

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»



Нейтронный модуль твердотельного нейтринного детектора для регистрации антинейтрино по реакции обратного бета-распада

Д.М. Громушкин, А.Н. Дмитриева, А.А. Луковников,
Е.С. Моргунов, А.А. Растимешин, И.А. Шульженко

1 – 5 апреля 2024 (ОИЯИ г. Дубна)

Работа ядерного реактора сопровождается испусканием потока антинейтрино, например, для реакторов ВВЭР-1000 он превышает 10^{20} с^{-1} .

Для регистрации реакторных антинейтрино, можно использовать реакцию их взаимодействия с протоном (обратный бета-распад): $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

Позитрон за несколько наносекунд теряет свою энергию и аннигилирует в веществе детектора с излучением двух гамма-квантов с общей энергией 1.022 МэВ.

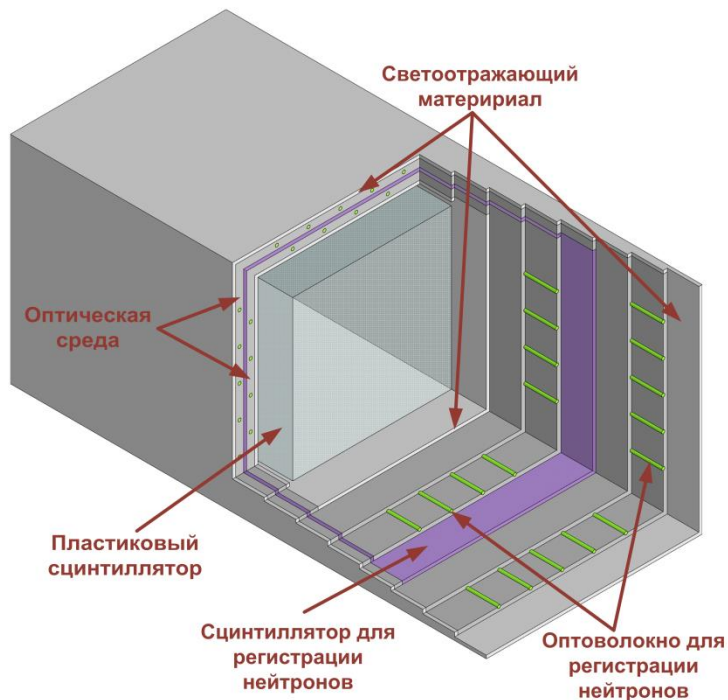
Нейтрон с энергией 5÷20 кэВ в течение ~10 мкс замедляется в веществе детектора, после чего может быть зарегистрирован.

Поскольку для термализации и регистрации нейтрона требуется некоторое время, используется задержанное совпадение сигнала от регистрации позитрона и сигнала от регистрации теплового нейтрона.



Разработка и создание модульного твердотельного нейтринного детектора

Схема измерительного модуля

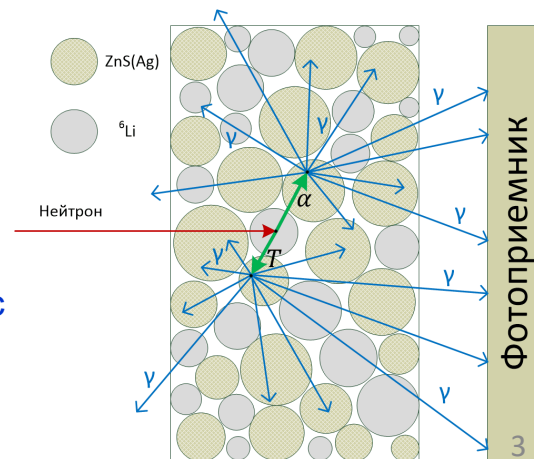


Позитрон регистрируется пластиковым сцинтиллятором, который также участвует в термализации нейтронов.

Основной сложностью в данном случае является регистрация нейтронов.

Цель: создание нейтронного модуля для твердотельного нейтринного детектора.

Для регистрации нейтронов можно использовать неорганический сцинтиллятор $\text{ZnS}(\text{Ag})$ с добавкой ${}^6\text{LiF}$ или B_2O_3



Выбор сцинтиллятора

Сцинтиллятор	Добавка	Световыход на нейтрон, фотонов	$T_{\text{высв.}} \text{ нс}$
${}^6\text{Li-glass}$	Ce	~ 6000	75
${}^6\text{LiI}$	Eu	~ 50000	1400
${}^6\text{LiF/ZnS}$	Ag	~ 160000	200/10000
${}^6\text{LiBaF}_3$	Ce,K	~ 3500	1/34/2100
${}^6\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$	Ce	~ 40000	200/800
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$	Ce	~ 70000	1000
$\text{B}_2\text{O}_3/\text{ZnS}$	Ag	~ 80000	200/10000

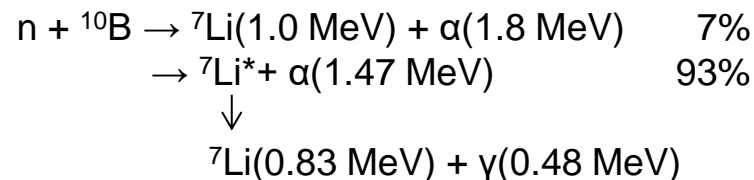
Основными производителями сцинтилляторов с ${}^6\text{Li}$ являются Eljen Technology и Saint-Gobain Crystals.

В России производство сцинтилляторов с ${}^6\text{Li}$ ограничено.

Сцинтилляционная композиция $\text{ZnS}(\text{Ag})+\text{B}_2\text{O}_3$ (ЛРБ-2) ЗАО "НПФ "Люминофор"

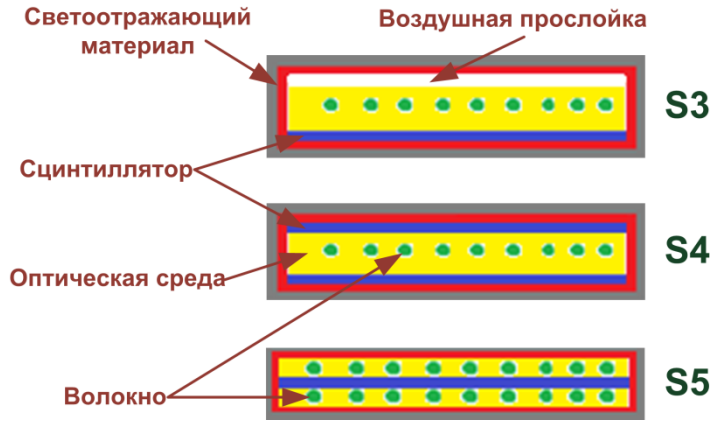
Размер гранул от 300 до 800 мкм.

Регистрация тепловых нейтронов изотопом ${}^{10}\text{B}$, который присутствует в естественном боре (19.8%):



- эффективность регистрации тепловых нейтронов 5-10%;
- эмиссионный спектр (450 нм) подходит для фотоумножителей;
- медленная компонента позволяет проводить отбор по форме импульса;
- возможность изготовления сцинтиллятора большой площади;
- малое время восстановления;
- низкая чувствительность к заряженным частицам.

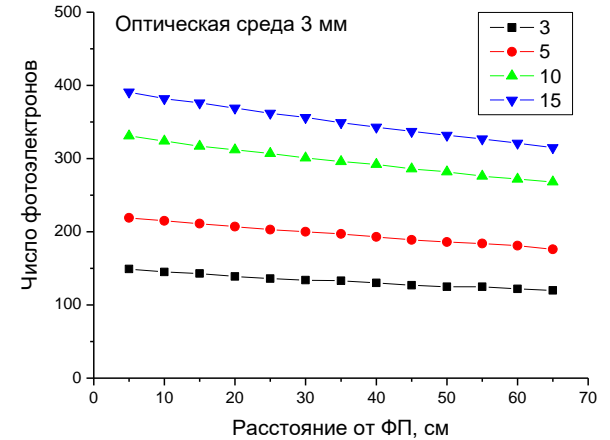
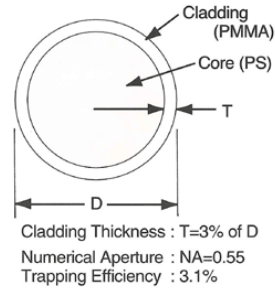
Выбор геометрии нейтронного модуля



Длина	700 мм
Ширина	50 мм
Высота	7 мм
Количество волокон	9 (18)
Толщина слоя сцинтиллятора	50 мг/см ²
Отражатель	Тайвек

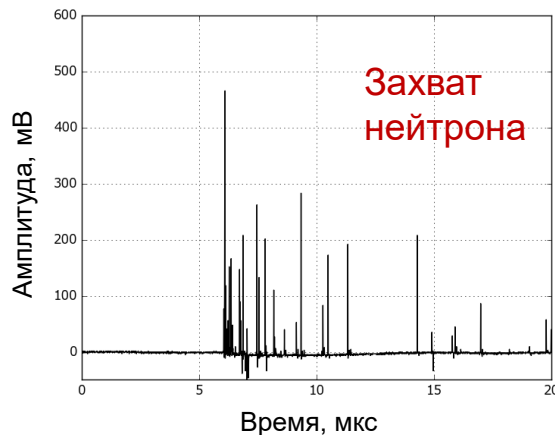
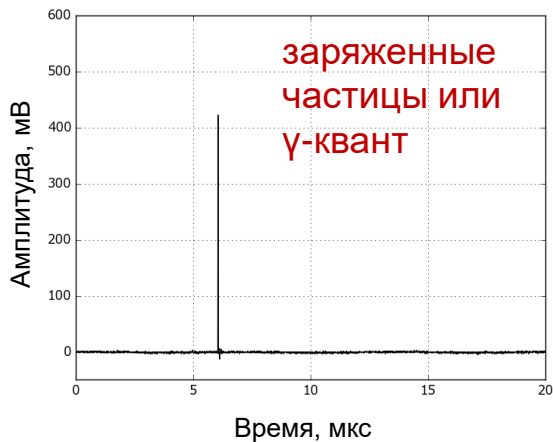
Среднее число зарегистрированных фотоэлектронов в зависимости от расстояния до ФП

Kuraray Y11_200



Выделение сигналов, вызванных захватом нейтронов

Типовые сигналы

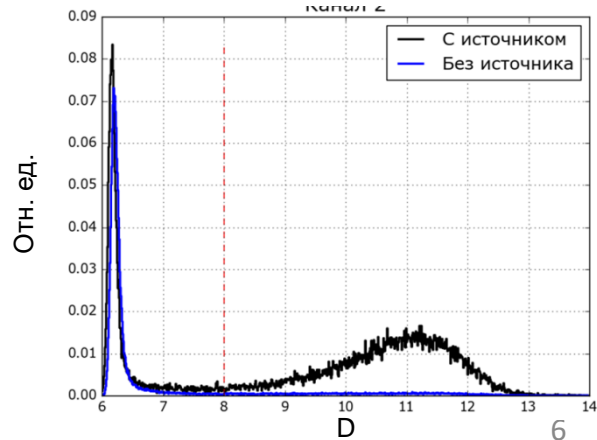
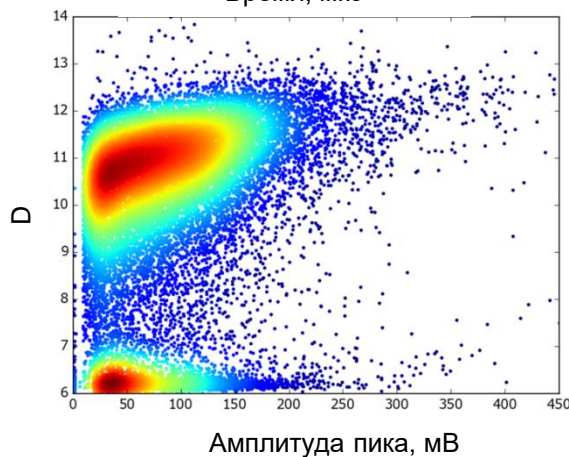


Для разделения сигналов n/γ , е используется безразмерный параметр D:

$$D = \ln \left(\sum_{n=t_{tail_1}}^{t_{tail_2}} x_n^2 \right)$$

Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, No. 9,

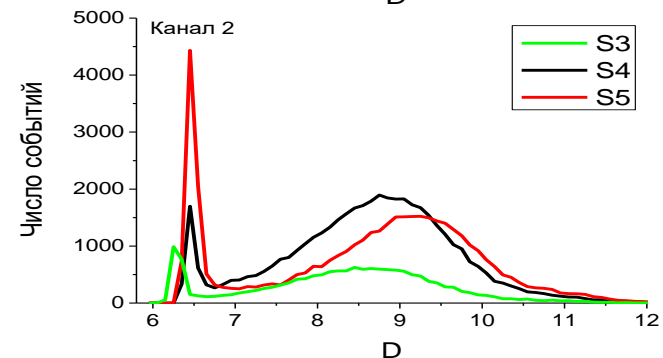
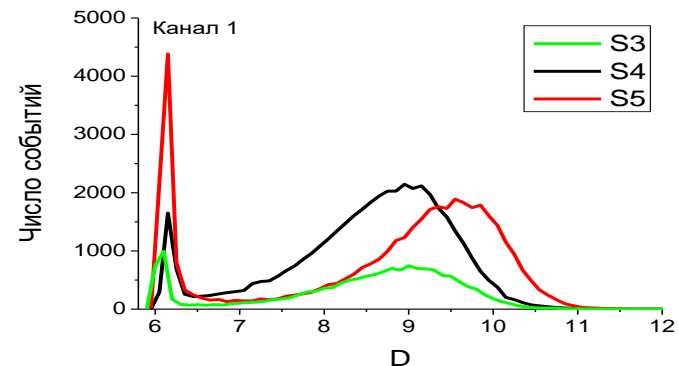
Параметр отбора D для отбора нейтронов определяется как локальный минимум между пиком от шумов и пиком от нейтронов.



Результаты тестирования

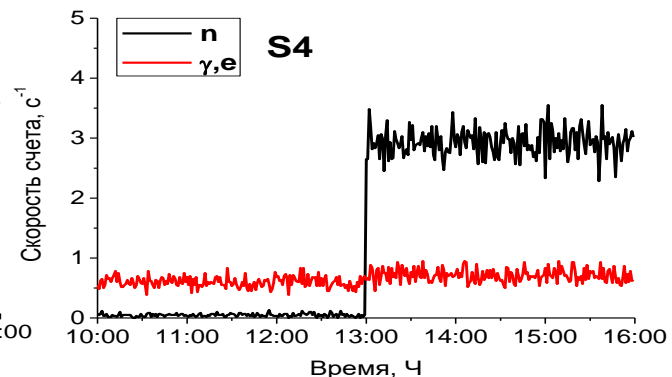
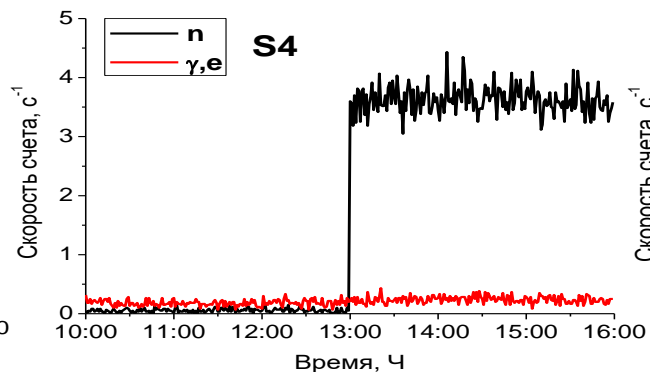
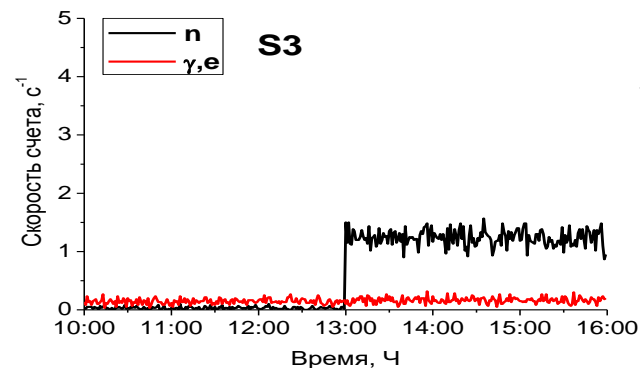


Распределения параметра D (источник по центру)



Параметр D ~ числу зарегистрированных фотонов.

Результаты тестирования



		D1	D2	$N_1, \text{с}^{-1}$	$N_2, \text{с}^{-1}$	$N, \text{с}^{-1}$	$N_{\text{noise}}, \text{с}^{-1}$
S3	^{252}Cf	6.4	6.6	1.27	1.26	1.24	0.17
	No source			0.04	0.04	0.03	0.14
S4	^{252}Cf	6.7	6.8	3.69	3.72	3.63	0.24
	No source			0.07	0.08	0.06	0.18
S5	^{252}Cf	7	7	3.01	3.03	2.93	0.71
	No source			0.09	0.10	0.05	0.50

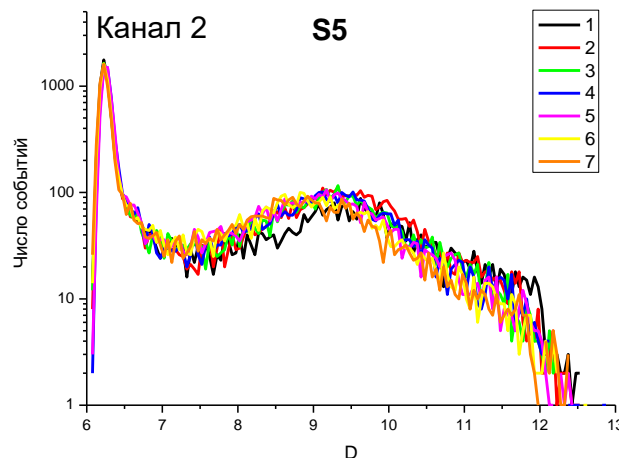
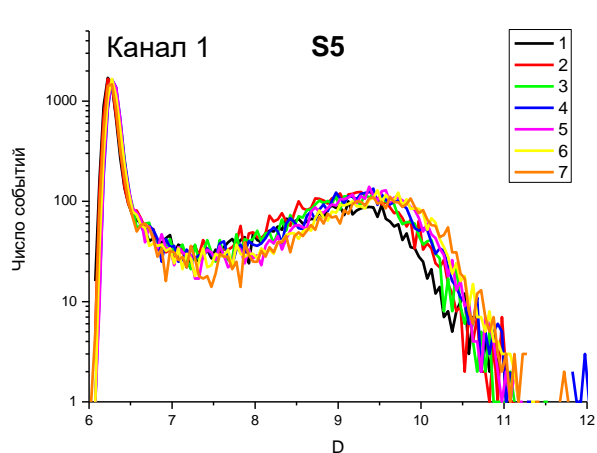
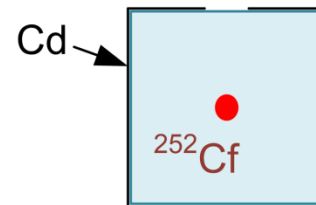
Выбрана конструкция модуля **S5**:

- хорошее разделение сигналов;
- высокая скорость счета нейтронов.

Исследование однородности модуля S5

Для проверки однородности регистрации нейтронов проведены измерения с различным расположением источника.

Источник нейтронов в замедлителе и в кожухе из кадмия с окном в верхней грани $5 \times 5 \text{ см}^2$.

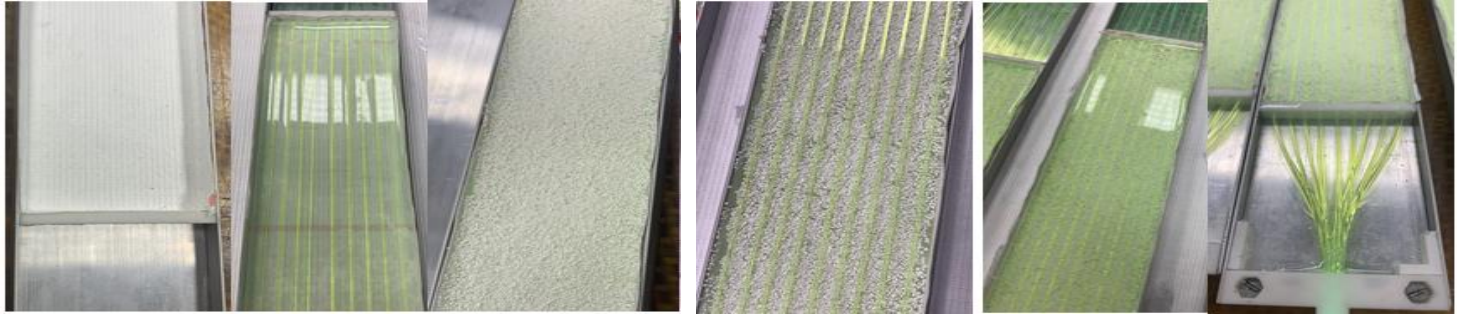


Распределения параметра D

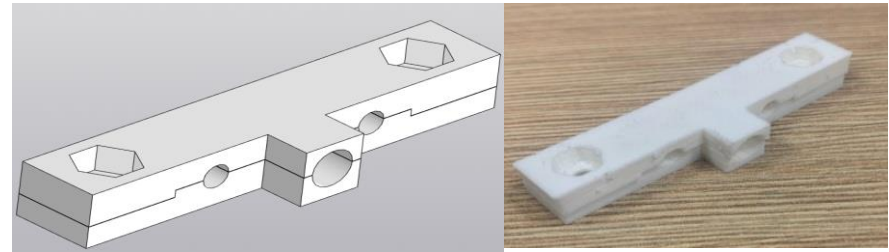
$$\begin{aligned}\langle N_1 \rangle &= 0.38 \pm 0.03 \text{ с}^{-1} \\ \langle N_2 \rangle &= 0.39 \pm 0.03 \text{ с}^{-1} \\ \langle N \rangle &= 0.34 \pm 0.03 \text{ с}^{-1} \\ \langle N_{\text{noise}} \rangle &= 0.47 \pm 0.02 \text{ с}^{-1}\end{aligned}$$

Неоднородность
по скорости счета
нейтронов не
более 10%.

Создание одинаковых четырех модулей



Этапы изготовления модулей

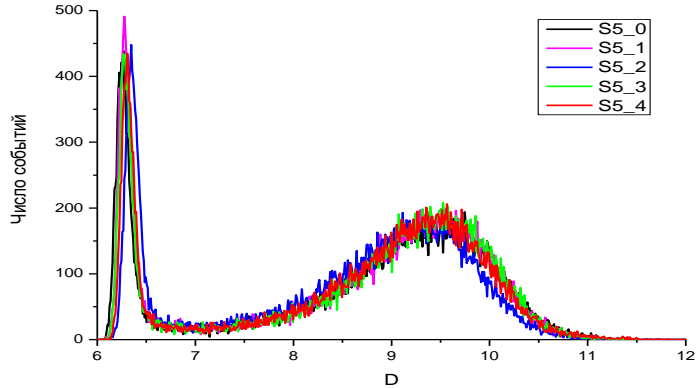


Универсальный разъем для подключения ФП

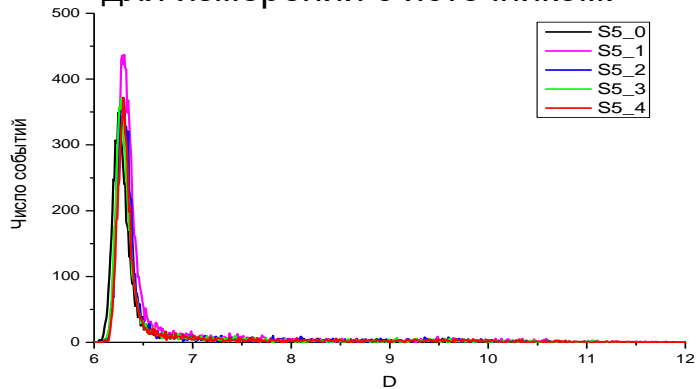


Фотографии готовых модулей

Результаты тестирования модулей



Распределение параметра D для измерений с источником.



Распределение параметра D для измерений без источника.

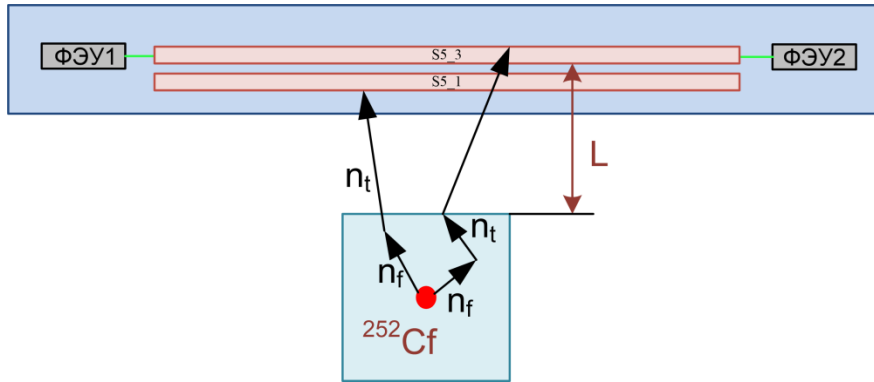
		N_1, c^{-1}	N_2, c^{-1}	N, c^{-1}	$N_{\text{noise}}, \text{c}^{-1}$
S5_0	C	2.82	2.84	2.74	0.70
	ns	0.09	0.10	0.04	0.56
S5_1	C	2.88	2.92	2.81	0.75
	ns	0.12	0.14	0.06	0.73
S5_2	C	2.82	2.88	2.76	0.68
	ns	0.09	0.12	0.05	0.56
S5_3	C	2.93	2.95	2.86	0.67
	ns	0.09	0.10	0.04	0.54
S5_4	C	2.89	2.93	2.83	0.63
	ns	0.09	0.10	0.05	0.50
<S>	C	2.87 ± 0.05	2.90 ± 0.04	2.80 ± 0.05	0.69 ± 0.04
	ns	0.09 ± 0.01	0.11 ± 0.02	0.05 ± 0.01	0.58 ± 0.09

Хорошее разделение сигналов.

Одинаковый параметр отбора нейтронов ($D \geq 7$).

Одинаковая скорость счета нейтронов.

Оценка эффективности захвата нейтронов



Для оценки эффективности захвата нейтронов были проведены измерения с одним и двумя модулями.

$$\frac{N_{S5_3} - N_{S5_3 + S5_1}}{N_{S5_3}} \times 100\%$$

Эффективность захвата нейтронов составила:

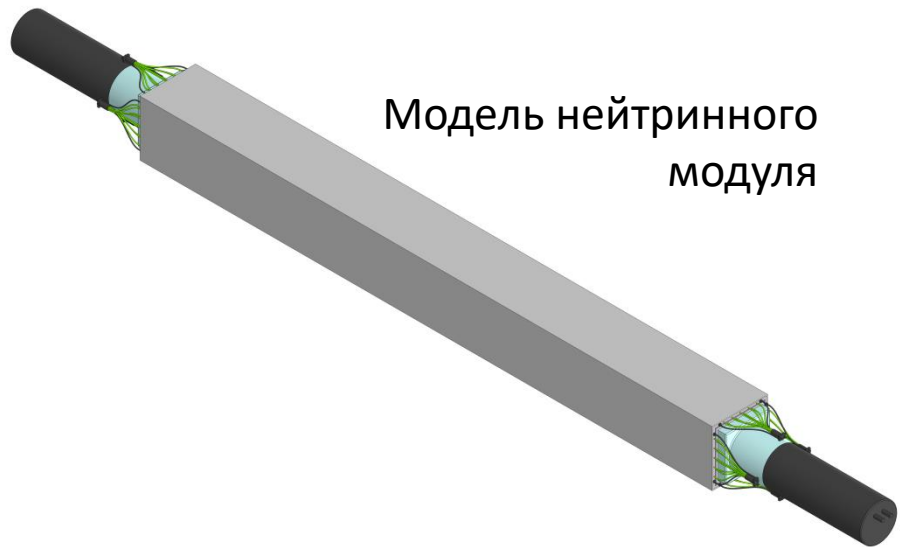
для 10 см - 39%;

для 20 см - 37%.

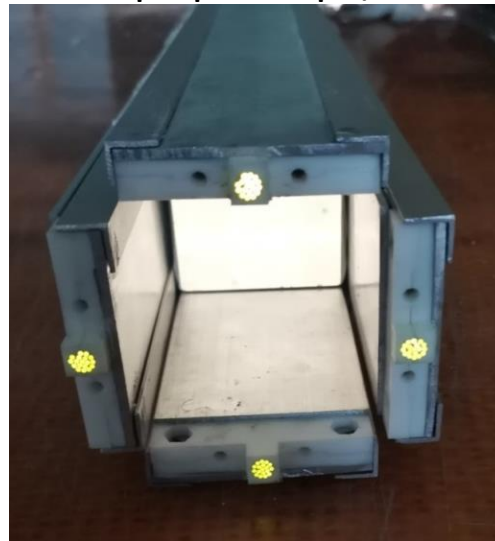
№	L, см	$N_1, \text{с}^{-1}$	$N_2, \text{с}^{-1}$	$N, \text{с}^{-1}$	$N_{\text{noise}}, \text{с}^{-1}$
S5_3	10	1.47	1.49	1.42	0.52
S5_3 + S5_1		0.91	0.97	0.86	0.62
S5_3	20	1.08	1.08	1.01	0.64
S5_3 + S5_1		0.67	0.73	0.63	0.55

Пример модуля для нейтринного детектора

Фотография торца нейтринного модуля



Модель нейтринного модуля



Фотография опытного образца нейтринного модуля



Заключение:

Разработан нейтронный модуль на основе сцинтилляционной композиции $\text{ZnS}(\text{Ag})+\text{B}_2\text{O}_3$ с волоконно-оптическим светосбором для нейтринного детектора:

- Плоская конструкция;
- Высокая однородность;
- Подавление шумов за счет применения двух фотоприемников;
- Возможность выделения сигналов, вызванных захватом нейтронов.

Работа выполнена при поддержке гранта «Нейтринные детекторы для дистанционного контроля ядерных реакторов и астрофизических установок» (госзадание проект № FSWU-2022-0018)

Спасибо за внимание.