

“Моделирование  
измерительного модуля  
детектора реакторных антинейтрино на  
основе пластикового сцинтиллятора”

**Научный руководитель: Попов Даниэль  
Валерьевич, НИЯУ МИФИ**

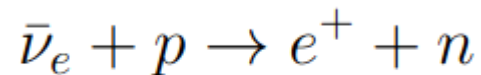
**Научный консультант: Чмыхало Дмитрий  
Александрович, НИЯУ МИФИ**

**Студент: Прокопов Дмитрий Сергеевич**

# Введение

На данный момент в России развивается малая атомная энергетика, в частности одну из ведущих ролей играет производство ПАЭБ. Должны соблюдаться гарантии безопасности, выдвинутые МАГАТЭ. Одним из решений проблемы является нейтринный метод контроля. 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

# Цель

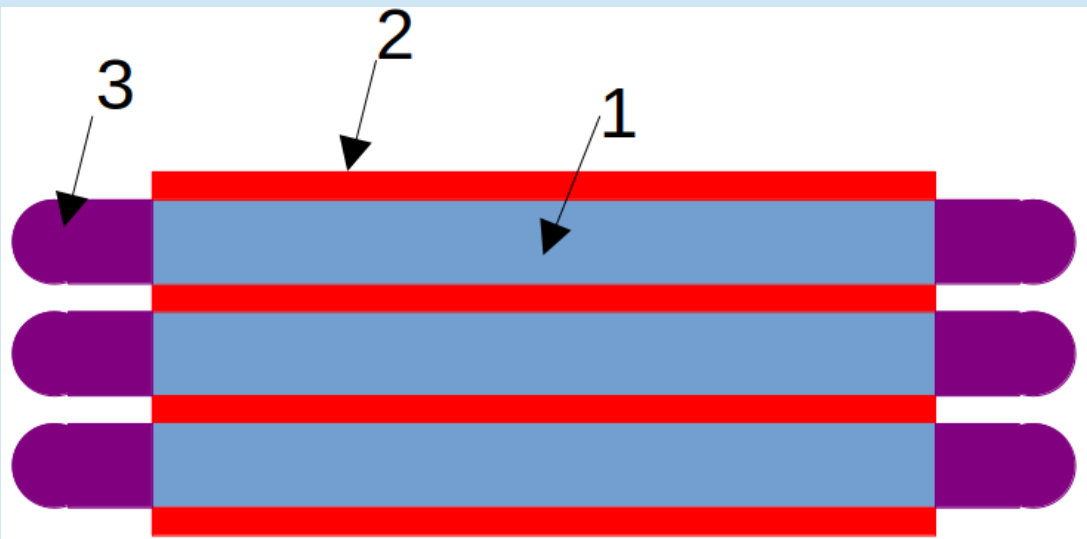
Моделирование измерительного модуля детектора реакторных антинейтрино на основе пластикового сцинтиллятора

- Задачи:

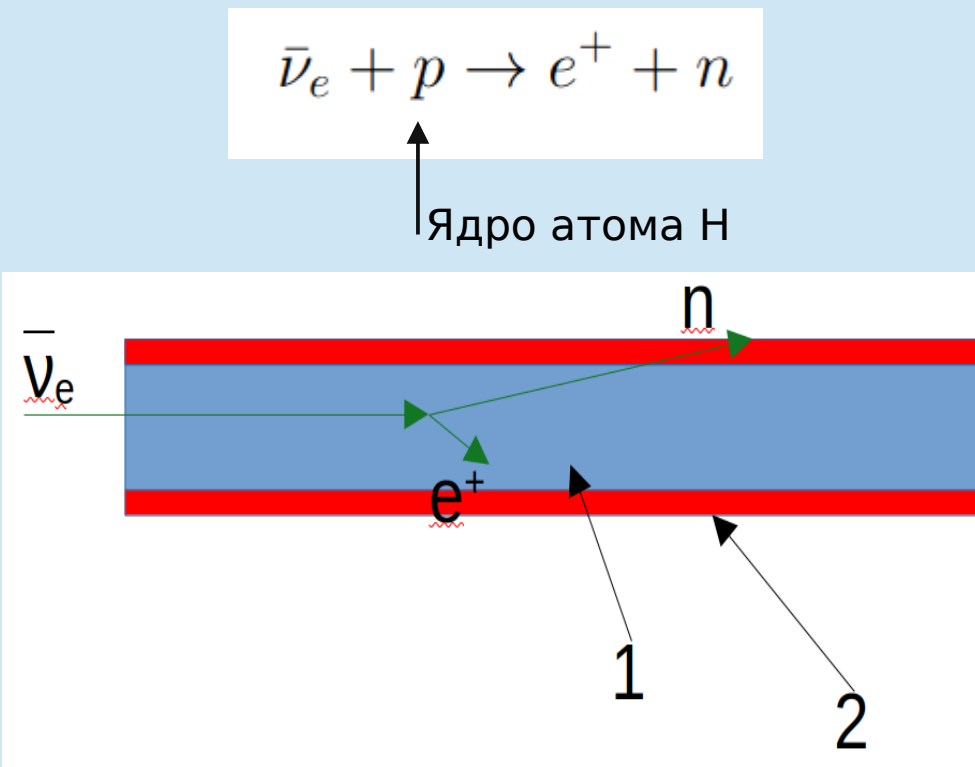
1) Определение оптимальных размеров пластикового сцинтиллятора;

2) Исследование эффективности регистрации моделей нейтронной части модуля антинейтринного детектора: модели с использованием сцинтиллятора **B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:ZnS(Ag)**, а также модели с **Cd** поглотителями.

# Схема сборки детектора реакторных антинейтрино



- 1 - твердотельный органический сцинтиллятор
- 2 - нейтронный поглотитель
- 3 - ФЭУ



# Определение оптимальных размеров пластикового сцинтиллятора

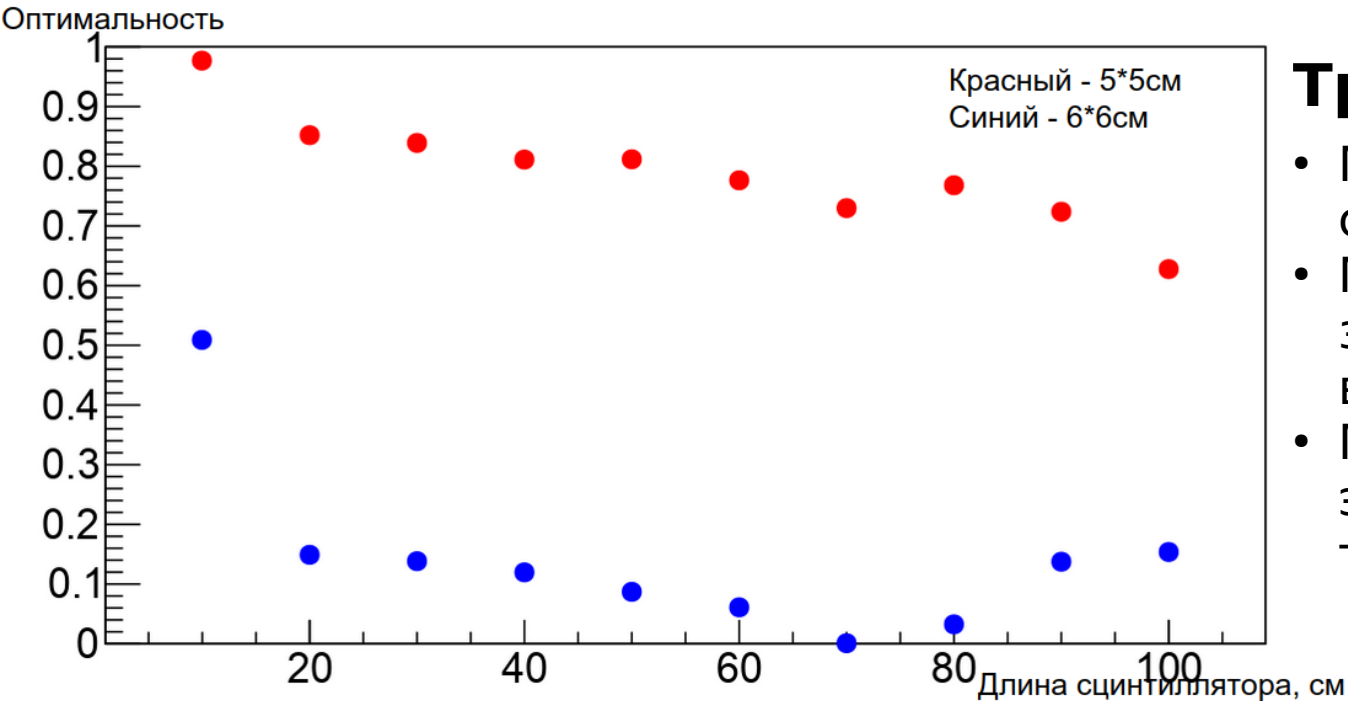
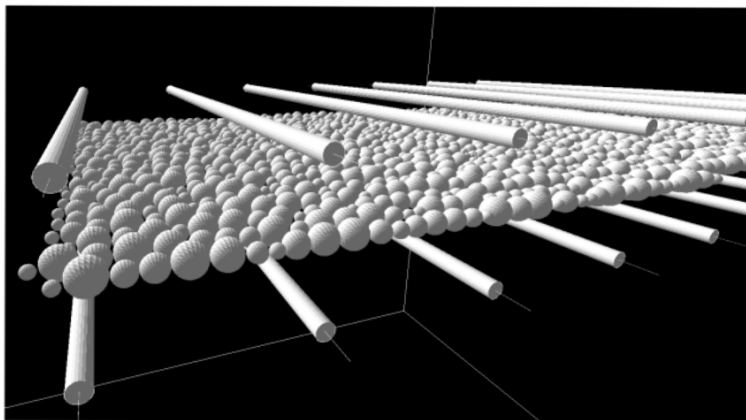


Рис.1. Уровень оптимальности для 5\*5,6\*6см

## Требования:

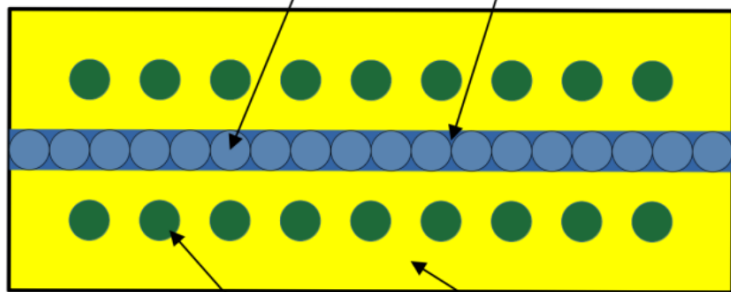
- Максимальное светособирание;
- Минимальная эффективность захвата нейтронов на водороде;
- Максимальная эффективность термализации нейтронов.

# Схема установки с использованием $B_2O_3:ZnS(Ag)$



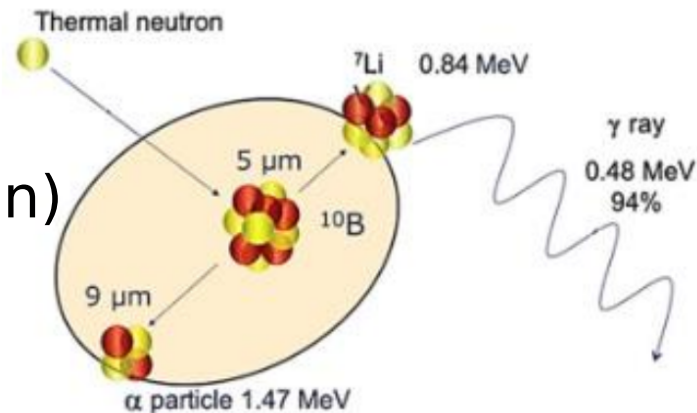
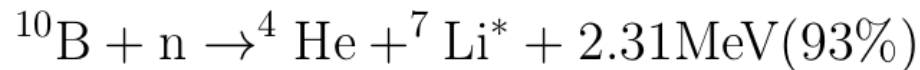
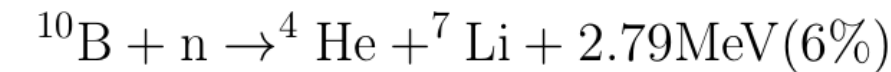
а) Модель установки

$\sigma_{захв} = 764$  барн(тепл. n)



б) Схема установки

- 1 -  $B_2O_3$
- 2 -  $ZnS(Ag)$  Порошок
- 3 - Оптоволокна
- 4 - Компаунд



# Расчет эффективностей захвата нейтронов и получения сигнала в грануле

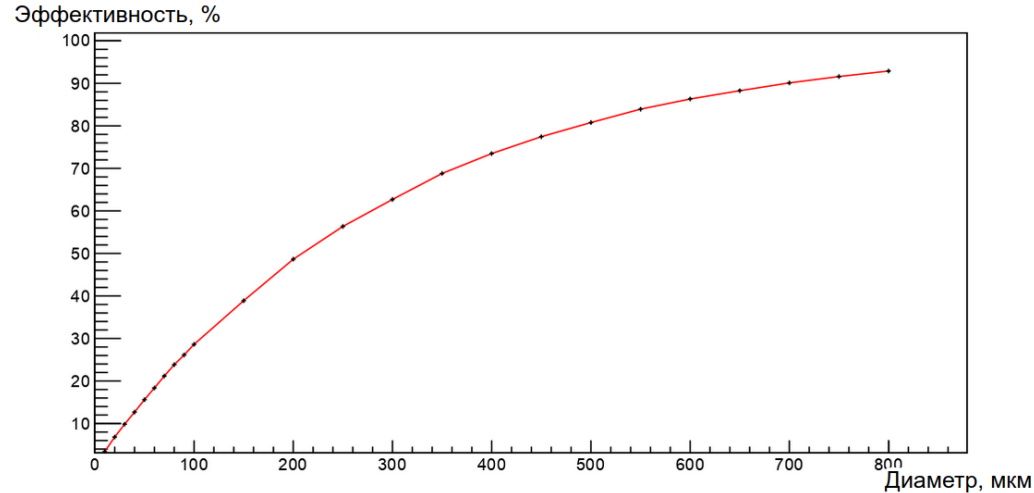


Рис.3. Эффективность захвата нейтронов в грануле

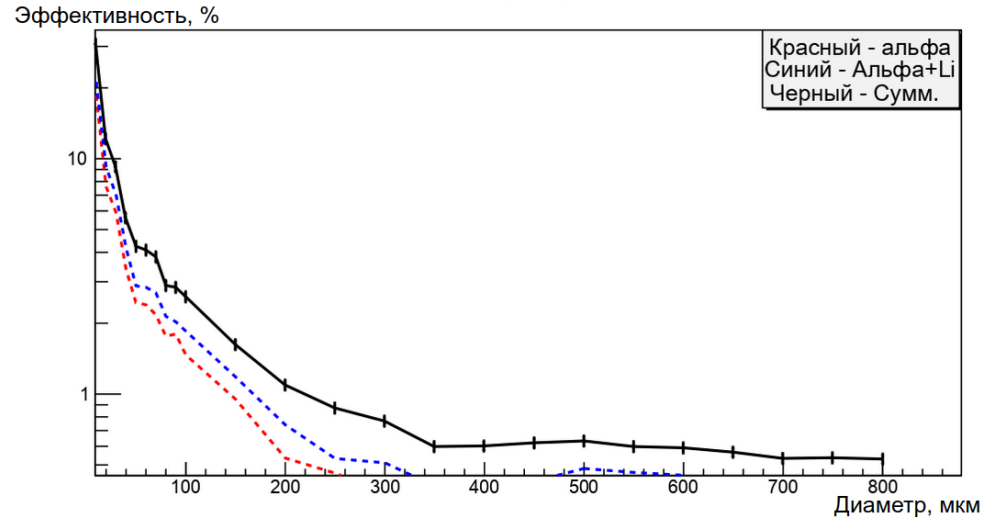


Рис.4. Эффективность вылета частиц из гранулы

По графикам видно, что при уменьшении размера гранулы эффективность захвата нейтронов уменьшается, а эффективность вылета  $\alpha$ -частиц и ядер Li растет и достигает 30%

# Расчет эффективностей захвата нейтронов и получения сигнала в установке

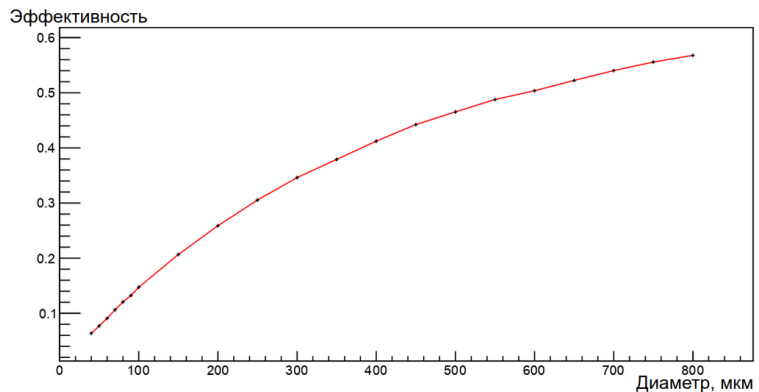


Рис.5. Эффективность захвата нейтронов в установке

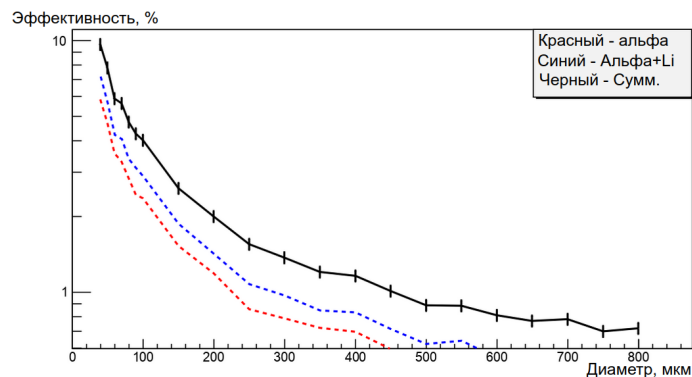


Рис.6. Эффективность вылета частиц из установки

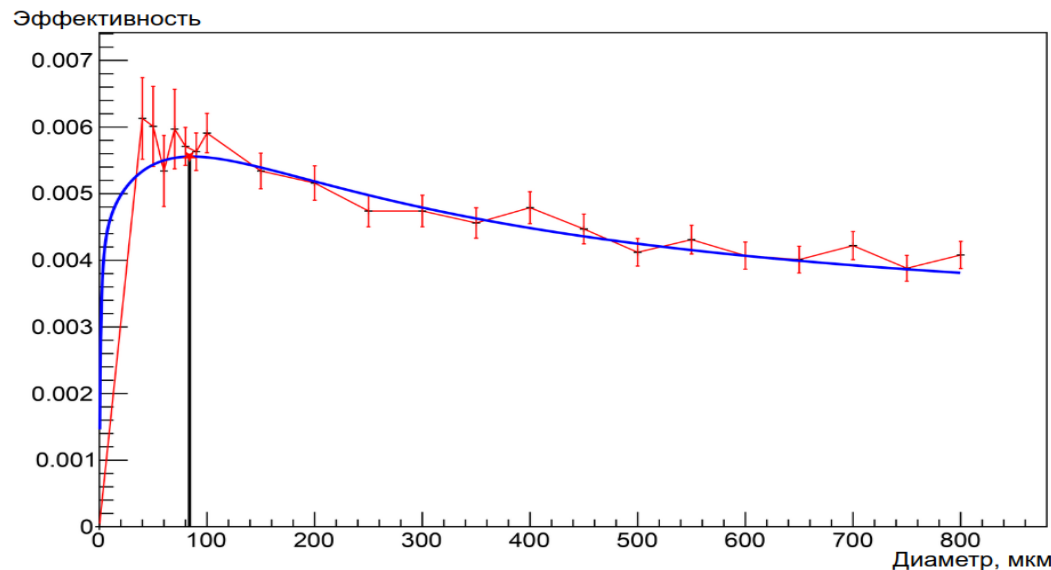
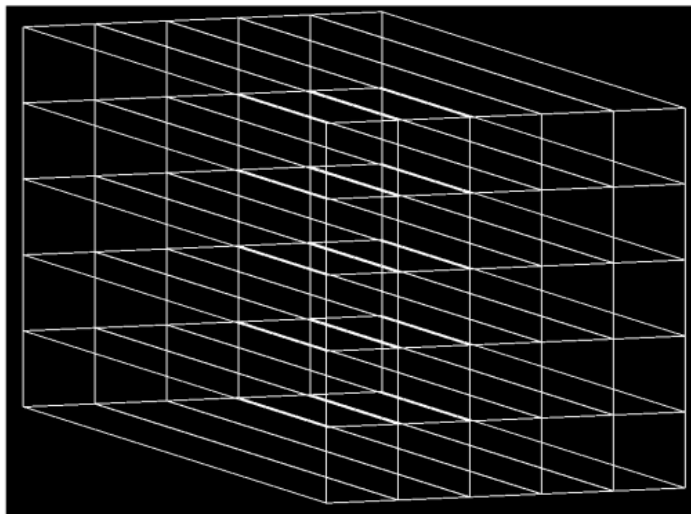


Рис.7. Зависимость эффективности регистрации установки от диаметра гранулы

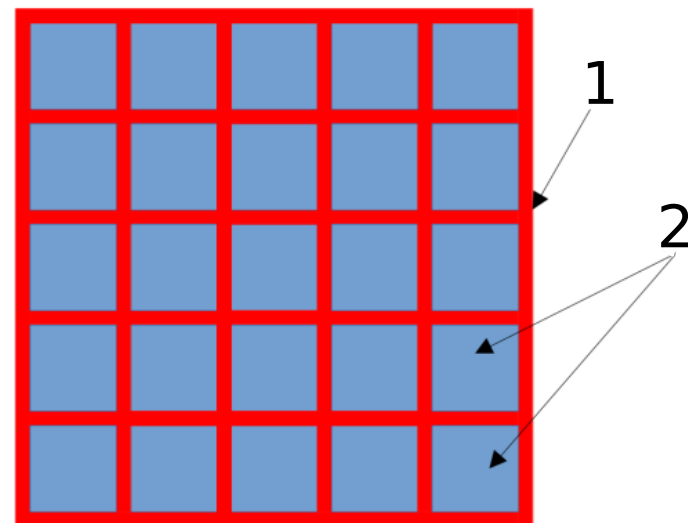
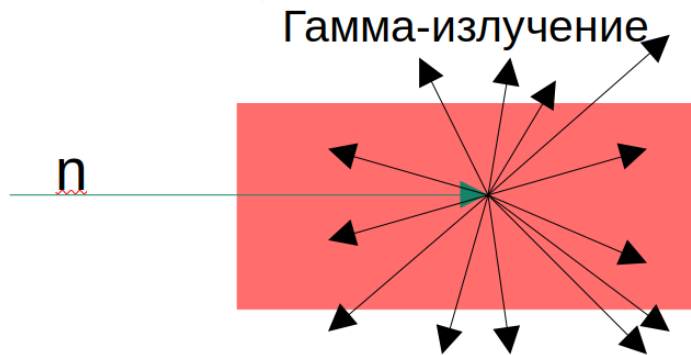
Получен оптимальный диаметр  
 $D=80\text{мкм}$



# Схема модуля с использованием Cd поглотителей



а) Модель на примере сборки



б) Схема установки  
1 - Cd поглотитель в листах  
2 - Сцинтиллятор

$$\sigma_{\text{захв}} = 3800 \text{ барн} \quad E_{\gamma}(\text{сумм}) = 9 \text{ МэВ}$$

# Расчет эффективности захвата нейтронов в Cd поглотителе

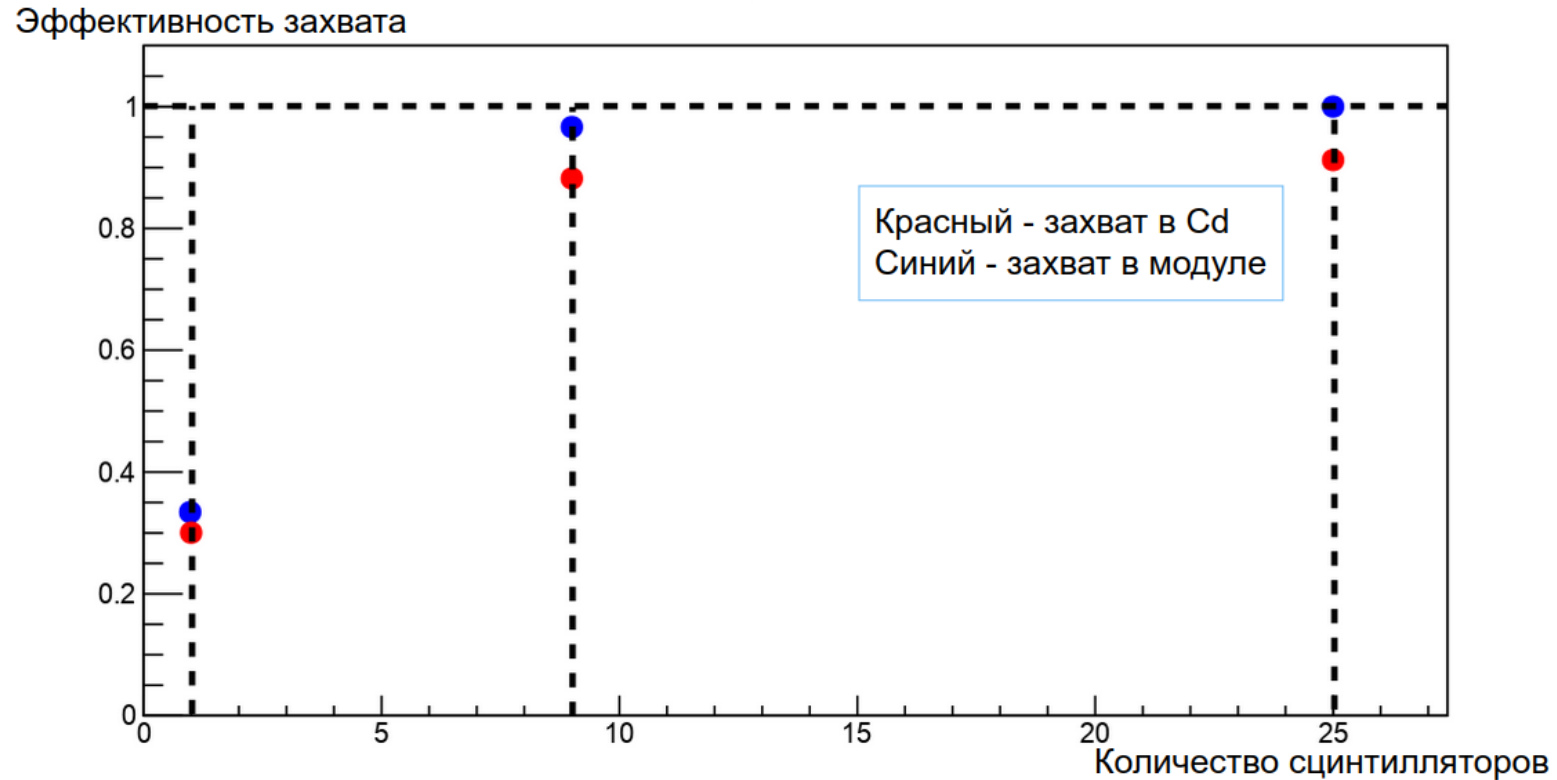


Рис.8.Эффективность захвата нейтронов в Cd поглотителе

# Заключение

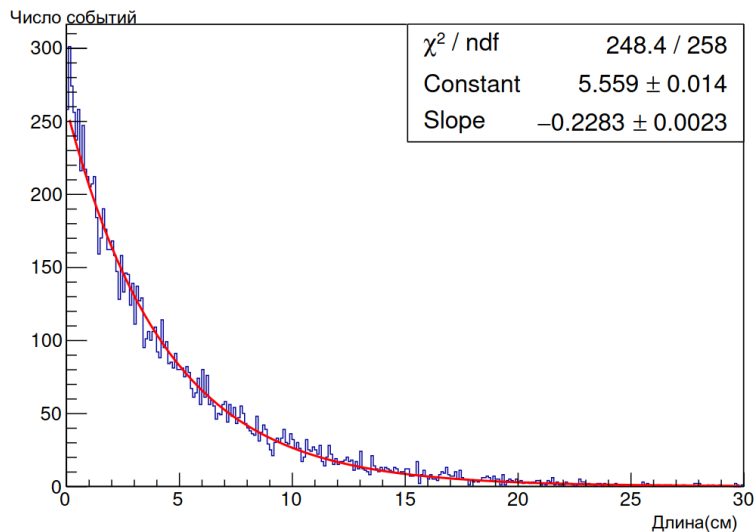
- Проведено исследование для определения оптимальных размеров сцинтиллятора. Учтено условие максимума эффективности термализации нейтронов в сцинтилляторе. В результате оптимальные размеры сцинтиллятора равны **6 · 6 · 70 см.**
- В модели с использованием **B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:ZnS** получен оптимальный диаметр гранулы **D=80мкм**, а также максимальная эффективность регистрации сигнала **0.6%**, чего недостаточно для достижения поставленных задач.
- В модели с **кадмиевыми** поглотителями получено, что близкая к 100% эффективность захвата нейтронов достигается при размерах сборки **5·5** сцинтилляторов. С точки зрения нейтронного захвата эта модель оказывается выгоднее, чем модель с использованием борного сцинтиллятора(**7·7** сцинтилляторов).

**Спасибо за внимание!**

# **Дополнительные слайды**

# Калибровка модели

Расчет с помощью моделирования • Теоретический расчет



Распределение нейтронов по длине свободного пробега



$$\lambda = (4,38 \pm 0,17) \text{ см}$$

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\lambda x}$$

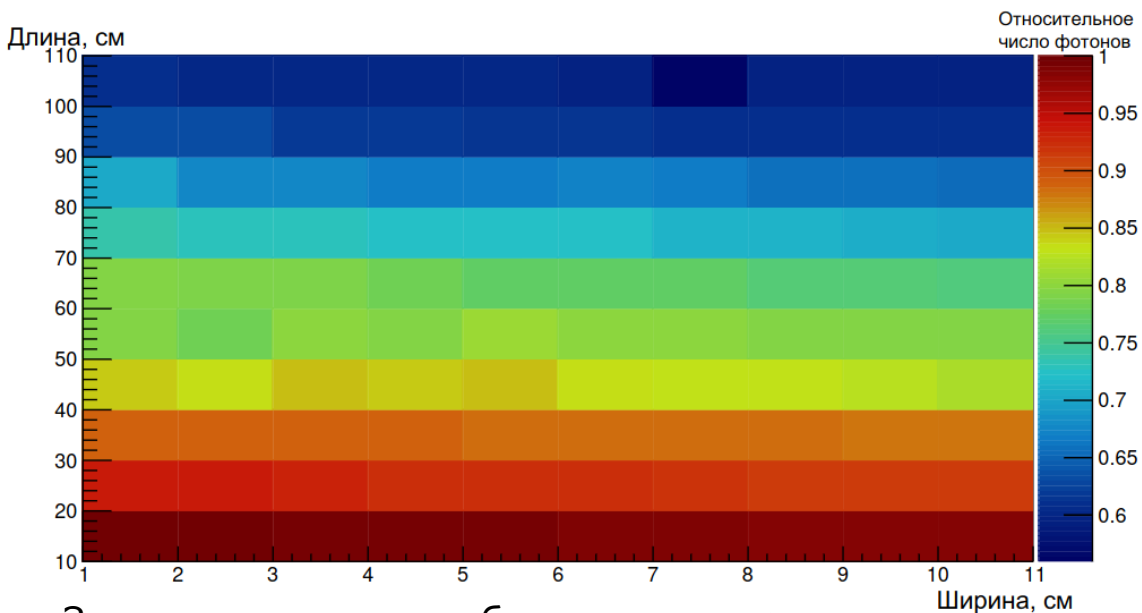


$$\lambda = \frac{1}{n_O \sigma_O + n_H \sigma_H}$$

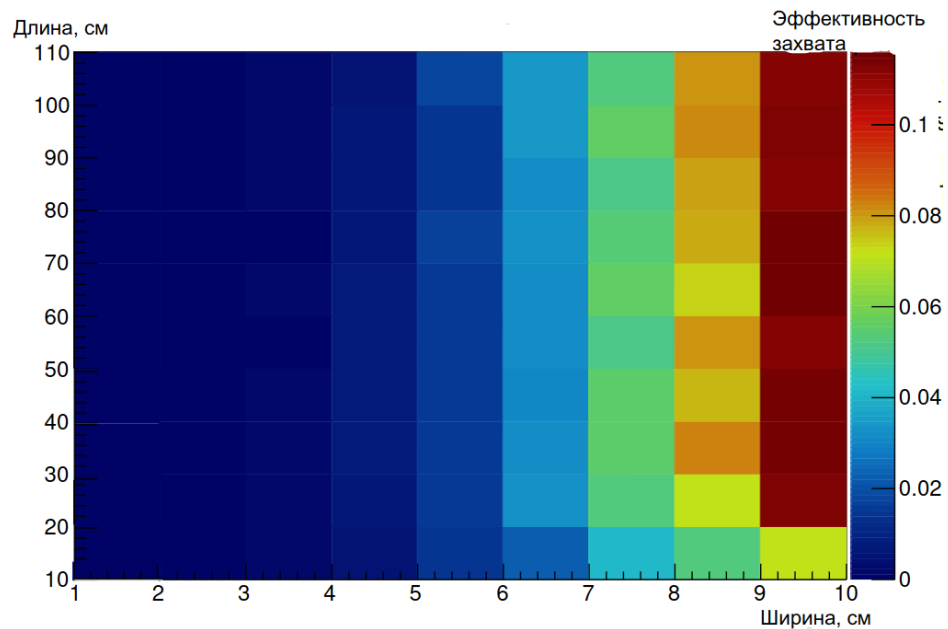


$$\lambda = 4,36 \text{ см}$$

# Оптимизация размеров(1)



Зависимость светособираания от размеров сцинтиллятора



Зависимость эффективности захвата от размеров сцинтиллятора





# Оптимизация размеров(3)

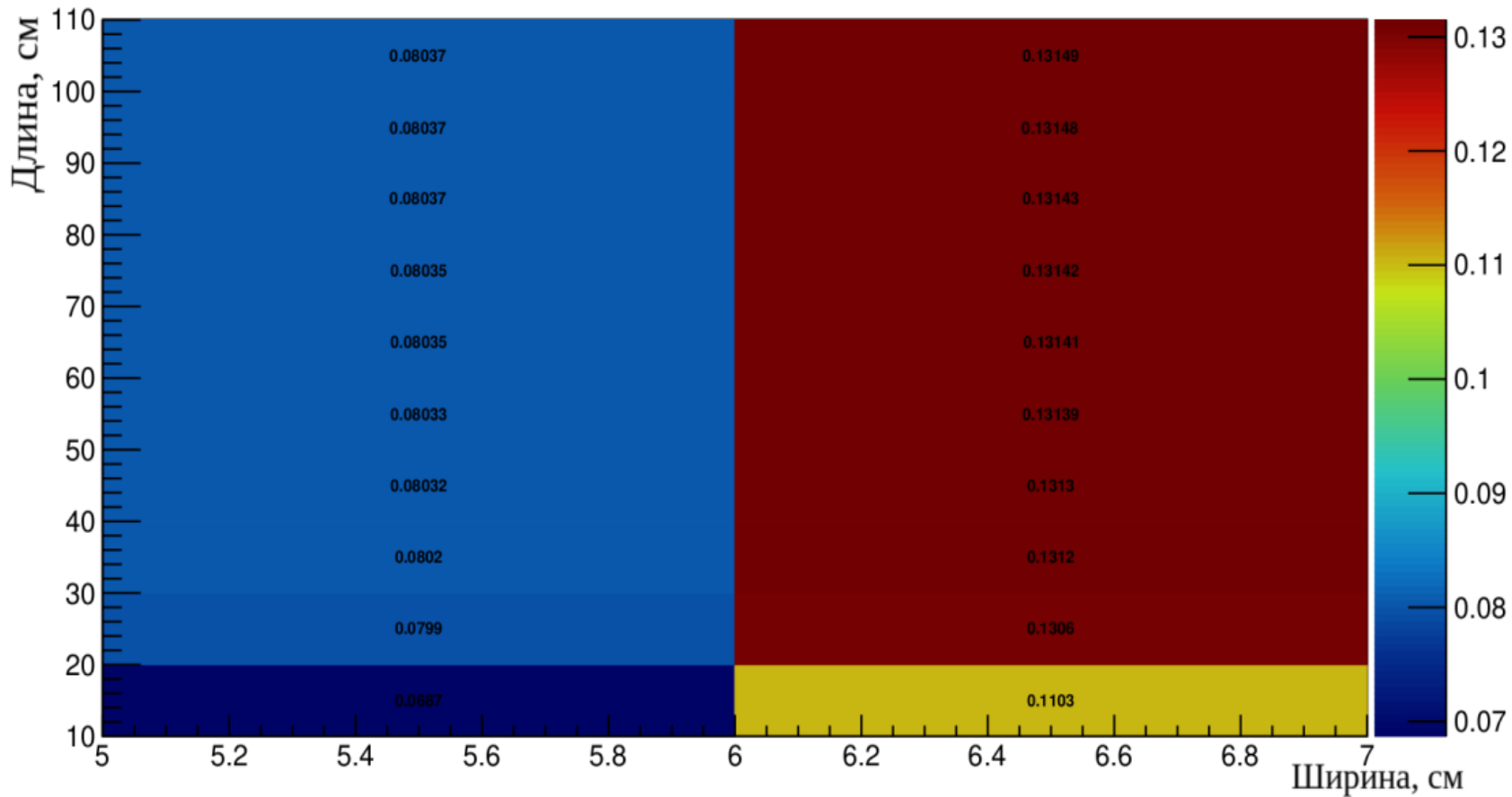
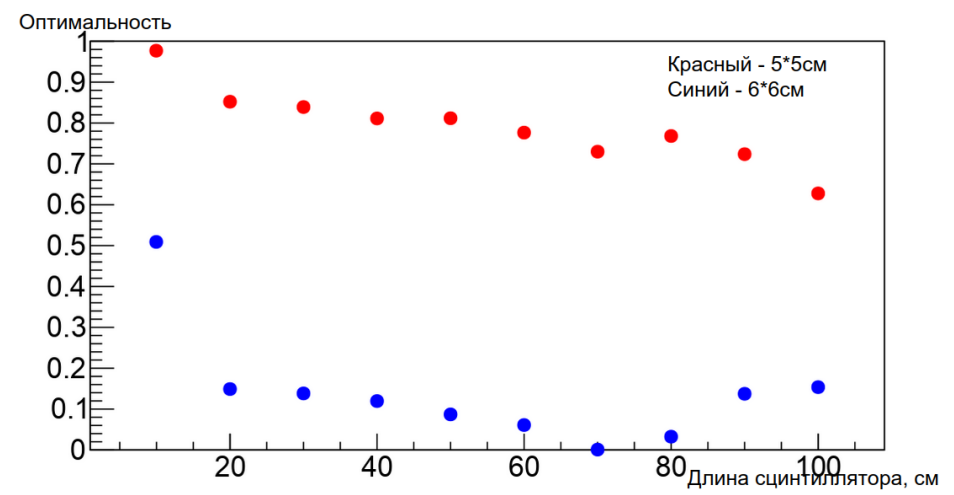
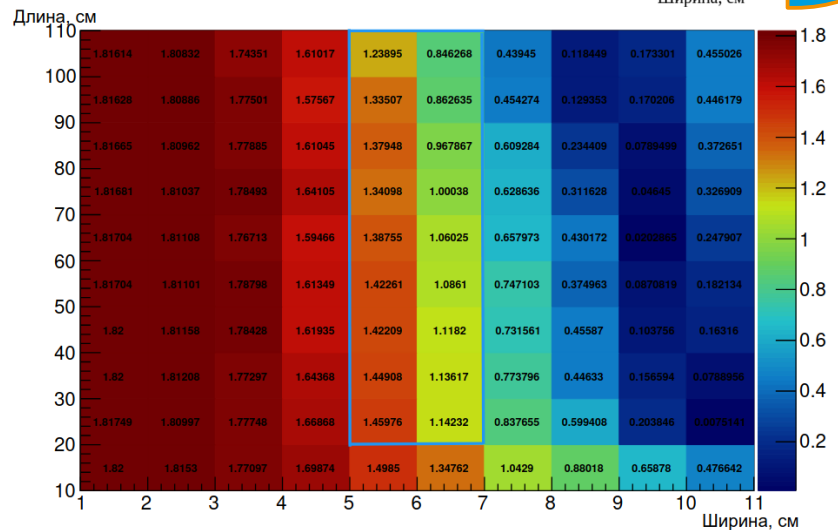
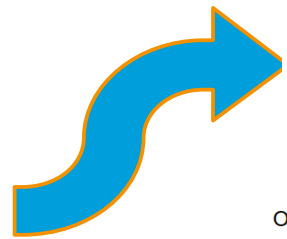
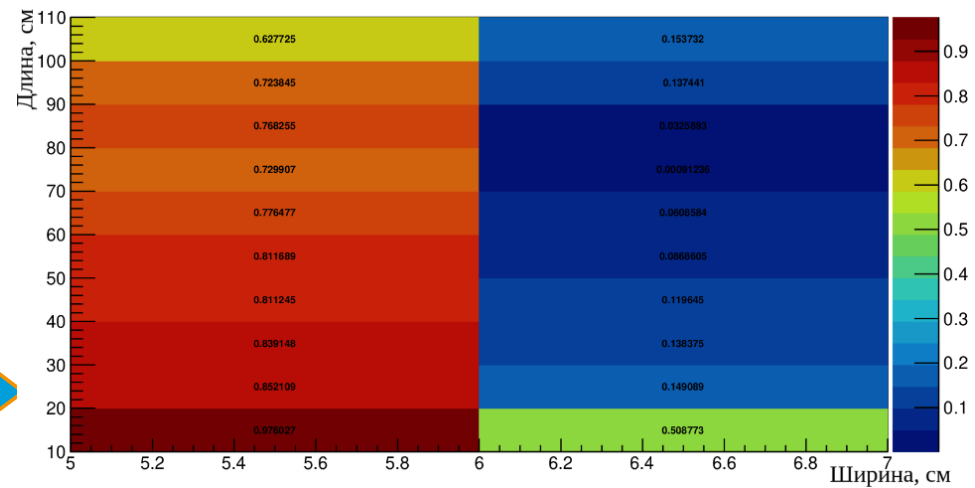
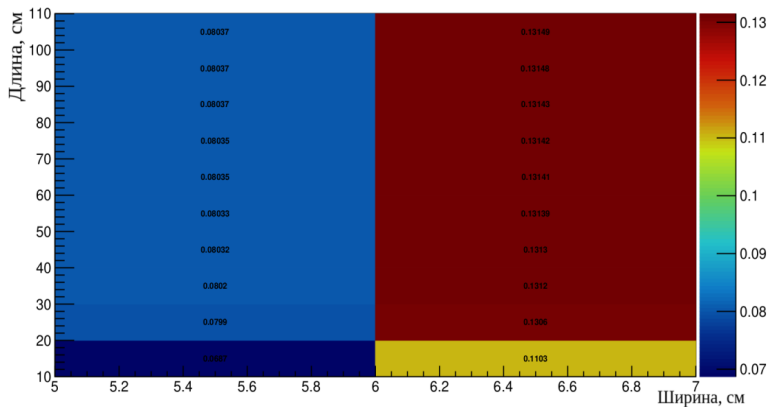
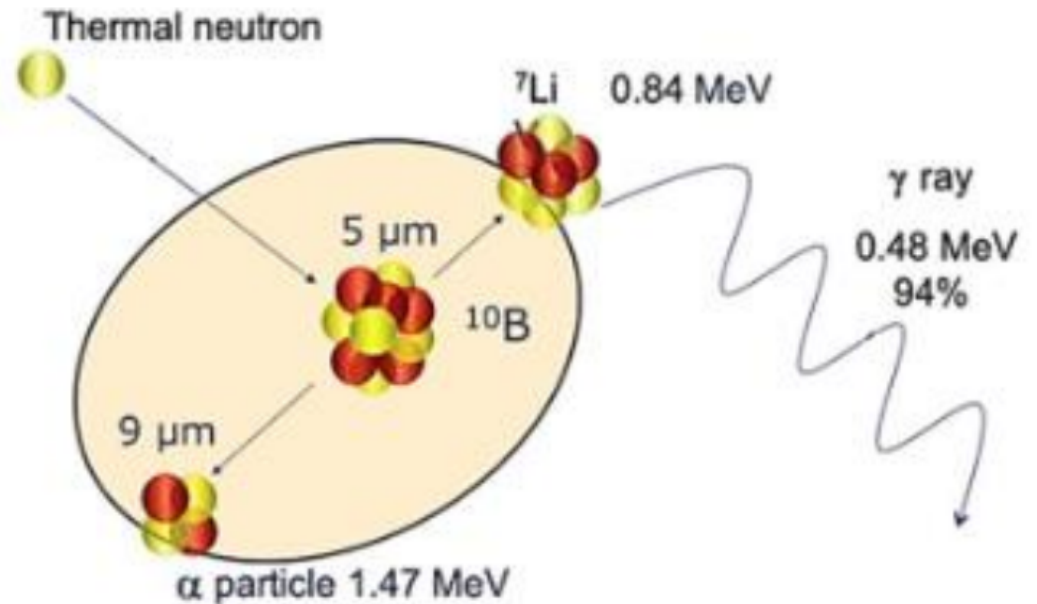
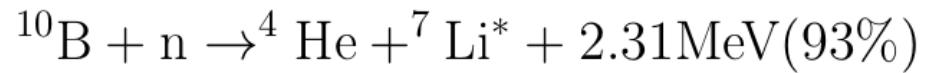
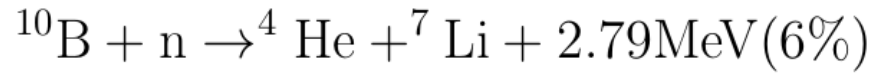


Рис.2 Доля тепловых нейтронов к резонансным

# Оптимизация размеров(4)



# Теория



# Расчет для гранулы

Диаметр, мкм	$\eta_n, \%$	$\eta_\alpha, \%$	$\eta_{Li}, \%$	$\eta_{\alpha+Li}, \%$	$\eta_{sign}, \%$
10	3,44	18,60	2,62	9,30	30,52
20	6,83	7,61	1,61	2,93	12,15
30	9,84	5,89	1,12	2,24	9,25
40	12,68	3,39	0,78	1,41	5,60
50	15,61	2,43	0,45	1,35	4,22
60	18,36	2,40	0,44	1,25	4,08
70	21,17	2,17	0,52	1,13	3,83
80	23,84	1,76	0,38	0,76	2,90
90	26,13	1,80	0,23	0,80	2,83
100	28,62	1,47	0,38	0,73	2,59
150	38,88	0,95	0,23	0,44	1,62
200	48,64	0,53	0,20	0,35	1,09
250	56,35	0,46	0,07	0,34	0,87
300	62,70	0,38	0,13	0,26	0,77
350	68,81	0,31	0,10	0,19	0,60
400	73,49	0,34	0,08	0,18	0,60
450	77,46	0,37	0,05	0,19	0,62

500	80,78	0,42	0,06	0,15	0,63
550	83,93	0,39	0,07	0,13	0,60
600	86,32	0,38	0,07	0,14	0,59
650	88,27	0,35	0,06	0,16	0,57
700	90,11	0,34	0,04	0,14	0,53
750	91,60	0,36	0,05	0,12	0,53
800	92,90	0,36	0,05	0,12	0,52

# Расчет для установки (1)

Диаметр, мкм	$\eta_n, \%$	$\eta_\alpha, \%$	$\eta_{Li}, \%$	$\eta_{\alpha+Li}, \%$	$\eta_{sign}, \%$	$\eta_{summ}, \%$
40	6,37	5,82	1,37	2,44	9,63	0,613
50	7,72	4,70	0,95	2,14	7,78	0,601
60	9,01	3,57	0,65	1,66	5,88	0,534
70	10,63	3,29	0,77	1,55	5,64	0,597
80	12,06	2,84	0,54	1,35	4,74	0,0571
90	13,22	2,44	0,68	1,14	4,26	0,563
100	14,72	2,36	0,54	1,12	4,01	0,591
150	20,67	1,52	0,35	0,71	2,58	0,534
200	25,88	1,19	0,24	0,57	1,99	0,516
250	30,54	0,85	0,22	0,47	1,55	0,474
300	34,61	0,79	0,19	0,40	1,37	0,474
350	37,91	0,72	0,13	0,36	1,20	0,456
400	41,22	0,69	0,14	0,33	1,16	0,479
450	44,23	0,59	0,12	0,30	1,01	0,447
500	46,53	0,50	0,12	0,26	0,89	0,412
550	48,78	0,50	0,14	0,24	0,88	0,431

600	50,37	0,44	0,11	0,26	0,81	0,407
650	52,23	0,40	0,13	0,24	0,77	0,401
700	54,03	0,44	0,14	0,21	0,78	0,422
750	55,57	0,41	0,09	0,19	0,70	0,388
800	56,78	0,42	0,09	0,20	0,72	0,408
Произвольный	38,46	0,57	0,11	0,26	0,94	0,363

# Расчет для установки (2)

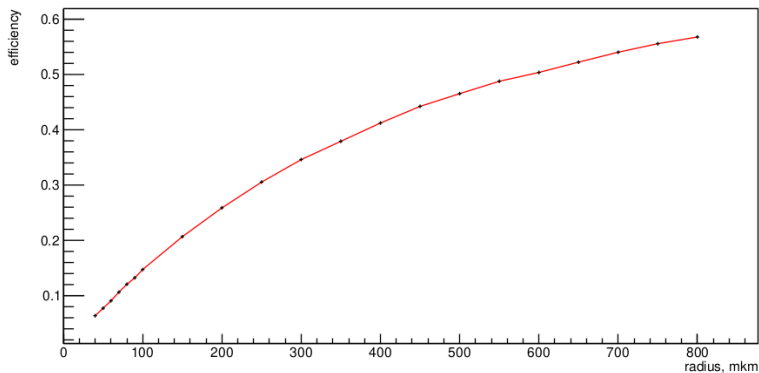


Рис.8. Эффективность захвата нейтронов в установке

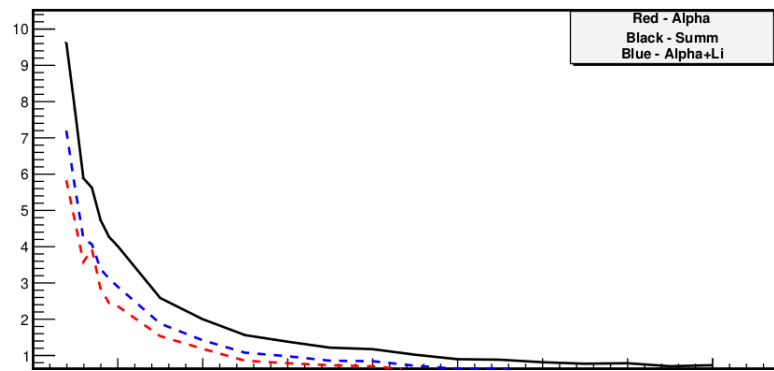


Рис.9. Эффективность вылета частиц из установки



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

$$a=0,129638$$

$$b=8702,29$$

$$c=81,4245$$

$$d=0,00253621$$

$$g=4,25434$$

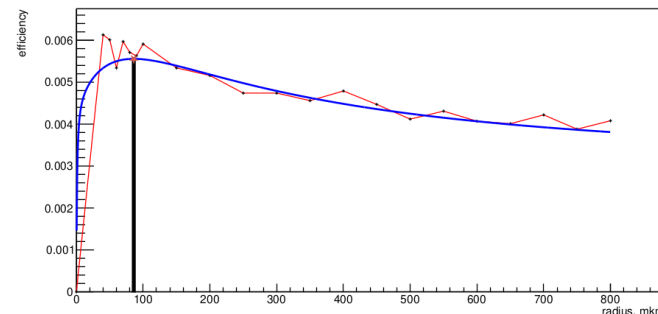
$$h=1$$

$$k=-1,03746$$



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

$$f = f_1 \cdot f_2$$



# Расчет размеров модуля для оксида бора

Количество сцинтилляторов	Толщина борного поглотителя, мм	Захвачено борным поглотителем	Захвачено сцинтилляторами	Не захвачено
3 · 3	2,5	8891	305	804
5 · 5	2,5	9665	310	25
7 · 7	2,5	9678	322	0
	1	9694	306	0

Таким образом, конструкцией модульного детектора, которая захватывает 100% нейтронов, разыгранных в центральном сцинтилляторе, является сборка из 7 · 7 сцинтилляторов с нанесением слоя борного поглотителя толщиной 1 мм между ними.