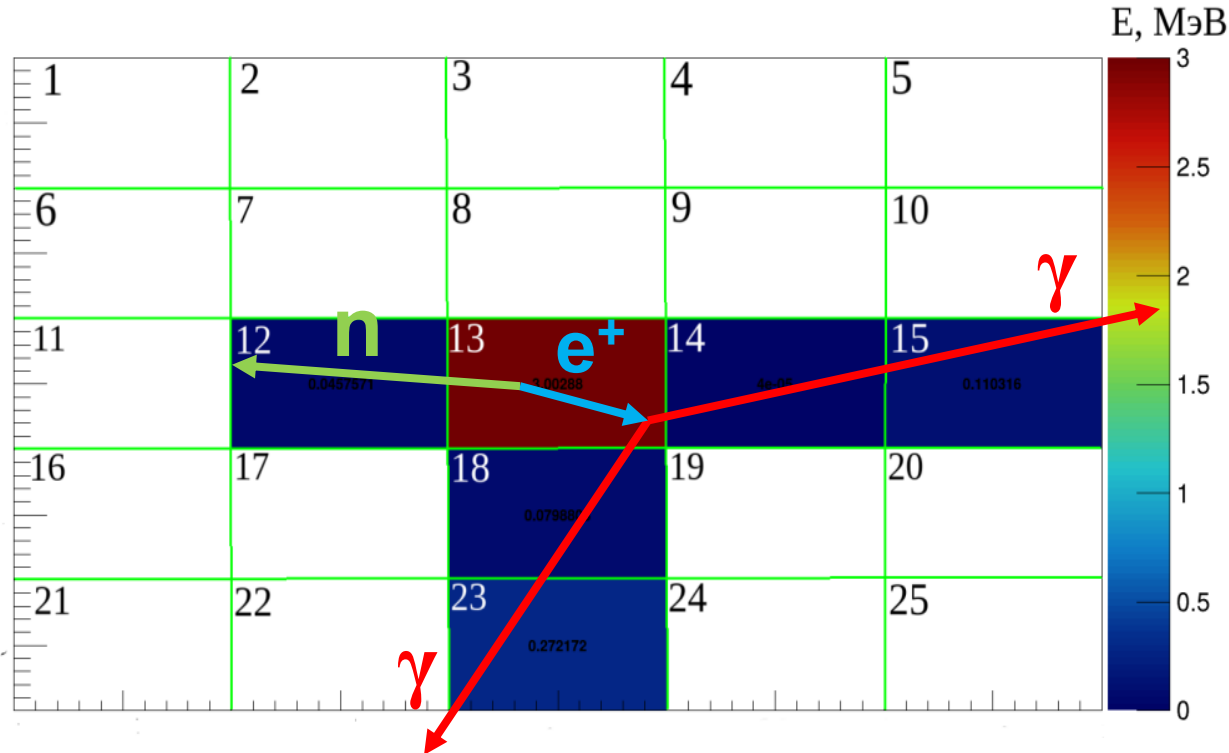


Рис.7. Тепловая карта события реакции ОБР

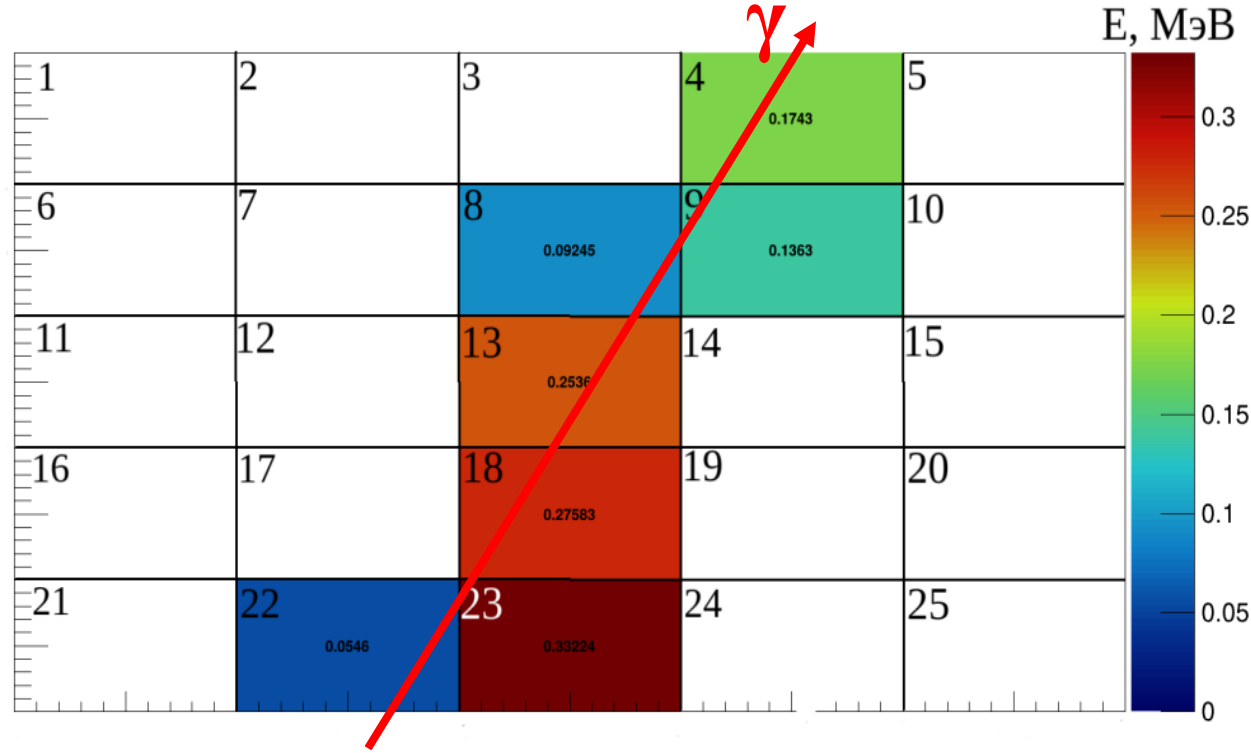


Рис.8. Тепловая карта фоновое событие (гамма-квант с энергией 1.5 МэВ)

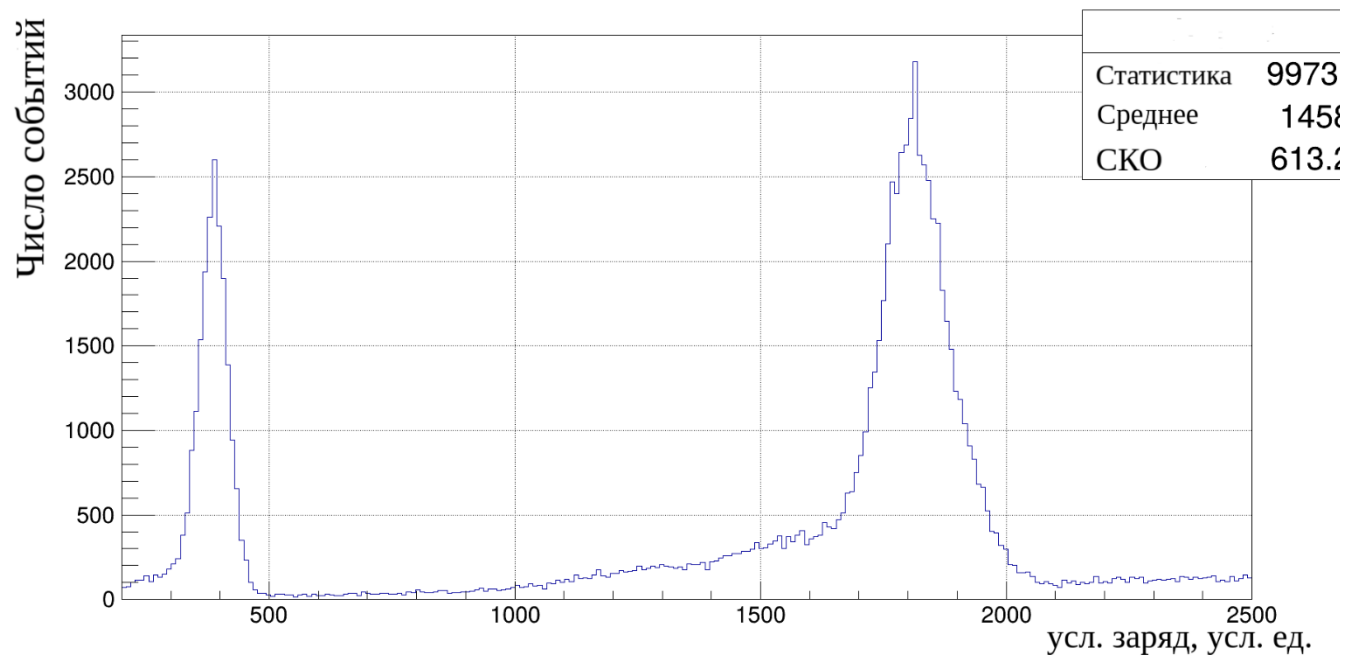
При использовании дополнительных средств отбора, таких как отбор по суммарному энергосодержанию и по схеме совпадений, можно разделить сигнальное и фоновое событие.

Заключение

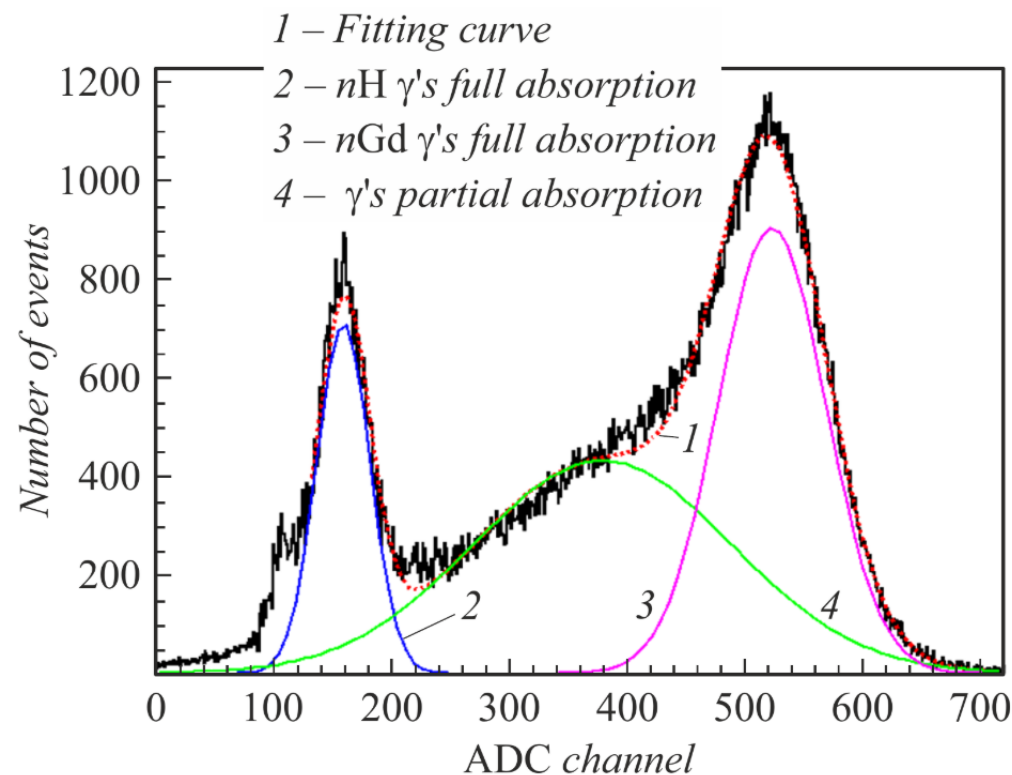
- Была разработана библиотека для моделирования (n , γ) реакций на изотопах кадмия и гадолиния. Правильность работы библиотеки подтверждена на основании сравнения с экспериментальными данными;
- Рассчитаны эффективности регистрации нейтронного сигнала для поглотителей на основе кадмия и гадолиния. Полученные значения составили $\eta_{Cd} = 38\%$ и $\eta_{Gd} = 46\%$ для пороговой энергии регистрации $E_{пор} = 3 \text{ МэВ}$;
- Проведено моделирование сигнальных и фоновых событий в модульном детекторе реакторных антинейтрино, построены их тепловые карты. Наглядно показан метод отделения сигнальных и фоновых событий



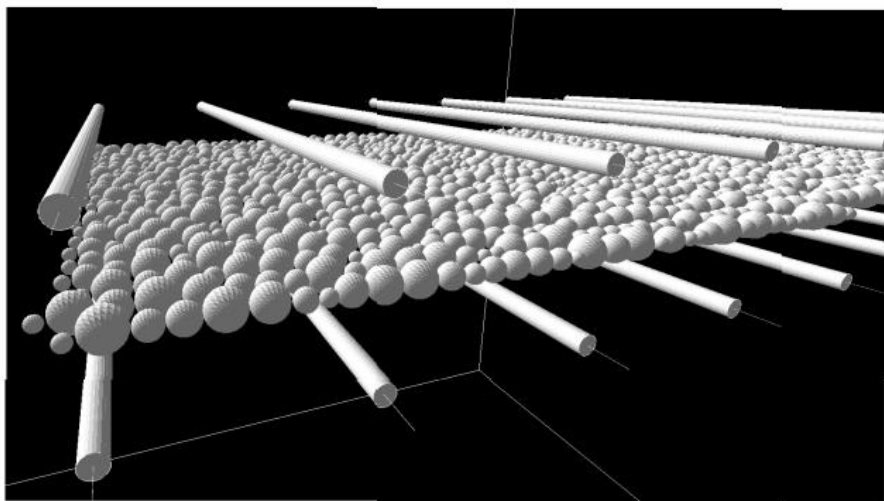
Спасибо за внимание!



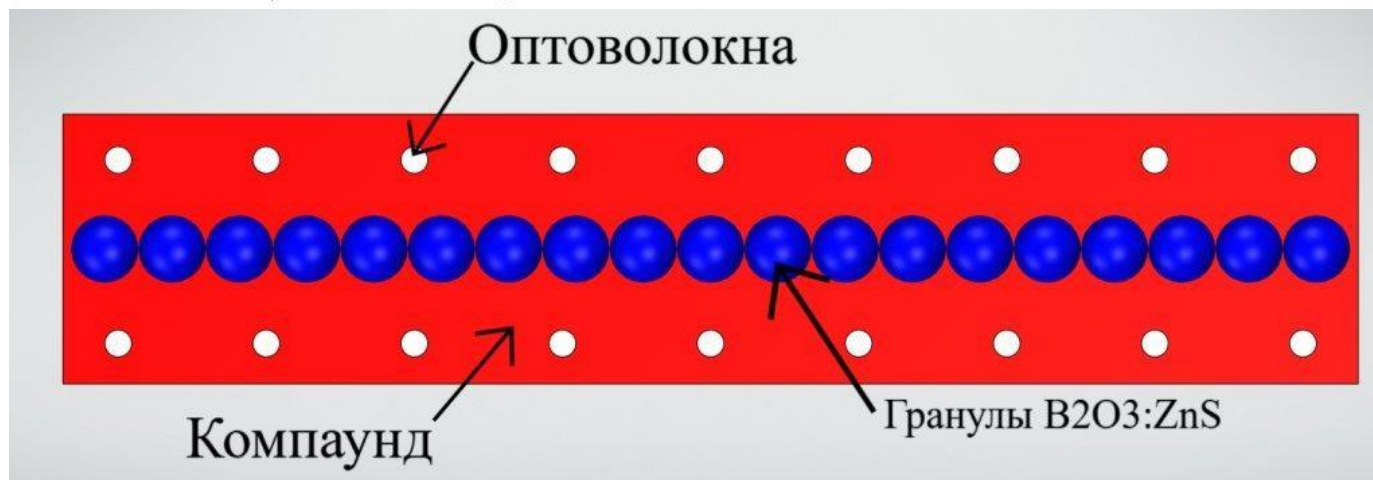
Смоделированный зарядовый спектр захватов нейтронов от источника ^{252}Cf в центре детектора iDREAM



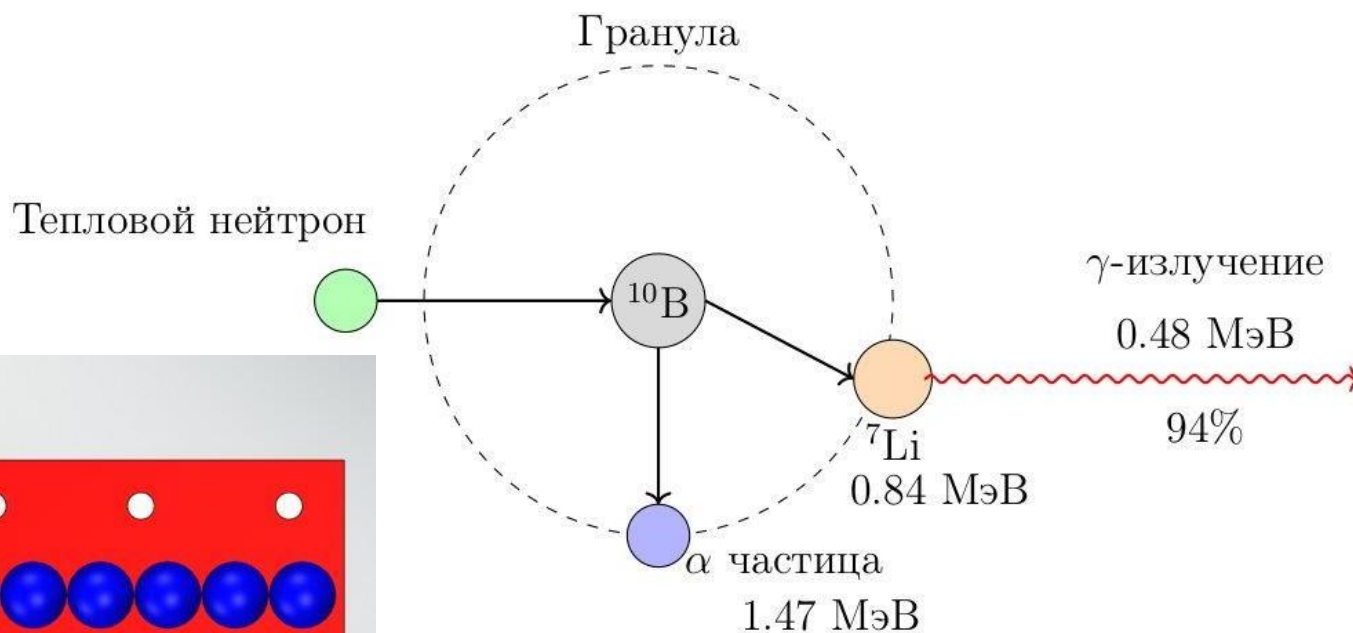
Зарядовый спектр захватов нейтронов от источника ^{252}Cf в центре детектора iDREAM



а) Модель установки



б) Схема установки



$$\sigma_{\text{захв}} = 764 \text{ барн (тепл. н)}$$

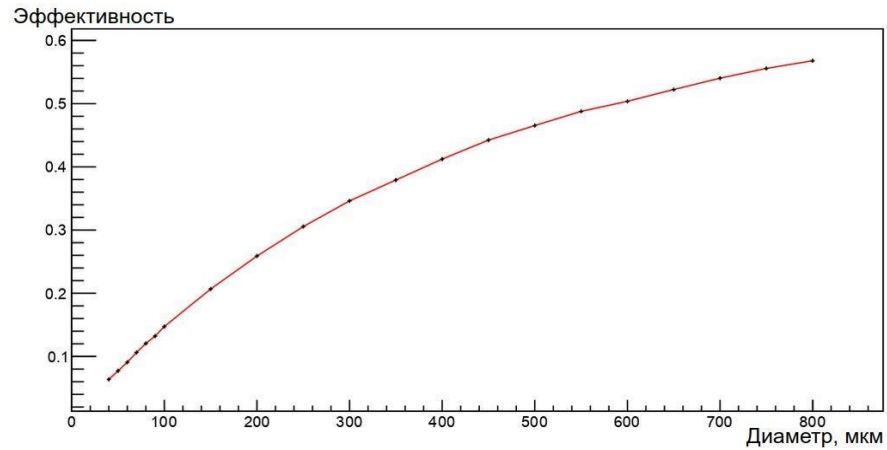


Рис.5. Эффективность захвата нейтронов в поглотителе

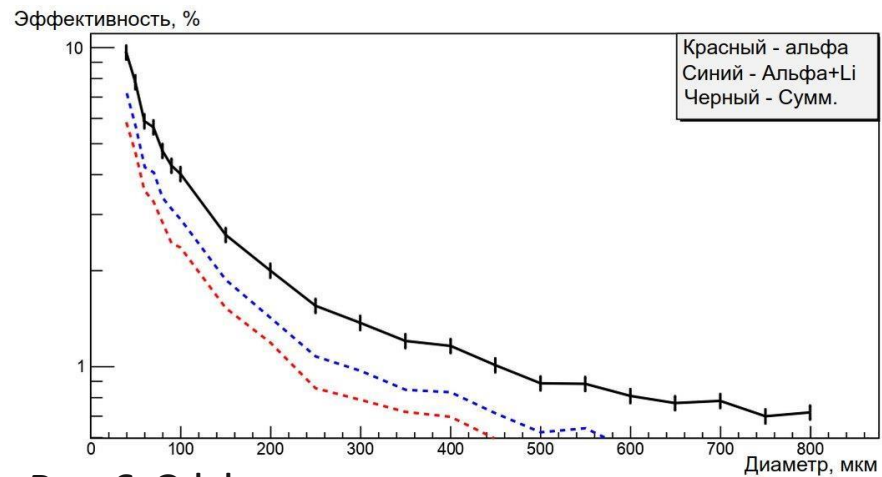


Рис.6. Эффективность вылета частиц из гранулы

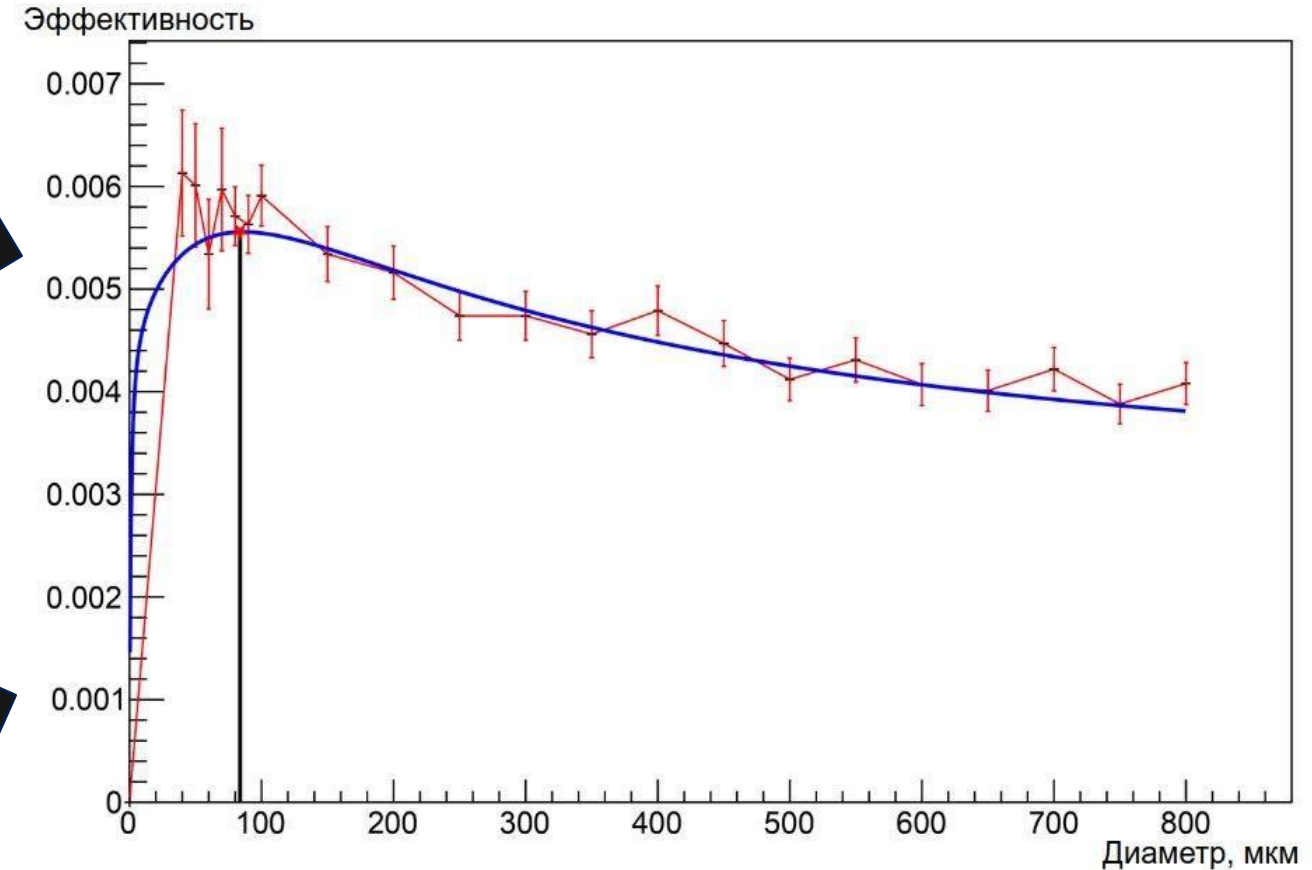
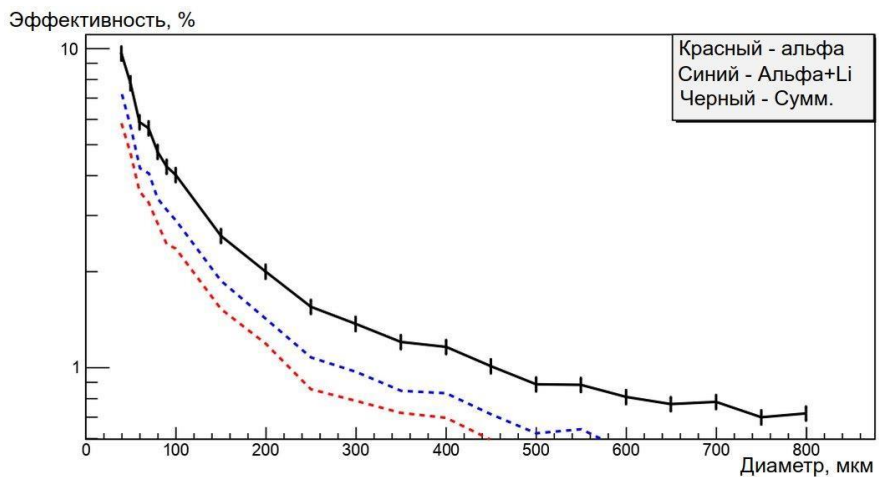
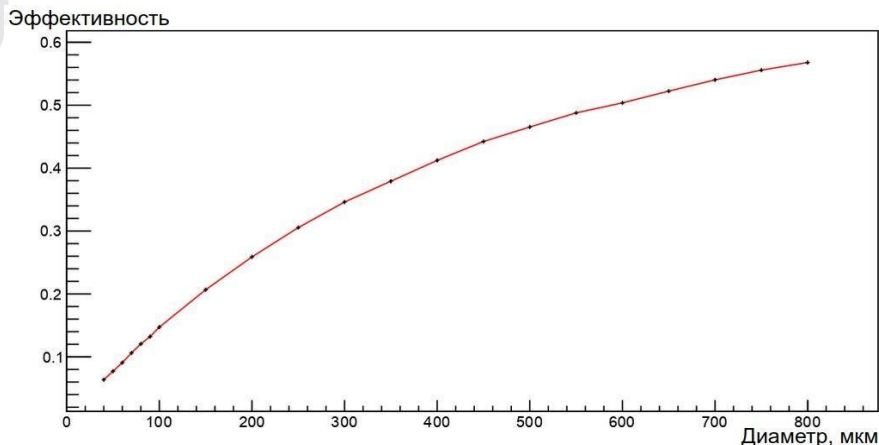


Рис.7. Зависимость эффективности регистрации поглотителя от диаметра гранулы

Получен оптимальный диаметр $D=80$ мкм

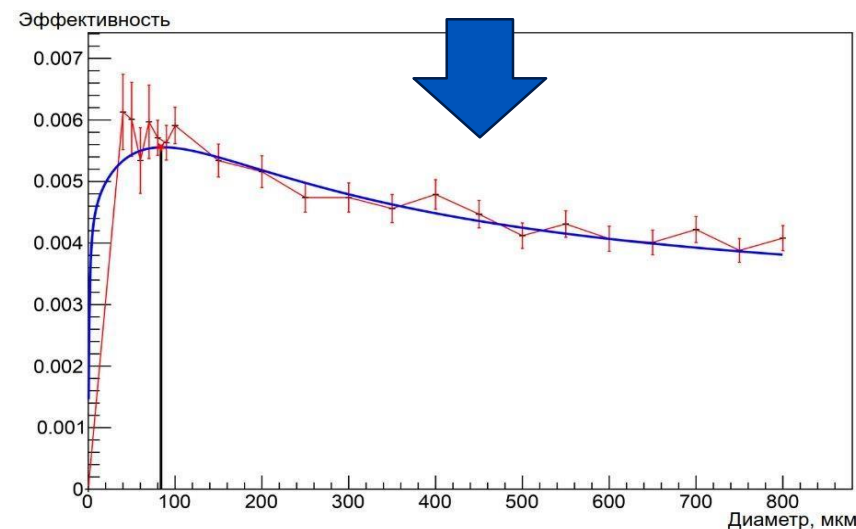
Расчет для поглотителя на основе $B_2O_3:ZnS(Ag)$



$$\leftarrow f_1 = -a \cdot \log b + a \cdot \log(D^2 + c \cdot D + b)$$

$a=0,129638$
 $b=8702,29$
 $c=81,4245$
 $d=0,00253621$
 $g=4,25434$
 $h=1$
 $k=-1,03746$

$$f = f_1 \cdot f_2$$



$$\leftarrow f_2 = d + g \cdot (D + h)^k$$

| Количество модулей в сборке | Cd, 0,5 мм | Gd, 0,5 мм | LCS, 0,6 мм |
|--------------------------------|------------|------------|-------------|
| 1 | 0,29 | 0,32 | 0,13 |
| 3x3 | 0,88 | 0,88 | 0,69 |
| 5x5 | 0,91 | 0,92 | 0,73 |
| Насыщение | 0,92 | 0,92 | 0,75 |

Насыщение – максимальная доля захватываемых поглотителем нейтронов в сборке из нескольких модулей