



# Моделирование детектора реакторных antineutrino на основе пластикового сцинтиллятора

Студент: Д.С. Прокопов

Научный руководитель: Д.В. Попов

Научный консультант: Д.А. Чмыхало

Москва, 2025

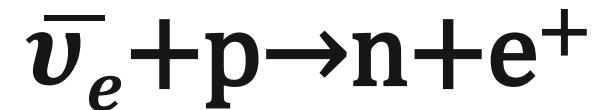


# Введение

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

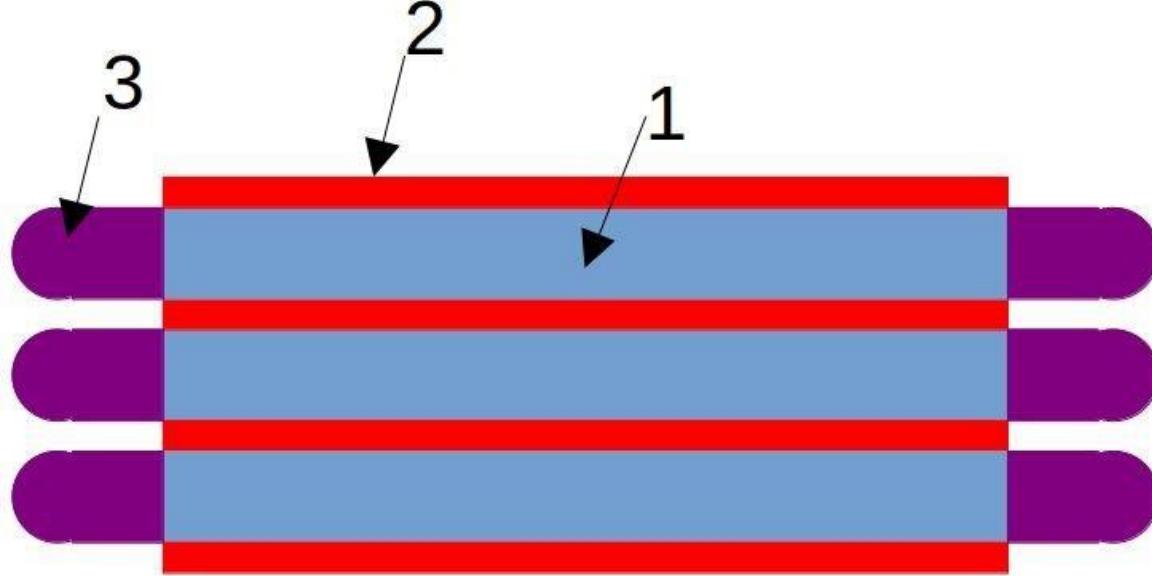
## Цель

Моделирование детектора реакторных антинейтрино на основе пластикового сцинтиллятора.

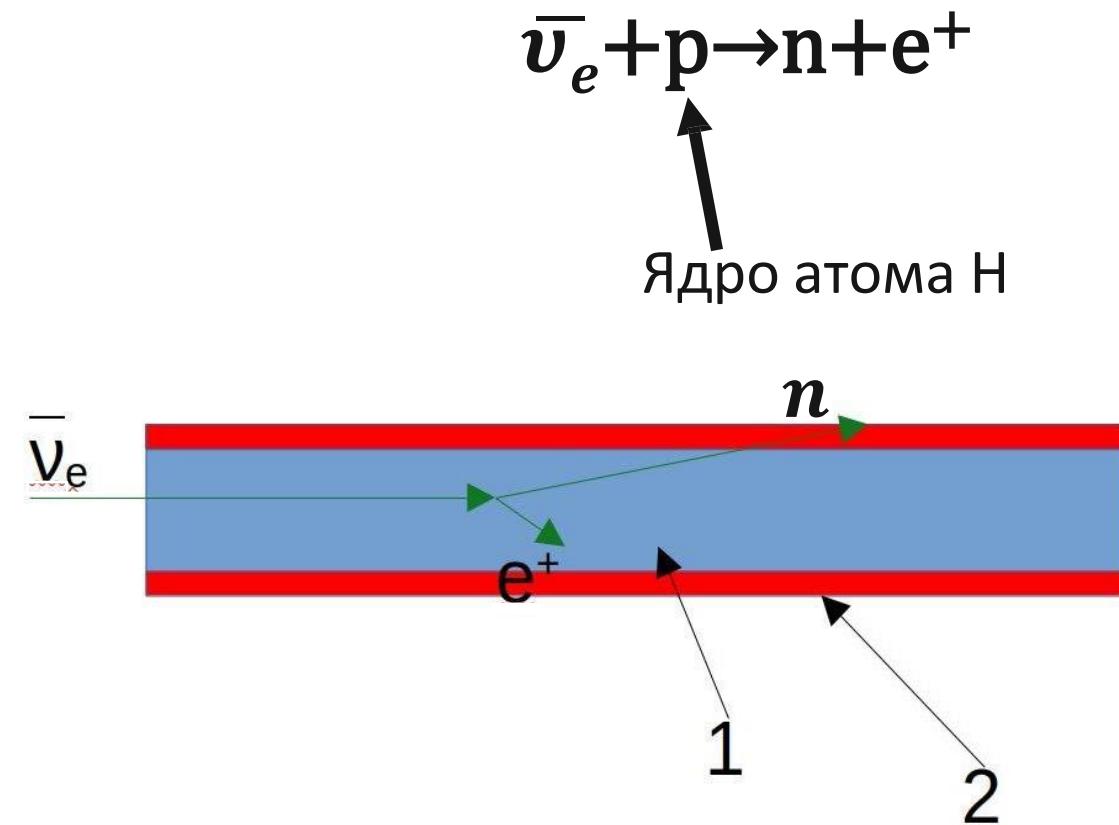
## Задачи:

- 1) Разработка библиотеки, описывающей  $(n,\gamma)$  реакции на изотопах кадмия и гадолинии 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.

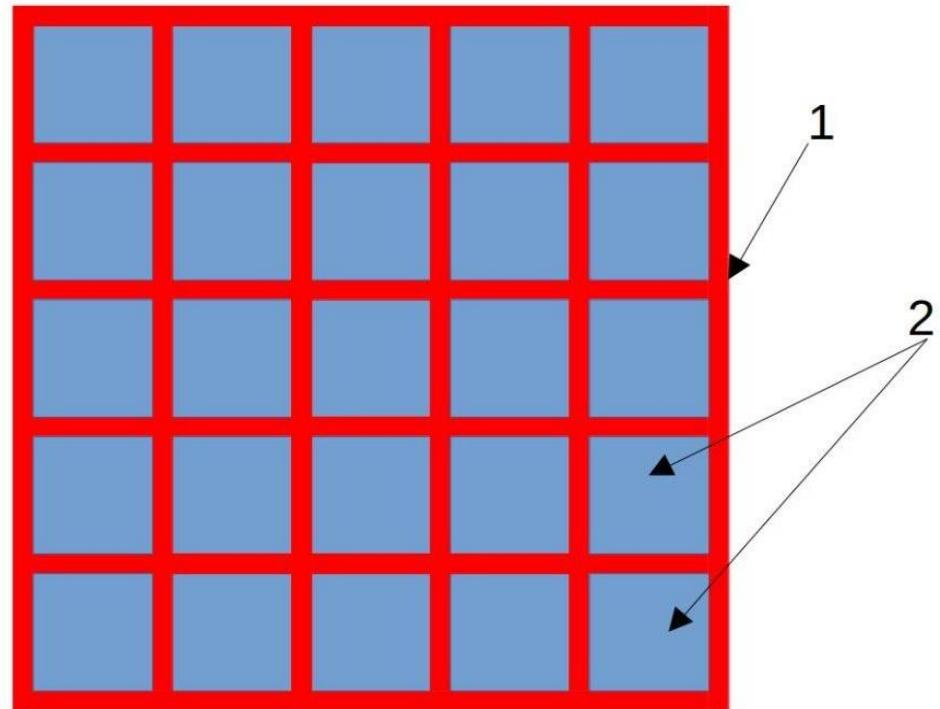
# Схема сборки детектора реакторных антинейтрино



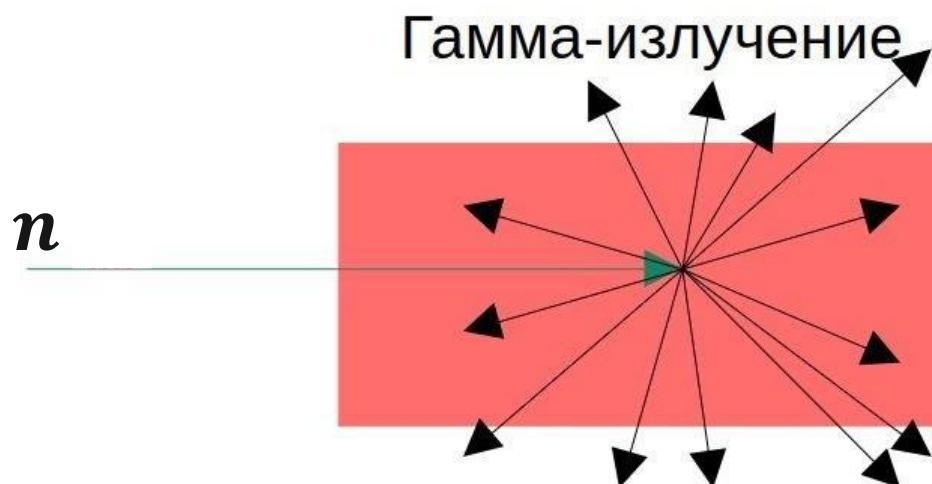
1 – твердотельный органический сцинтиллятор 5·5·70 см (полистирол + р-терфенил + РОРОР);  
2 – нейтронный поглотитель;  
3 – ФЭУ.



# Схема модуля на основе Cd/Gd поглотителей



1 – Кадмиеый / Гадолиниевый  
поглотитель в листах;  
2 - Сцинтиллятор.



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

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

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

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

# Разработка библиотеки, моделирующей $(n,\gamma)$ 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;

$\tau_j$  – 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:

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

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;  $\Sigma_a^{tot}$  – сумма макросечений по всем элементам в веществе.

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

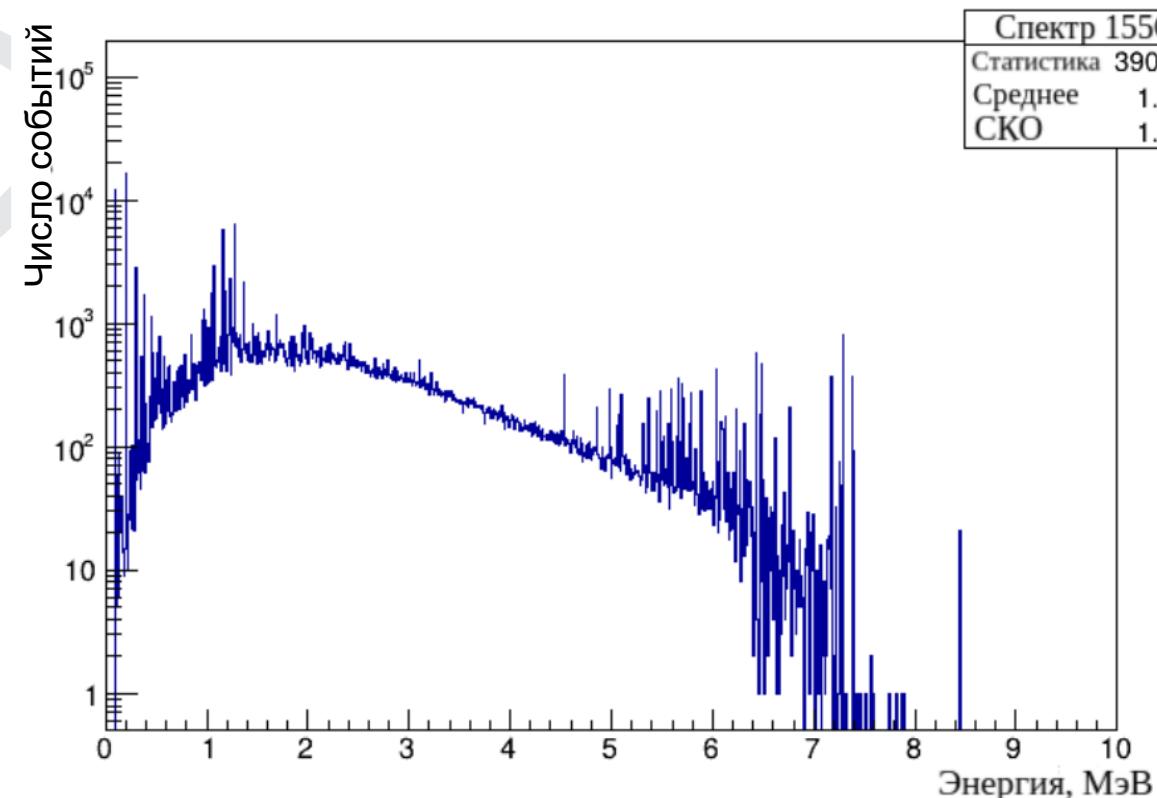


Рис.1. Смоделированный спектр гамма-излучения (n, γ) реакции на  $^{155}\text{Gd}$

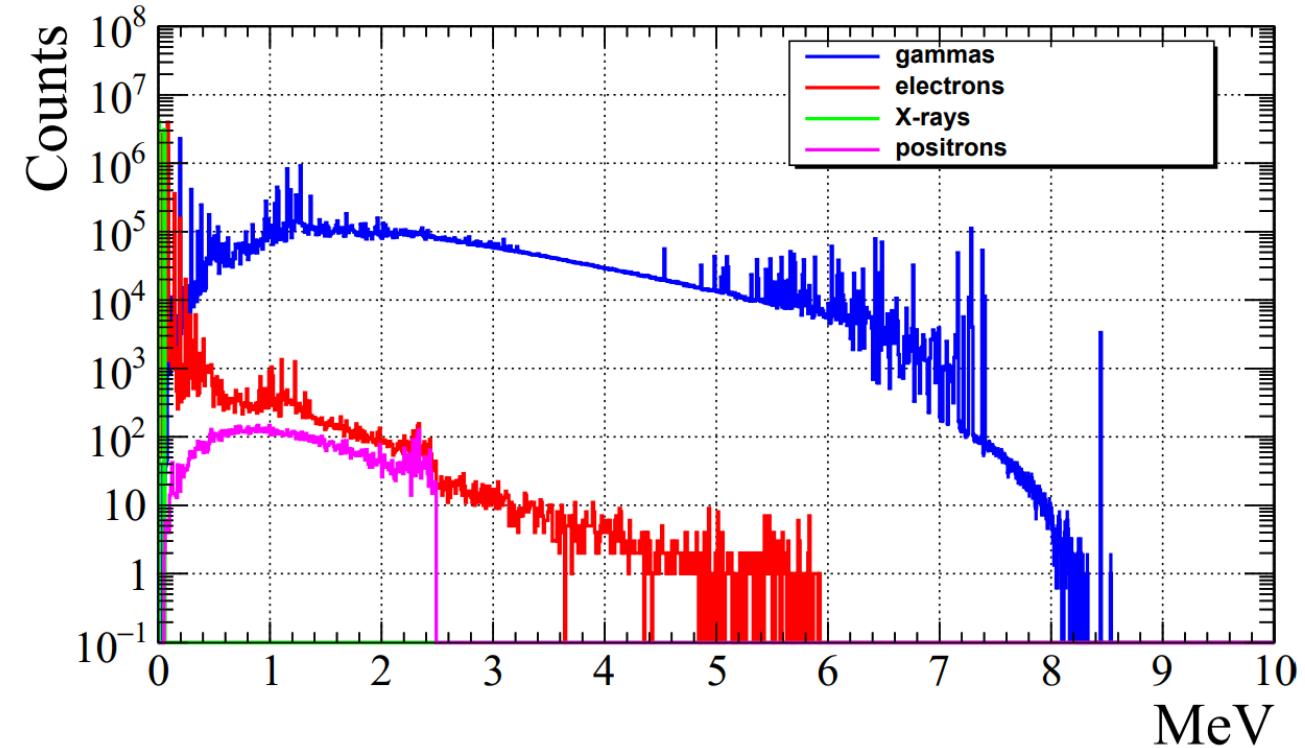


Рис.2. Экспериментальный спектр гамма-излучения (n, γ) реакции на  $^{155}\text{Gd}$  (синий)

H. 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

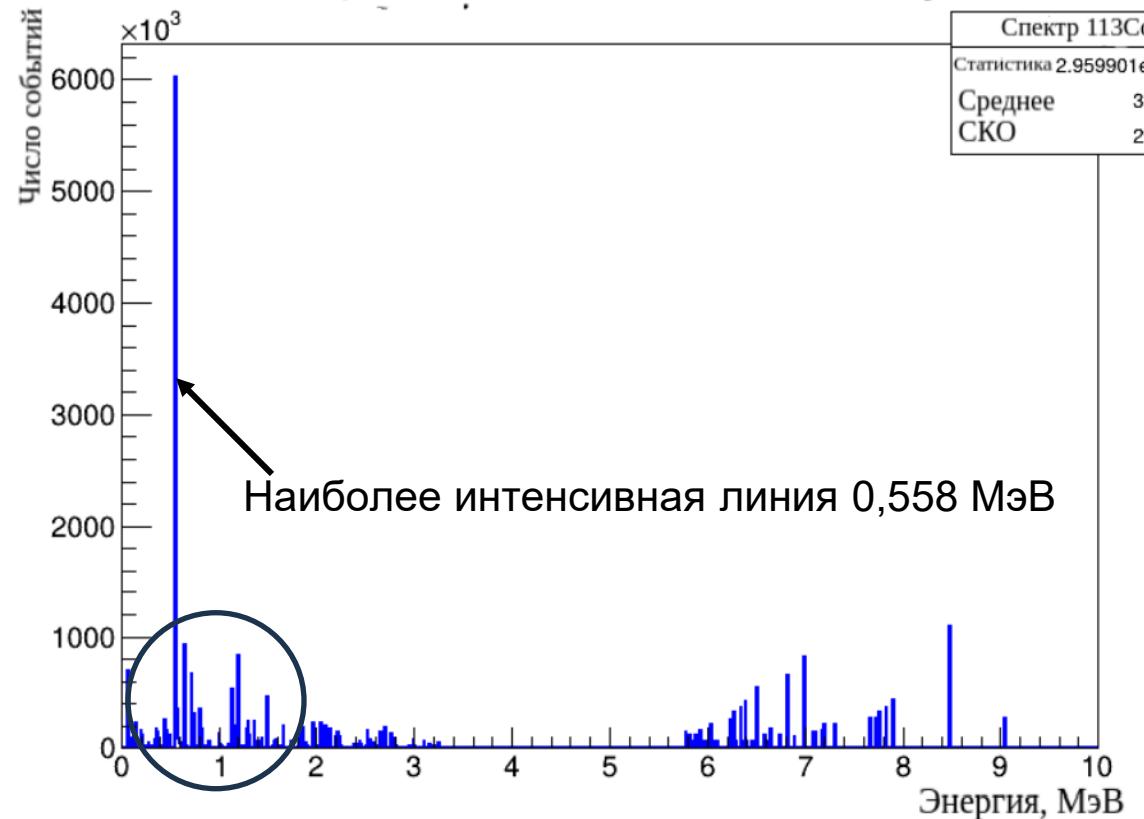


Рис.3. Смоделированный спектр гамма-излучения  
(n, γ) реакции на  $^{113}\text{Cd}$

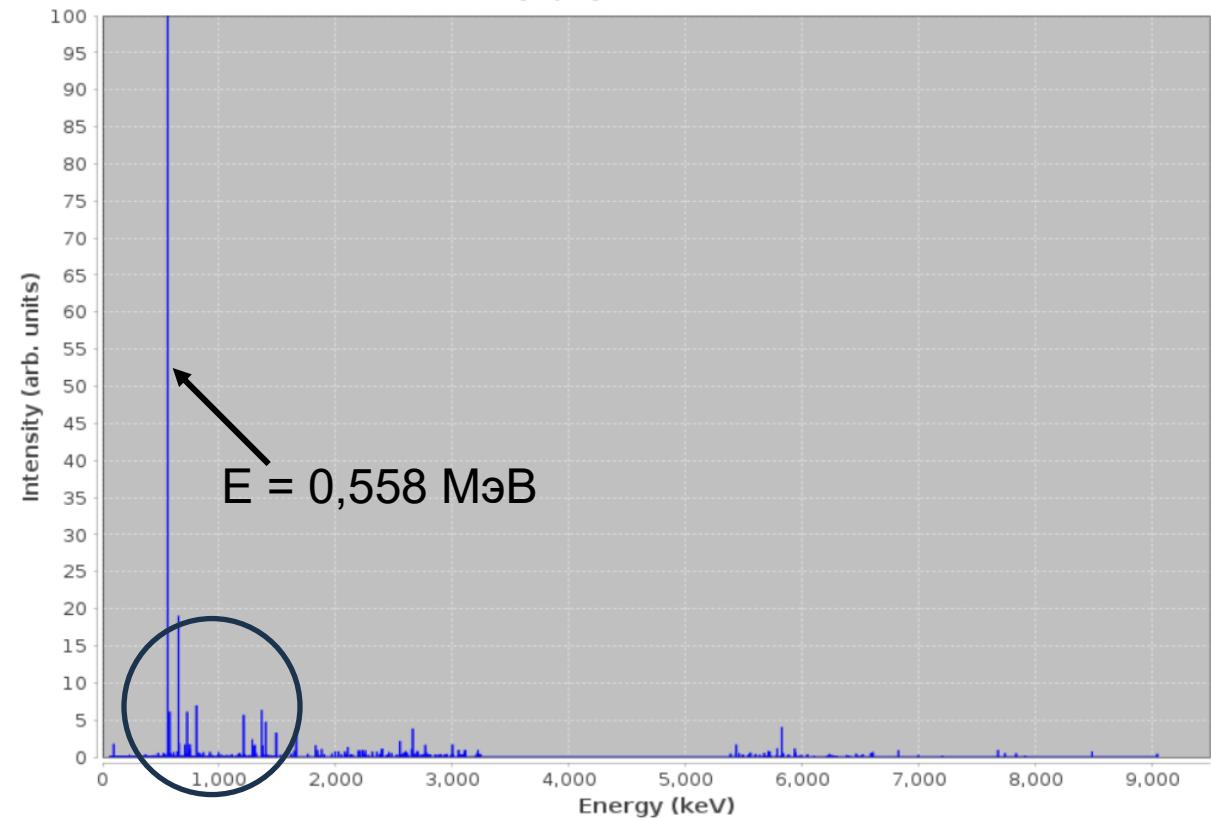


Рис.4. Экспериментальный спектр гамма-излучения  
(n, γ) реакции на  $^{113}\text{Cd}$

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

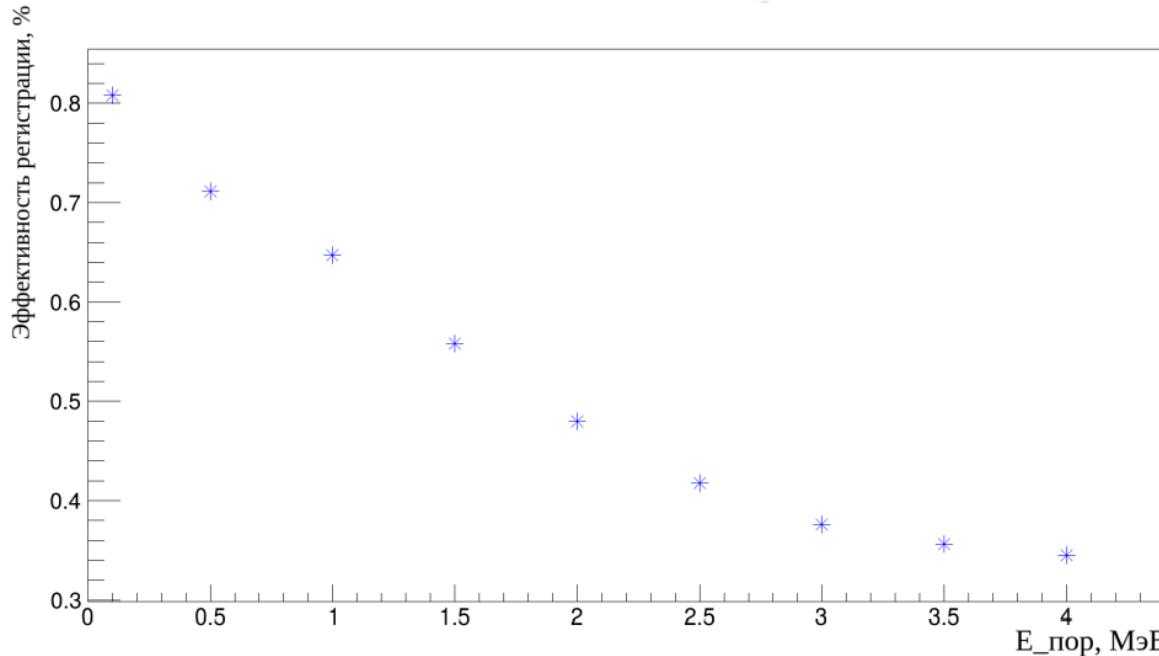


Рис.5. График зависимости эффективности регистрации детектора с кадмиевым поглотителем от пороговой энергии

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

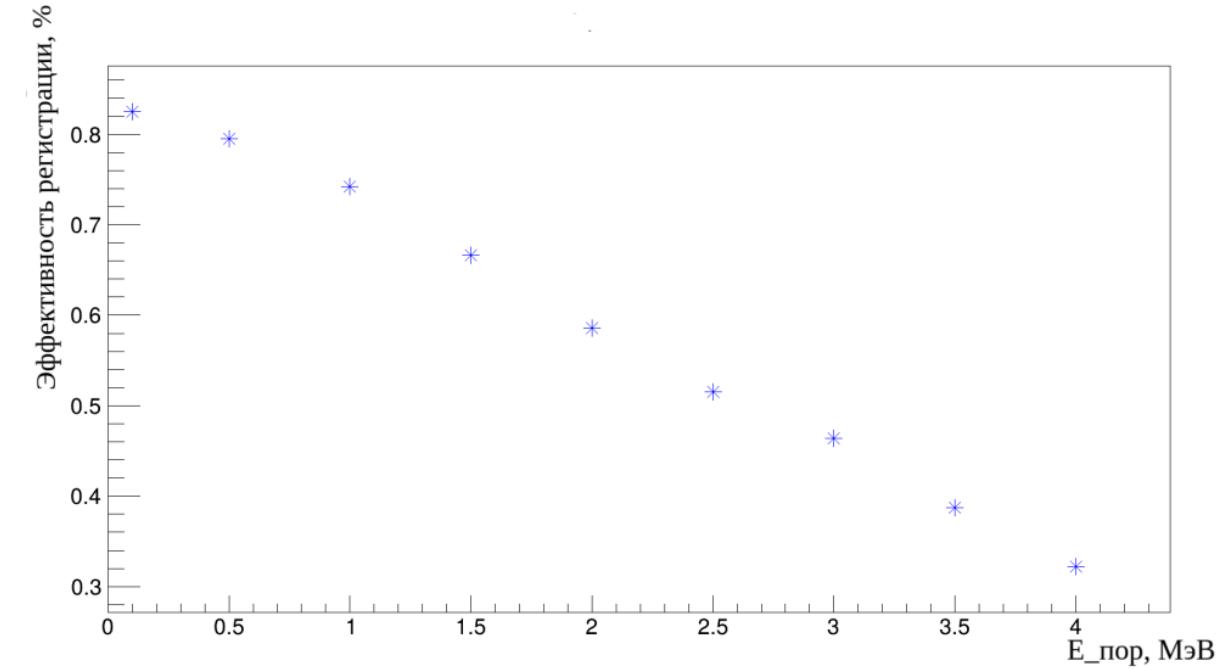


Рис.6. График зависимости эффективности регистрации детектора с гадолиниевым поглотителем от пороговой энергии

# Моделирование сигнальных и фоновых событий

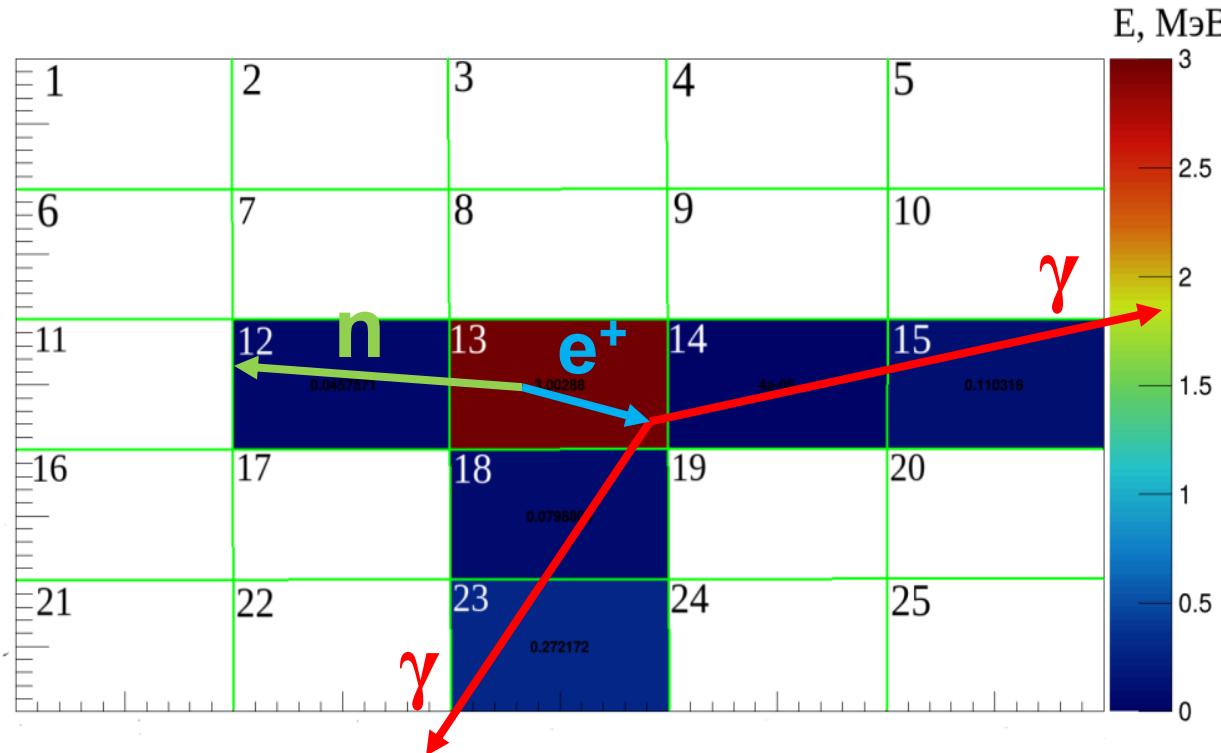


Рис.7. Тепловая карта события реакции ОБР

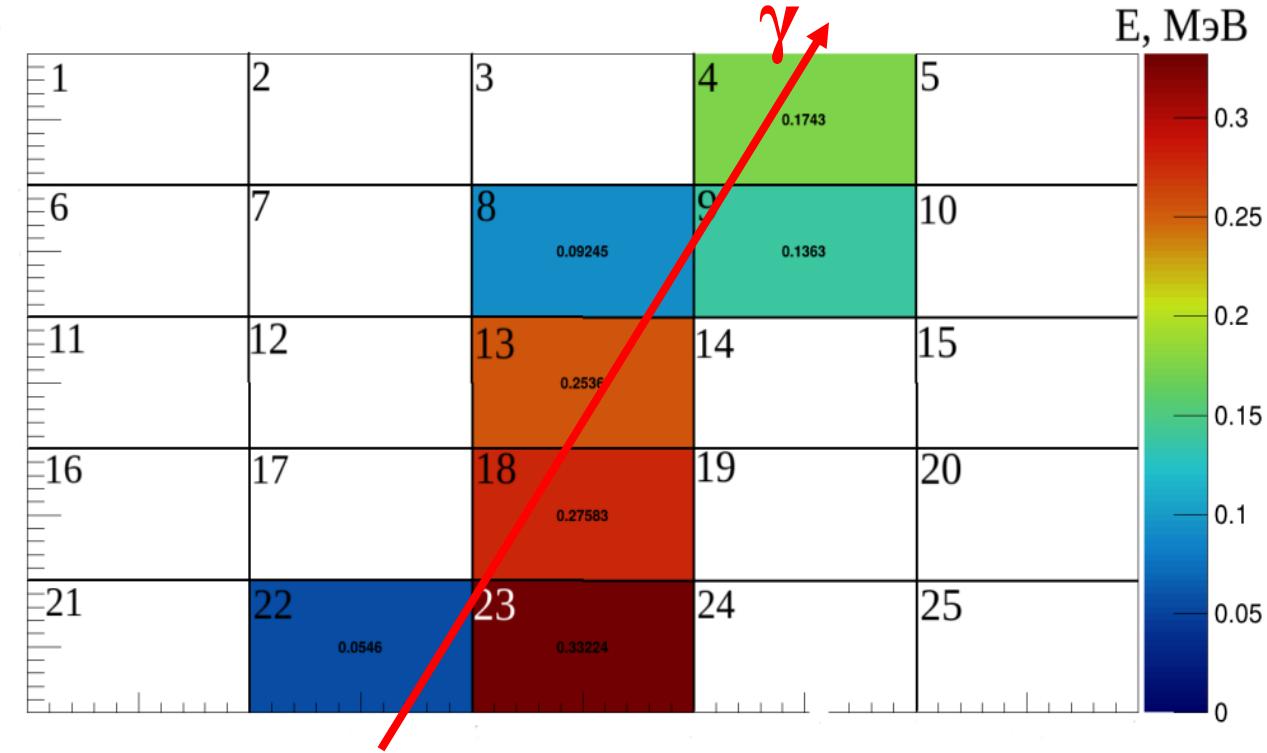


Рис.8. Тепловая карта фонового события (гамма-квант с энергией 1.5 МэВ)

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

# Заключение

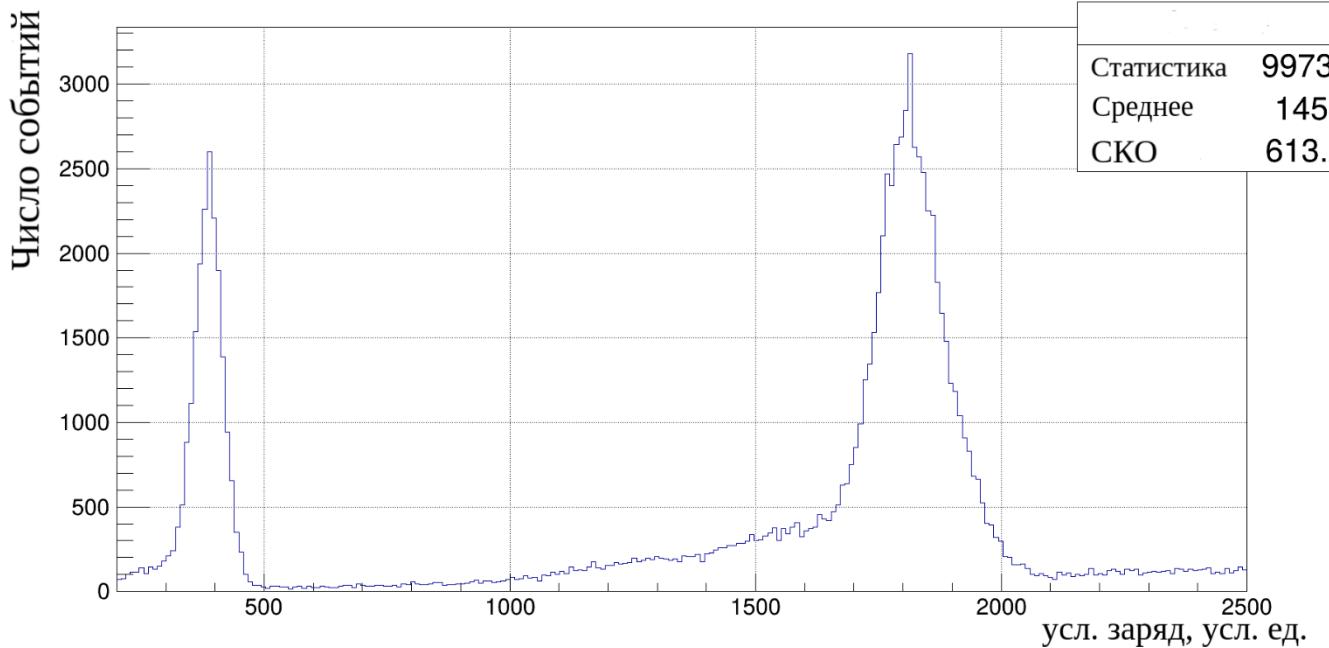
- Была разработана библиотека для моделирования ( $n, \gamma$ ) реакций на изотопах кадмия и гадолиния. Правильность работы библиотеки подтверждена на основании сравнения с экспериментальными данными;
- Рассчитаны эффективности регистрации нейтронного сигнала для поглотителей на основе кадмия и гадолиния.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



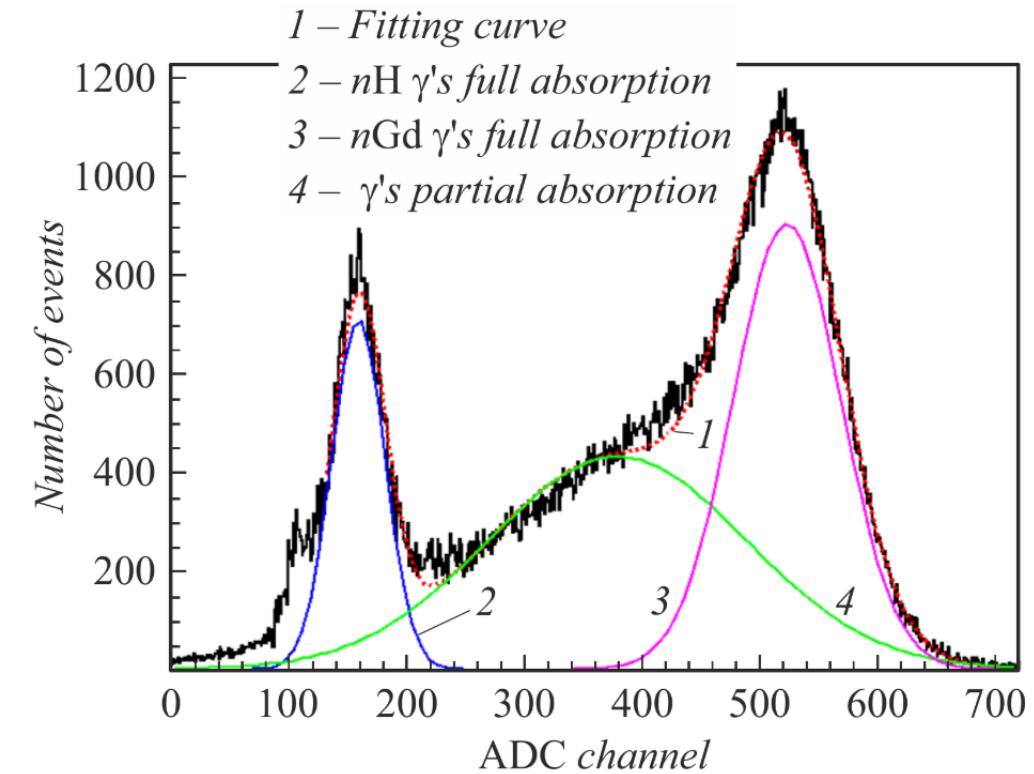
Национальный  
исследовательский  
ядерный университет

**Спасибо за внимание!**

# Доп. слайды

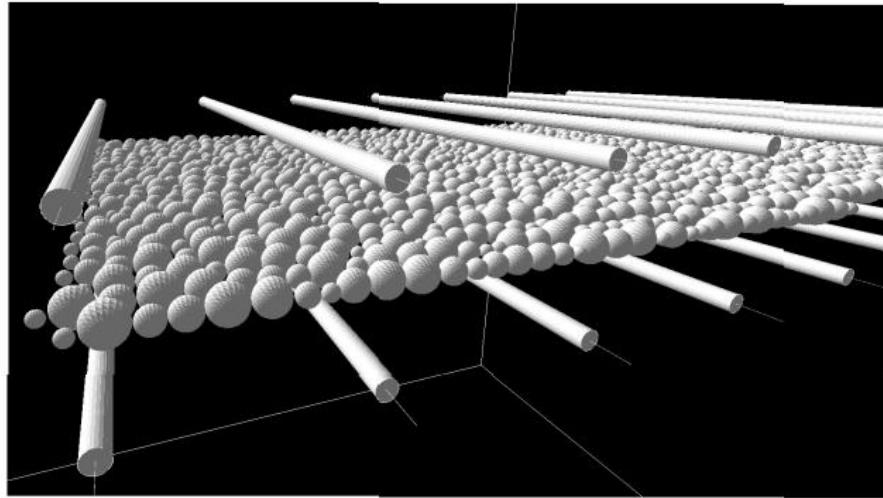


Смоделированный зарядовый спектр захватов нейтронов от источника  $^{252}\text{Cf}$  в центре детектора iDREAM

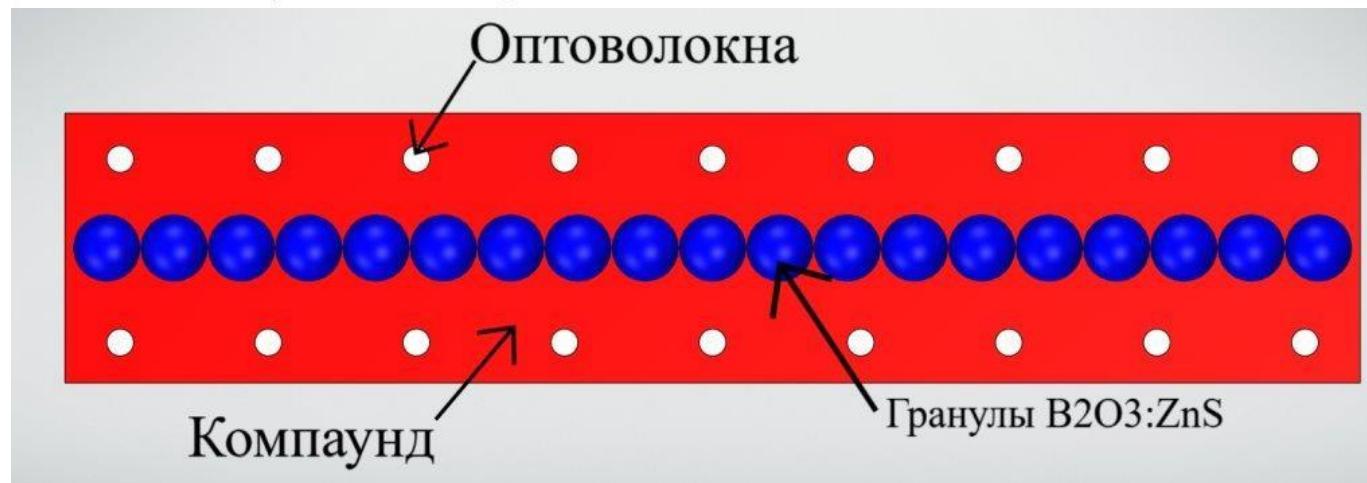


Зарядовый спектр захватов нейтронов от источника  $^{252}\text{Cf}$  в центре детектора iDREAM

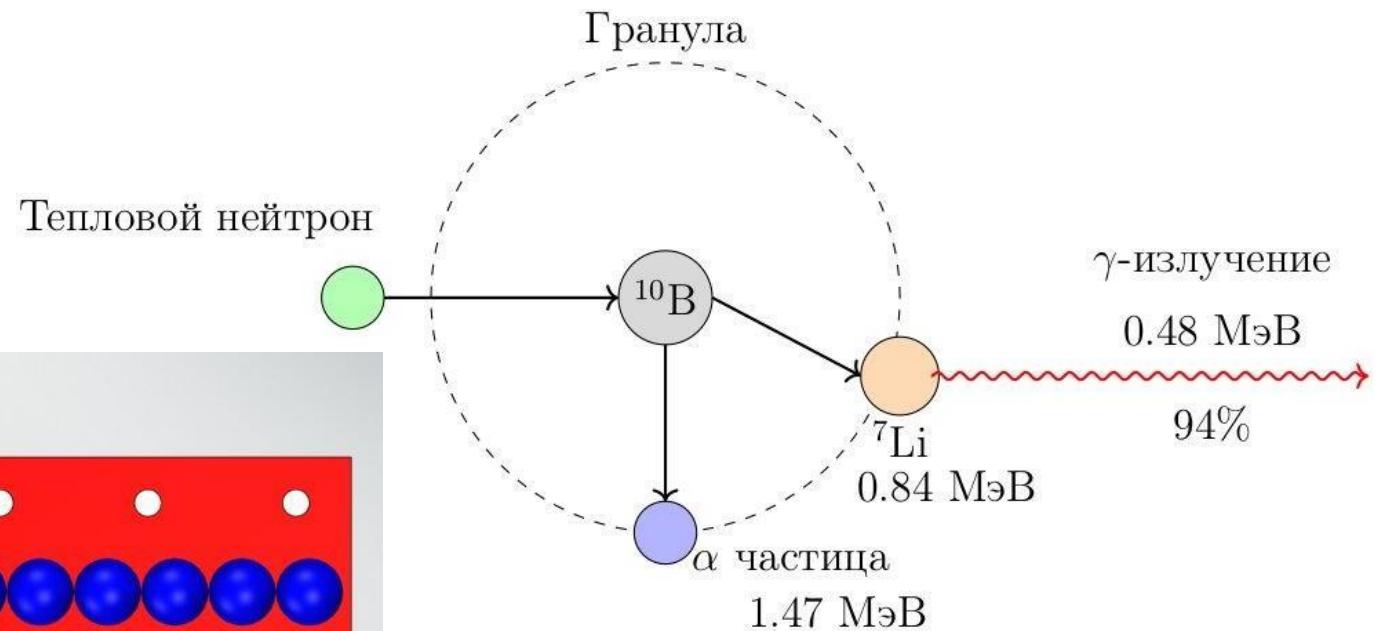
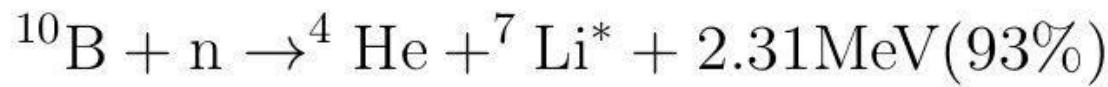
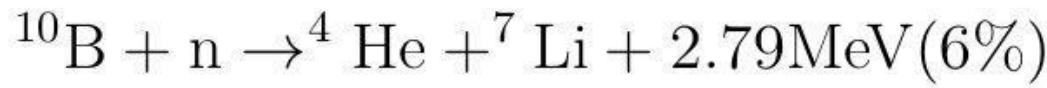
# Доп. слайды



а) Модель установки



б) Схема установки



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

# Доп. слайды

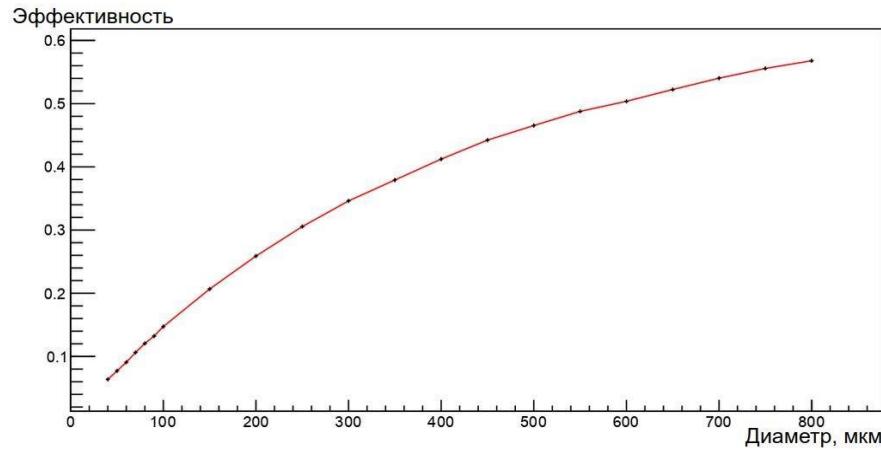


Рис.5. Эффективность захвата нейтронов  
в поглотителе

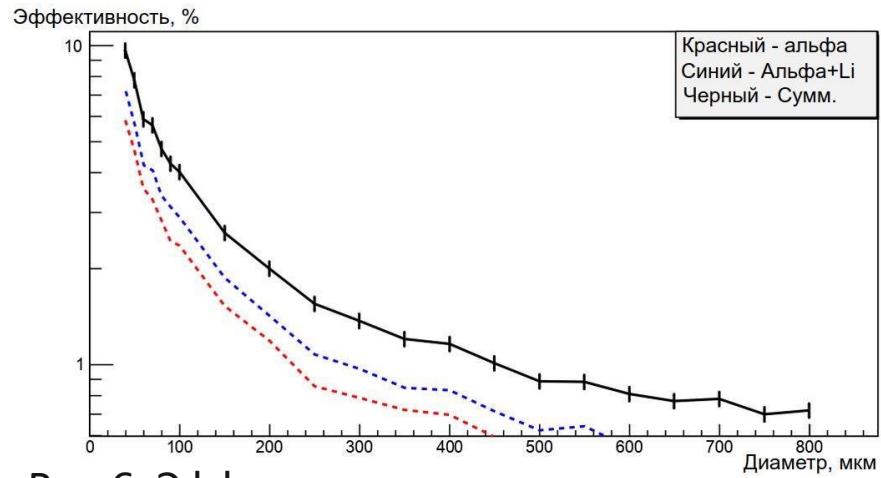


Рис.6. Эффективность вылета частиц из  
гранулы

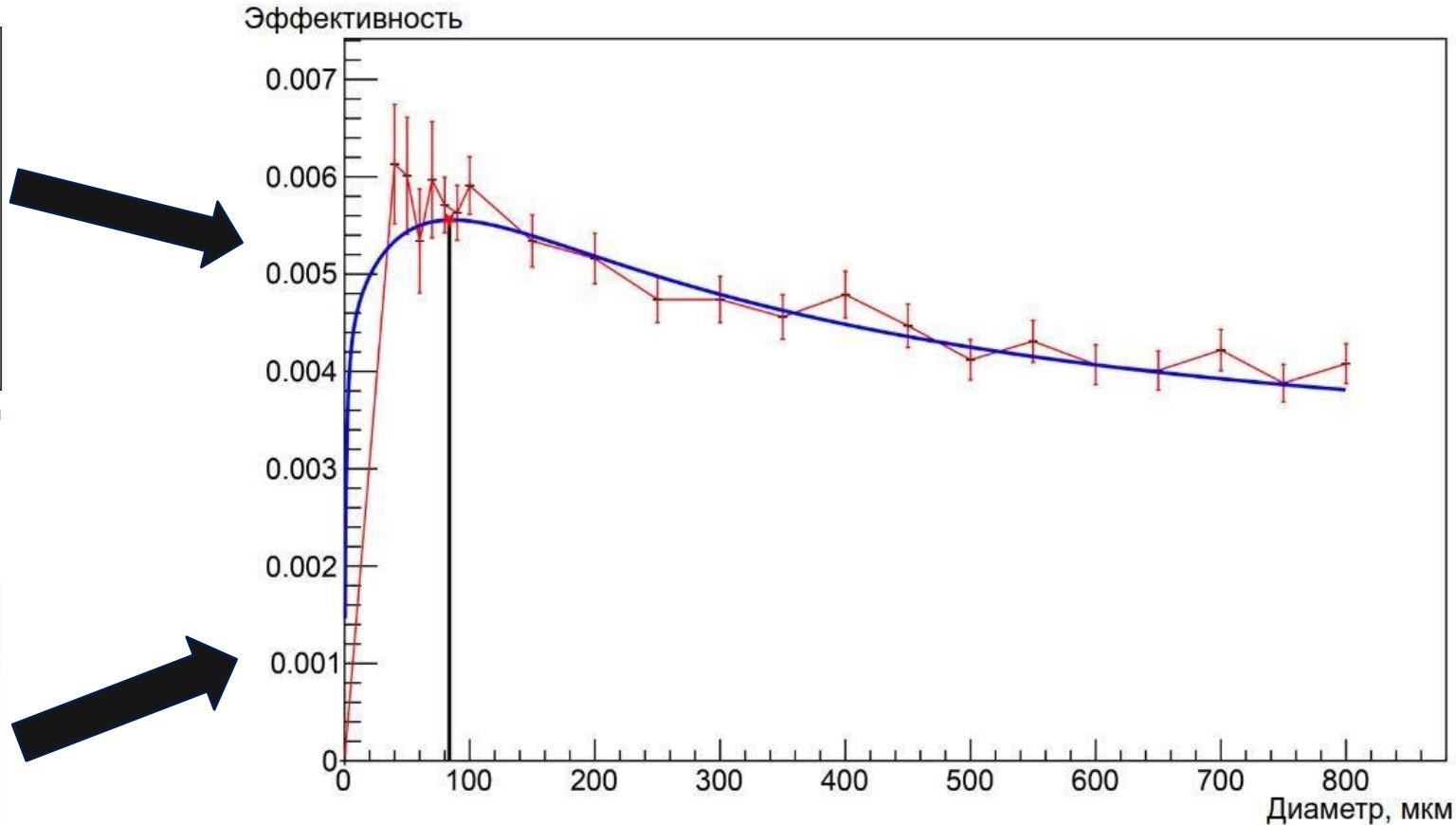
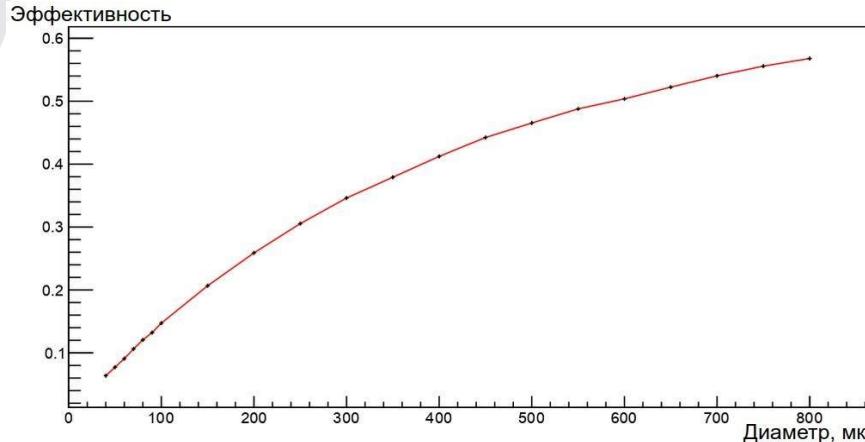


Рис.7. Зависимость эффективности регистрации  
поглотителя от диаметра гранулы

**Получен оптимальный диаметр D=80 мкм**

## Расчет для поглотителя на основе $\text{B}_2\text{O}_3:\text{ZnS}(\text{Ag})$



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

**a=0,129638**

**b=8702,29**

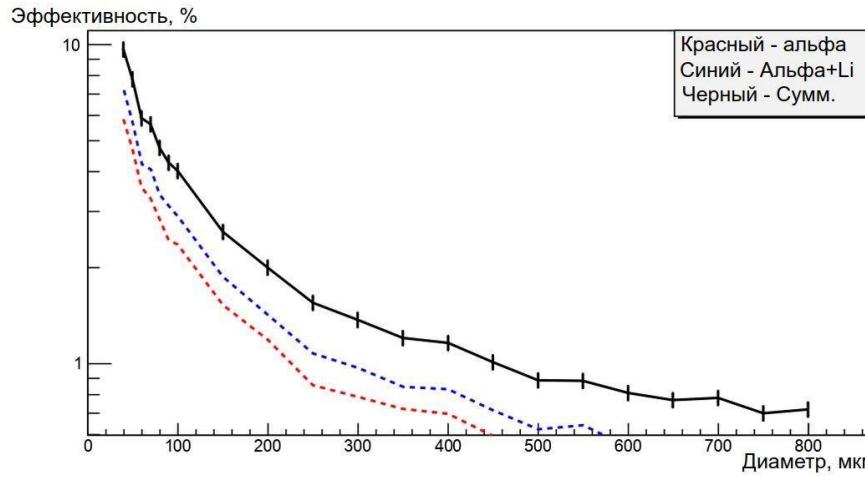
**c=81,4245**

**d=0,00253621**

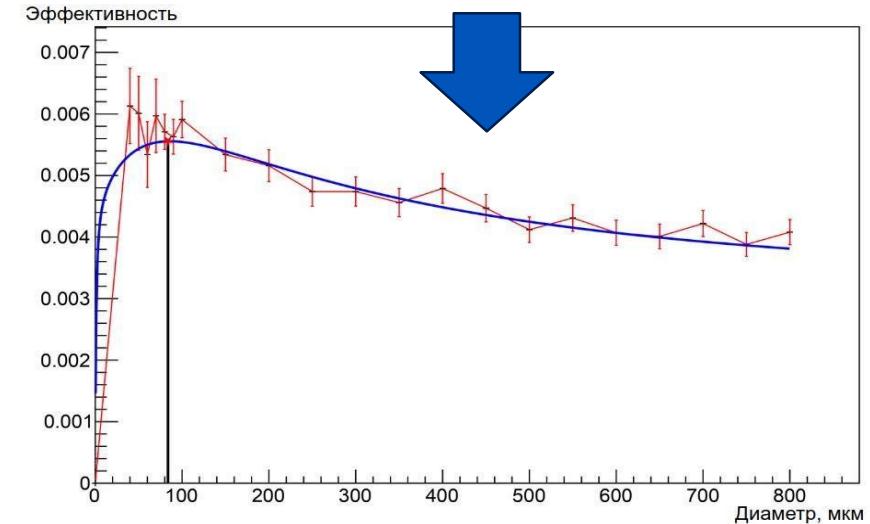
**g=4,25434**

**h=1**

**k=-1,03746**



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



**$f = f_1 \cdot f_2$**

# Доп. слайды



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