



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований

# Семинар «Гетерогенный сцинтиллятор на основе литиевого стекла для регистрации тепловых нейтронов»

Е. С. Кузьмин, И. Ю. Зимин, В. Л. Малышев, Н. А. Кучинский  
*Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Дзелепова*

Г. Д. Бокучава, А. А. Круглов  
*Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка*



Целью данной работы является разработка гетерогенного (композитного) сцинтиллятора для регистрации тепловых нейтронов\* на основе литиевого стекла с выбором оптимальной структуры, позволяющей минимизировать гамма-чувствительность детектора при сохранении высокой эффективности к нейтронам.

Использование данного детектора возможно в различных дисциплинах, включая фундаментальные исследования, эксперименты в физике частиц и в ядерной физике с нейтроном в конечном состоянии, для создания аппаратуры контроля за перемещением делящихся материалов, для задач радиографии и нейтронографии.

\*Тепловые нейтроны — свободные нейтроны, кинетическая энергия которых имеет распределение Максвелла-Больцмана со средней температурой 0,025 эВ.

# Детекторы нейтронов



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелеева



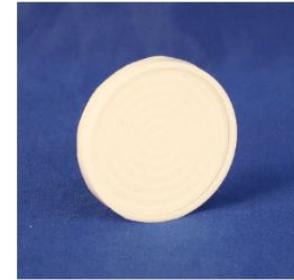
Объединенный  
институт ядерных  
исследований



Пропорциональные счетчики на  
основе  $^3\text{He}$



Пропорциональные счетчики на  
основе  $\text{BF}_3$



EJ-420 ( $^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ )

	Гамма - чувствительность	Эффективность регистрации нейтронов при толщине	Быстрая компонента	Загрузочная способность	Послесвечение
Гетерогенный сцинтиллятор	$10^{-6}$	55%, 2 мм	15 нс	$2 \cdot 10^6$	500 нс
Литиевое стекло NE 912	$10^{-4}$	91%, 2 мм	15 нс	$2 \cdot 10^6$	500 нс
EJ-420 ( $^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ )	$10^{-7}$	55%, 6,5 мм	200 нс	$10^5$	до 10 мкс
EJ-426 ( $^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ )	$10^{-7}$	31%, 0,5 мм	200 нс	$10^5$	до 10 мкс



## Достоинства:

- Высокая эффективность регистрации нейтронов, вызванная высоким содержанием  ${}^6\text{Li}$  (~9%) 91% при толщине 2 мм;
- Хорошая прозрачность по сравнению с  ${}^6\text{LiF/ZnS(Ag)}$ ;
- Малое время высвечивания (50-60 нс);

## Недостаток:

- Достаточно высокий уровень чувствительности к  $\gamma$ -квантам ( $10^{-4}$ ).

В данной работе использовалось литиевое стекло NE 912 [1].

- Плотность 2,4 г/см<sup>3</sup>
- Коэффициент преломления 1,55
- Максимум длины излучения 397 нм
- Световыход для электрона 3257 фотонов/МэВ [2]
- Сечение захвата тепловых нейтронов  ${}^6\text{Li}$  945 барн
- Квенчинг-фактор 0,32 [3]

Химический состав литиевого стекла NE 912

	$\text{SiO}_2$	$\text{Ce}_2\text{O}_3$	$\text{Li}_2\text{O}$
Доля, %	74,7	4,6	20,7

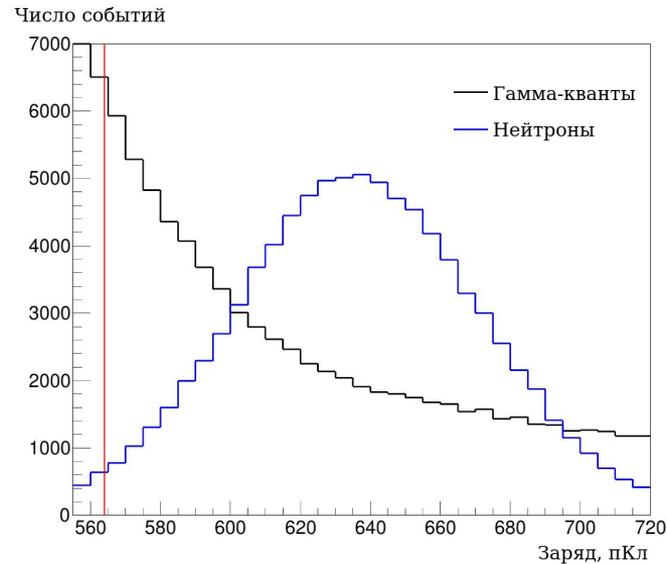
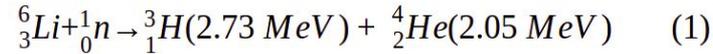
# Регистрация нейтронов и гамма-квантов



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований



Спектры сигналов от  ${}^{60}\text{Co}$  и тепловых нейтронов в детекторе на основе литиевого стекла. Поток гамма-квантов превосходит нейтронный на  $10^4$

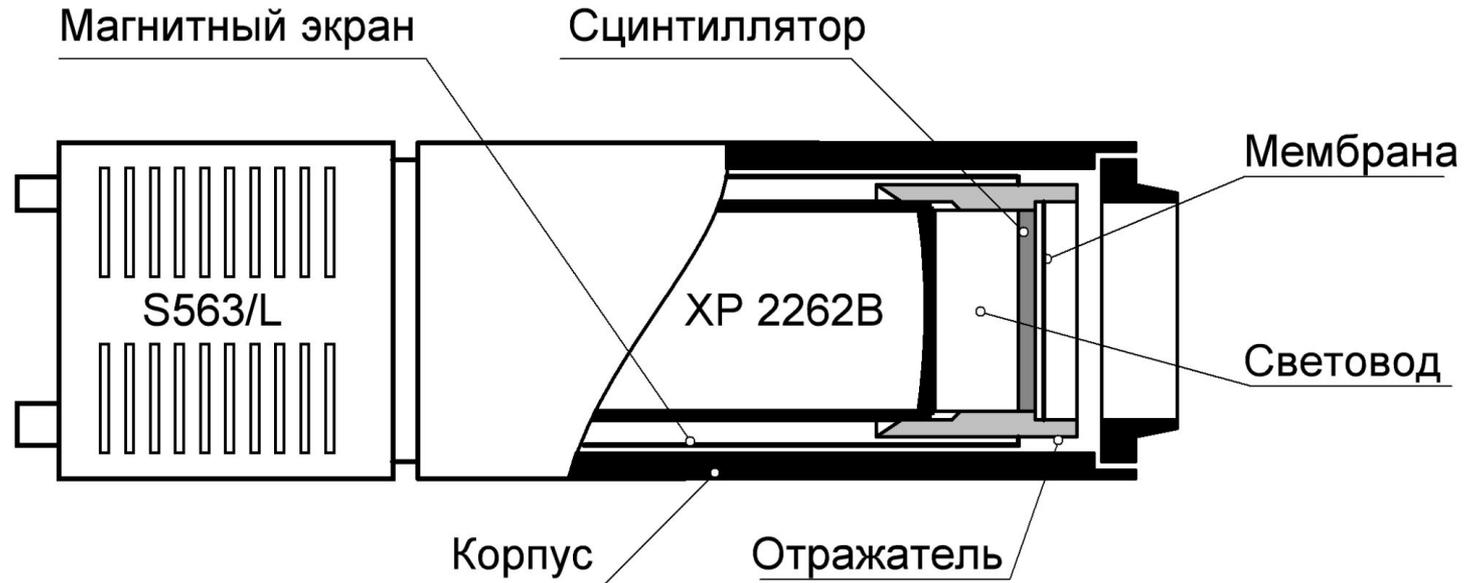
# Схема детектора



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований



Материал отражателя — фторопласт, световод изготовлен из оргстекла. Корпус детектора стальной. Материал магнитного экрана — мю-металл. Мембрана — алюминий.

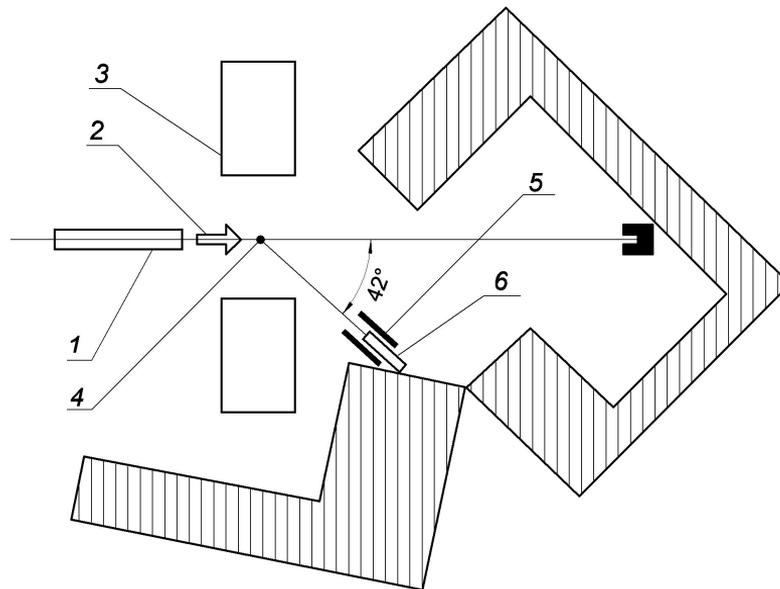
# Измерения на нейтронном пучке



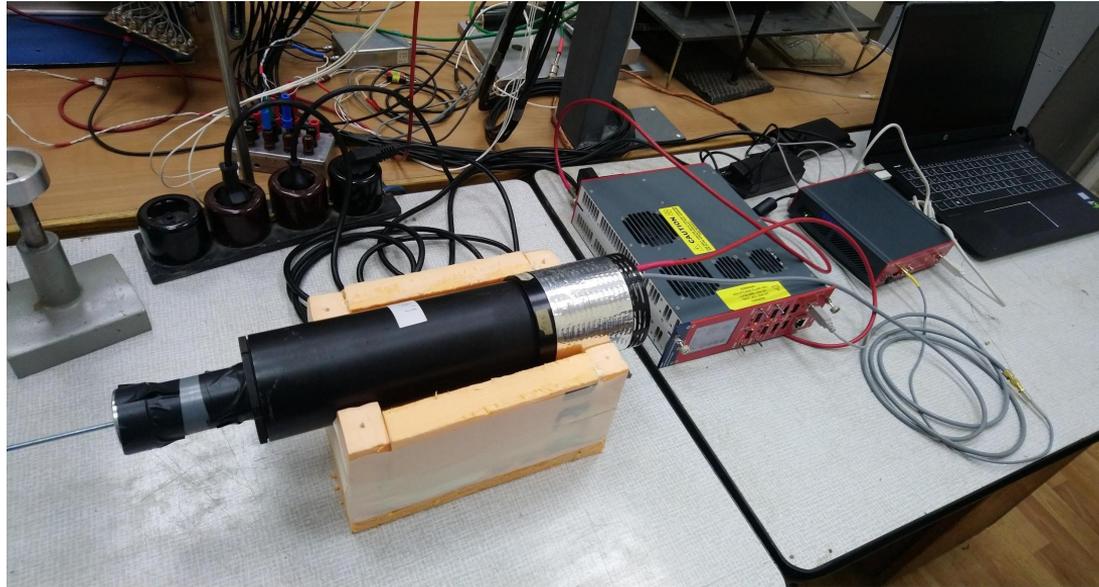
Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелпова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований



1 – нейтронотод; 2 – пучок тепловых нейтронов; 3 – вспомогательное оборудование; 4 – рассеиватель из реакторного графита; 5 – защита детектора; 6 – детектор.



На данном этапе измерений радиоактивный источник  $^{60}\text{Co}$  (46,3 кБк) располагался на расстоянии 16 мм от сцинтиллятора.

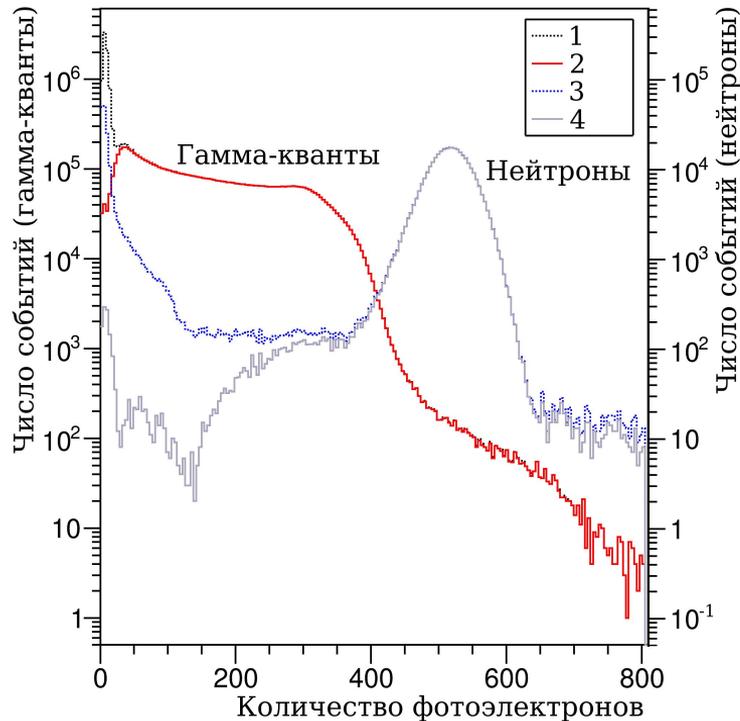
# Спектры сигналов от $^{60}\text{Co}$ и тепловых нейтронов



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований



- 1 -  $\gamma$ -кванты исходные данные;
- 2 -  $\gamma$ -кванты обработка;
- 3 - Нейтроны исходные данные;
- 4 - Нейтроны обработка.

Отбор событий осуществлялся:

- По базовой линии. Исключались события, когда регистрируемый импульс накладывался на послесвечение предыдущего.
- По положению пика импульса сигнала. Отбирались события, при которых импульс не был сильно смещен относительно триггера.
- По форме импульса. Проводилось различение импульсов сигналов сцинтиллятора от шумов ФЭУ.

Количество нейтронов упавших на образец  $3,6 \cdot 10^5$  и  $2,5 \cdot 10^5$  гамма-квантов.

# Характеристики высвечивания сцинтиллятора



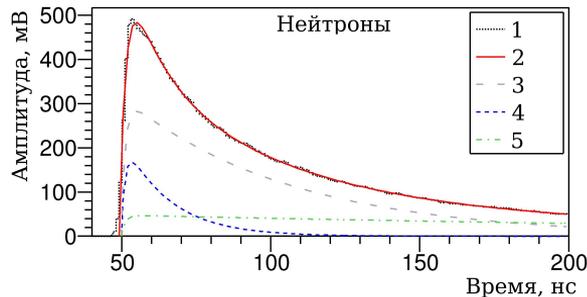
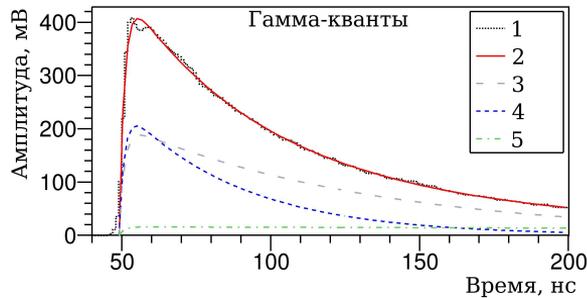
Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований

$$L = A \{ \exp[-\theta(t-t_0)] - \exp[-\lambda_1(t-t_0)] \} + B \{ \exp[-\theta(t-t_0)] - \exp[-\lambda_2(t-t_0)] \} + C \{ \exp[-\theta(t-t_0)] - \exp[-\lambda_3(t-t_0)] \} \quad (2)$$

где  $\lambda = 1/\tau$  – постоянная высвечивания сцинтиллятора,  $\lambda_1$  – быстрая компонента,  $\lambda_2$  – медленная компонента,  $\lambda_3$  – послесвечение.  $\theta$  – постоянная времени анода;  $t_0$  – время начала импульса;  $A$ ,  $B$  и  $C$  – амплитуды компонент высвечивания.



γ-кванты			
Номер компоненты	1	2	3
Амплитуда, нс (Эксперимент)	0,54	0,43	0,03
Время высвечивания, нс (эксперимент)	40	84	867
Нейтроны			
Номер компоненты	1	2	3
Амплитуда (эксперимент)	0,39	0,53	0,08
Время высвечивания, нс (эксперимент)	15	56	303
Время высвечивания, нс (данные от производителя) [7]	18	55	

1 – усредненная форма зарегистрированных импульсов; 2 – результат аппроксимации по формуле (2); 3 – медленная компонента высвечивания; 4 – быстрая компонента высвечивания; 5 – послесвечение.

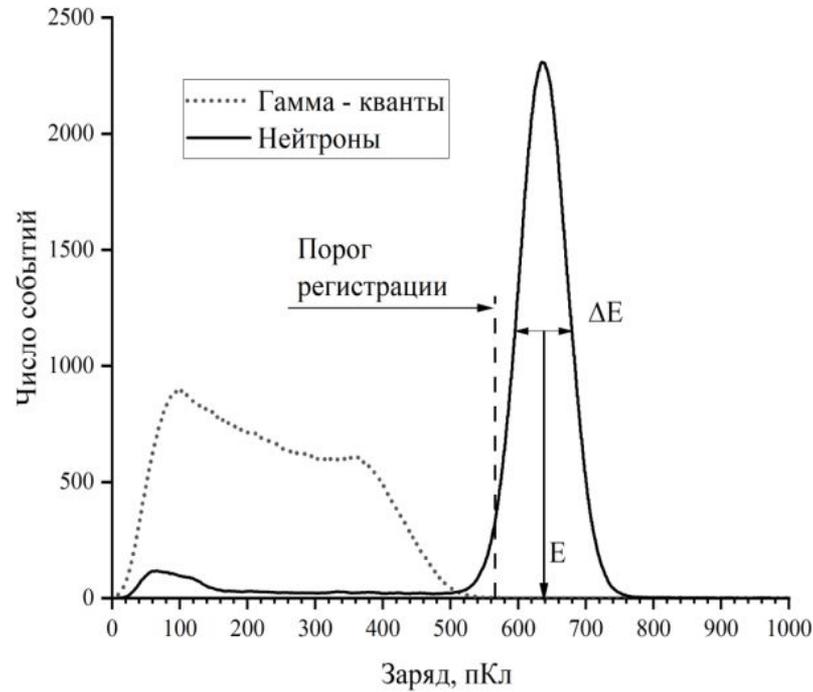
# Селекция на постоянном порого



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелеева



Объединенный  
институт ядерных  
исследований



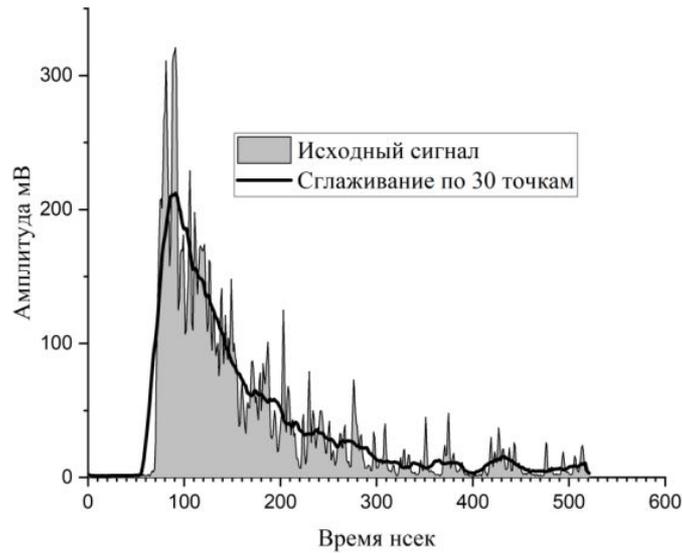
# Селекция по длительности импульса



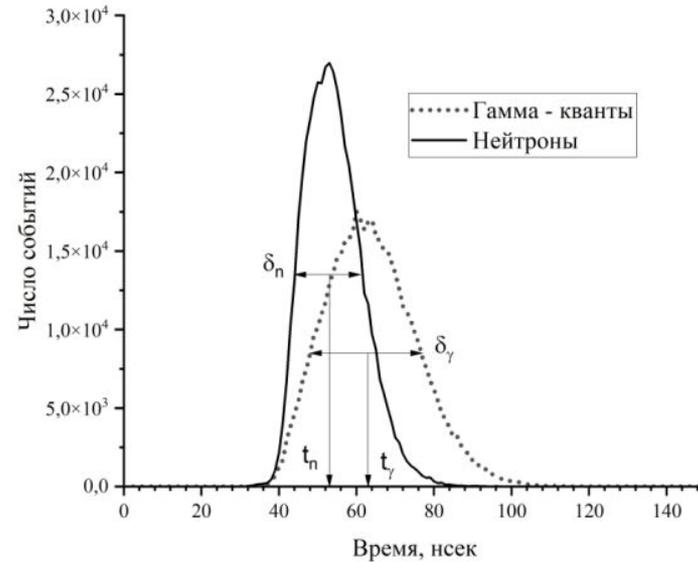
Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований



Исходный и сглаженный по 30 точкам сигналы от  $\gamma$ -квантов.



Распределение сигналов от нейтронов и гамма-квантов по ширине на половине высоты импульса

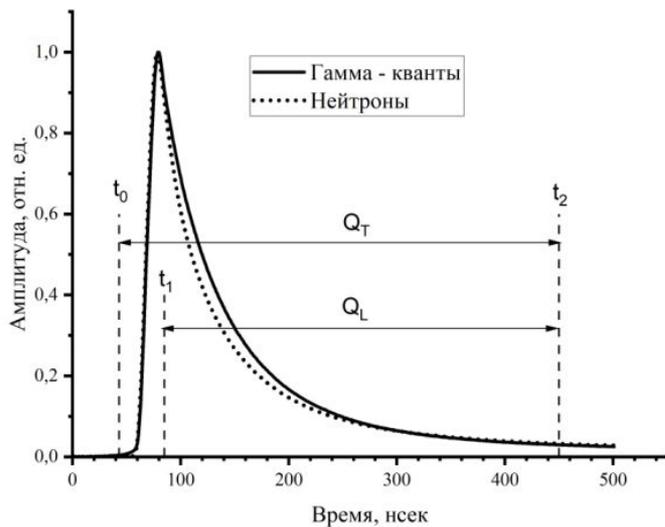
# Разделение методом интегрирования заряда



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелепова

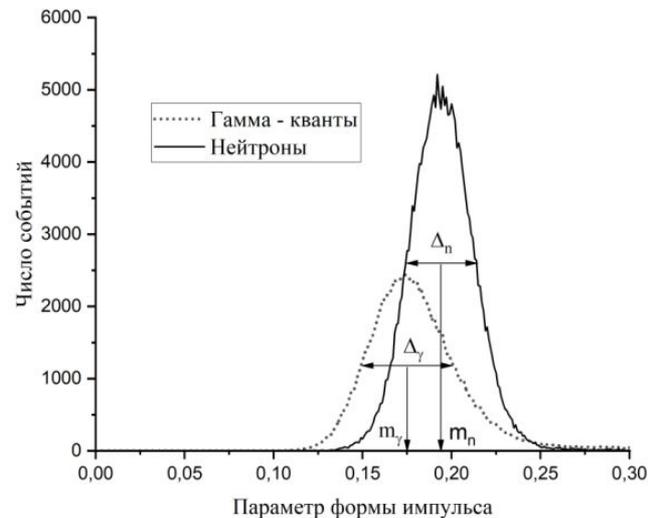


Объединенный  
институт ядерных  
исследований



Усредненные сигналы для нейтронов  
и гамма-квантов.

$$PSP = \frac{Q_T - Q_L}{Q_T}$$



Распределения импульсов по значению  
параметра PSP для нейтронов и гамма-  
квантов.

# Сравнение методов разделения нейтронов и гамма-квантов



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований

Гамма-чувствительность детектора при различных значениях электронной эффективности к нейтронам.  
Гомогенный сцинтиллятор.

Электронная эффективность к нейтронам	97%	~50%
Регистрация на постоянном пороге	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
Селекция по длительности	0,9	0,18
Селекция по форме импульса	0,94	0,3

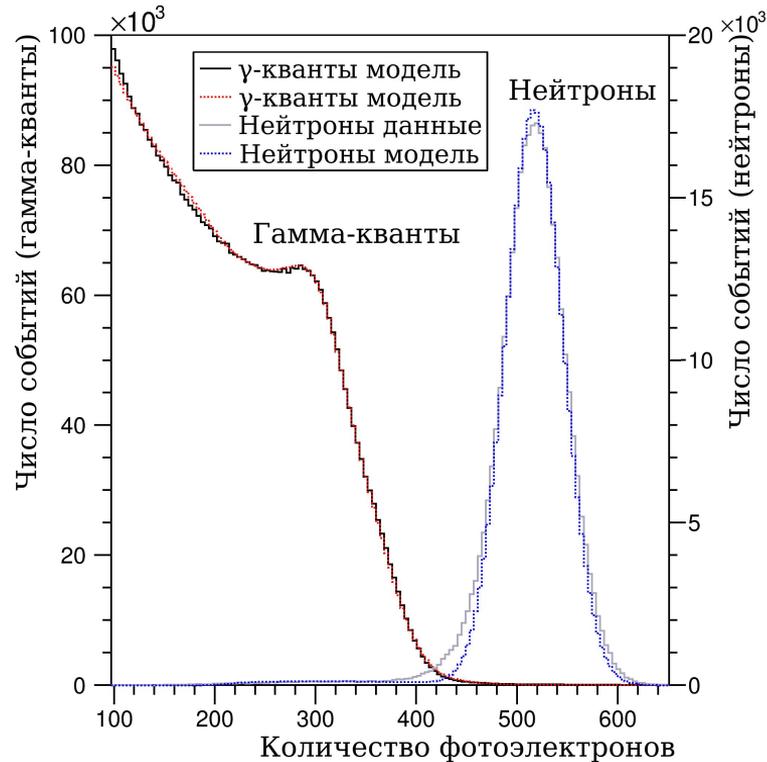
# Моделирование спектров событий от $\gamma$ -квантов и нейтронов (Geant4)



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований



Из статьи [8] известно, что световойход при регистрации гамма-квантов  $L_n = 3257$  фотонов/МэВ.

С помощью моделирования, путем варьирования световыхода сцинтиллятора, был определен световойход при регистрации нейтронов  $L_n = 1048$  фотонов/МэВ.

Также вычислен усредненный квенчинг-фактор  $QF = 0,32$ , который рассчитывается как отношение световыхода при регистрации нейтрона к световыходу при регистрации гамма-кванта.

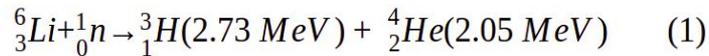
# Гетерогенный СЦИНТИЛЛЯТОР



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова

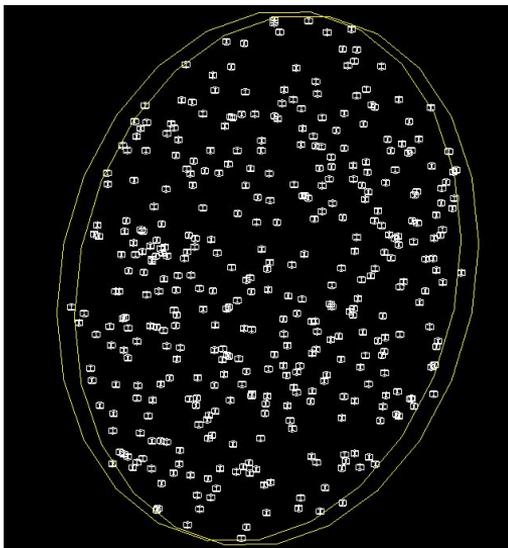


Объединенный  
институт ядерных  
исследований

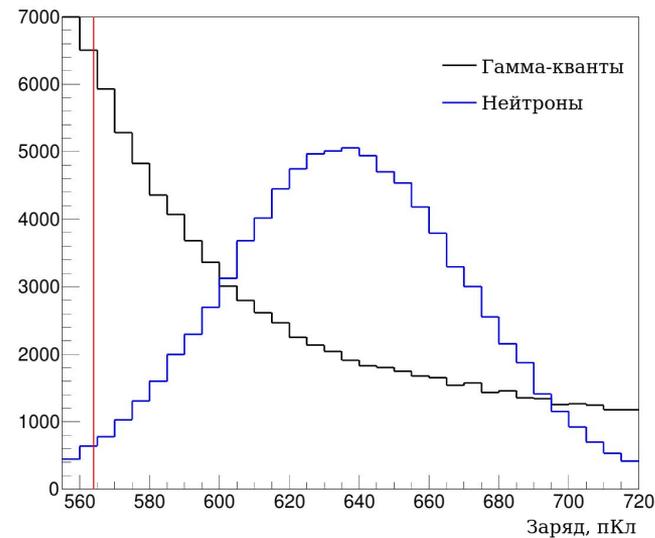


$R_\alpha = 6 \text{ мкм}$ ,  $R_t = 36 \text{ мкм}$

$R_e \sim 2 \text{ мм}$



Число событий



Спектры сигналов от  ${}^{60}\text{Co}$  и тепловых нейтронов в  
детекторе на основе литиевого стекла  
(экспериментальные данные!)

# Структура гетерогенного сцинтиллятора



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелеева



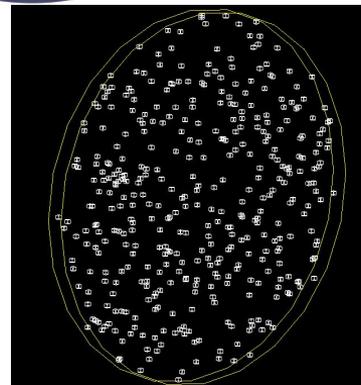
Объединенный  
институт ядерных  
исследований

Математические модели гетерогенных сцинтилляторов создавались в форме диска с диаметром 40 мм и толщиной 2 мм.

Фрагменты имели форму кубиков из литиевого стекла NE 912. Расчеты проводились для кубиков с размерами граней от 200 до 800 мкм с шагом 100 мкм. Были рассмотрены различные концентрации литиевого стекла от 20 до 35% по отношению к общему объему гетерогенного сцинтиллятора.

В таблице приведены характеристики оптических компаундов.

Моделирование производилось только на уровне энерговыделения.



Вещество	Атомный состав	Плотность (г/см <sup>3</sup> )
Силиконовый компаунд	$C_2H_6SiO$	1,02
Акрил	$C_5H_8O_2$	1,16
Эпоксидная смола	$C_{39}H_{52}O_7$	1,2
Литиевое стекло (NE912)	$SiO_2(74,7\%)+Li_2O(20,7\%)+Ce_2O_3(4,6\%)$	2,4

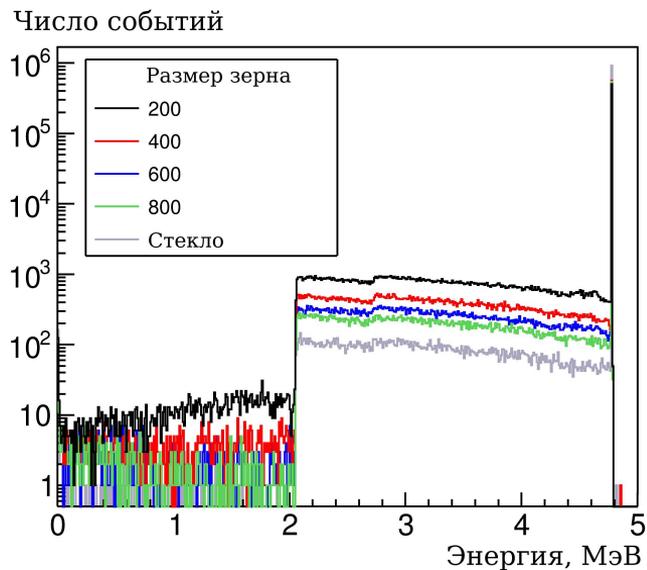
# Сравнение спектров энерговыведения



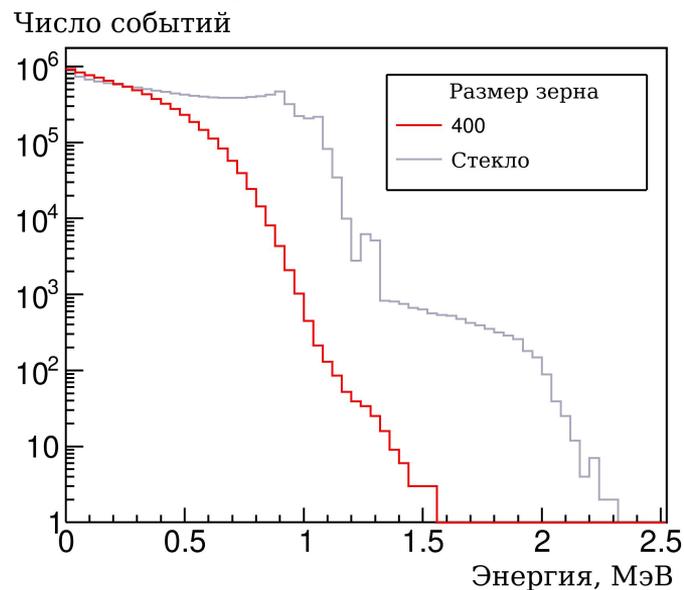
Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований



Нейтроны. Композиты с зернами размером 200, 400, 600 и 800 мкм и концентрацией 35%.



Гамма-кванты от источника  $^{60}\text{Co}$ . Композиты с зернами размером 400 мкм и концентрацией 35%.

$$T_{\text{еe}} = T_n \cdot QF = 4,78 \cdot 0,32 = 1,53 \text{ MeV}$$

# Результаты моделирования

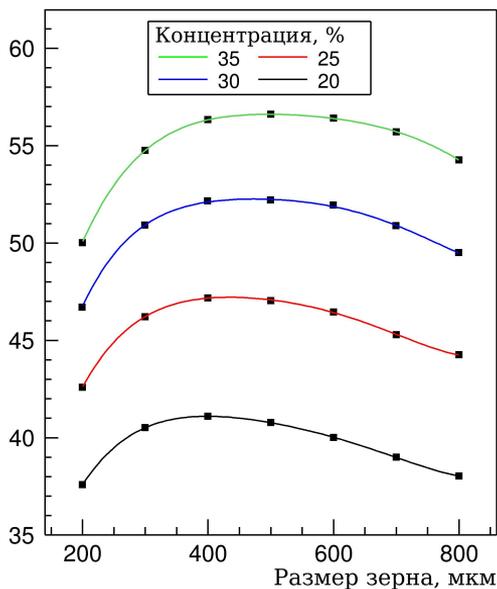


Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелепова



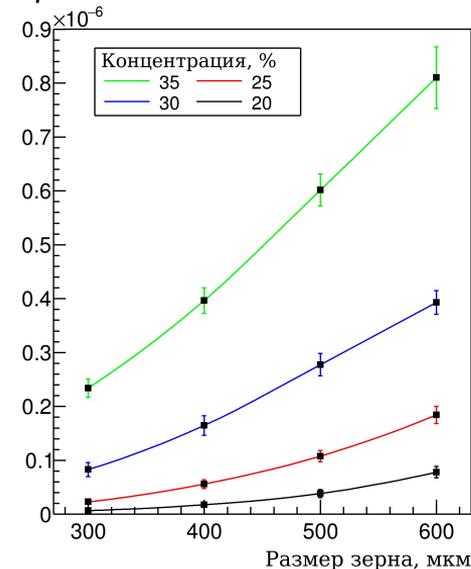
Объединенный  
институт ядерных  
исследований

Эффективность регистрации  
нейтронов, %



Зависимости эффективности регистрации нейтронов композитного сцинтиллятора от размера зерен при различных концентрациях стеклянного сцинтиллятора.

Чувствительность  
к  $\gamma$ -квантам



Зависимости чувствительности к  $\gamma$ -квантам композитного сцинтиллятора от размера зерен при различных концентрациях стеклянного сцинтиллятора. Порог регистрации 1,22 МэВ.

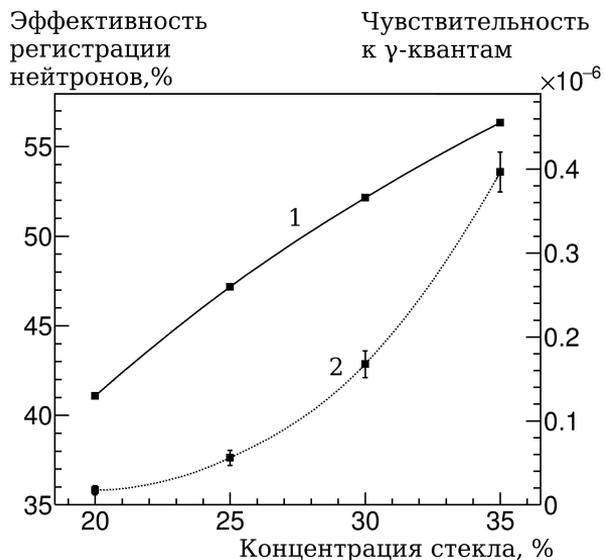
# Результаты моделирования



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова

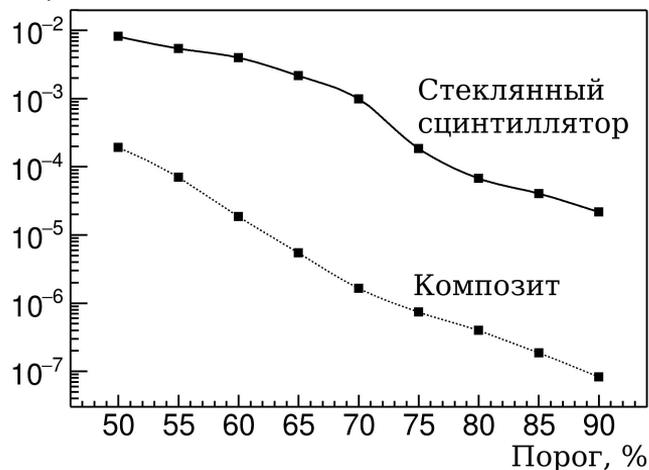


Объединенный  
институт ядерных  
исследований



Эффективность регистрации тепловых нейтронов и  $\gamma$ -чувствительность композитного сцинтиллятора с зернами размером 400 мкм. 1 - эффективность регистрации тепловых нейтронов, 2 - чувствительность к  $\gamma$ -квантам.

Чувствительность к  $\gamma$ -квантам



Зависимости  $\gamma$ -чувствительности от уровня порога регистрации для стеклянного сцинтиллятора и композита с размером зерен 400 мкм и их концентрации 35%.

# Сравнение оптических материалов



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Делепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований

Материал	Эффективность к нейтронам, %	Гамма-чувствительность
Силиконовый компаунд	$56,1 \pm 0,2$	$(6,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$
Акрил	$56,3 \pm 0,2$	$(4,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-7}$
Эпоксидная смола	$56,4 \pm 0,2$	$(4,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-7}$
Стекланный сцинтиллятор	$91,5 \pm 0,1$	$(7,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$

Композит имел размер зерен 400 мкм и их концентрацию 35%.

# Структура композитного сцинтиллятора



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



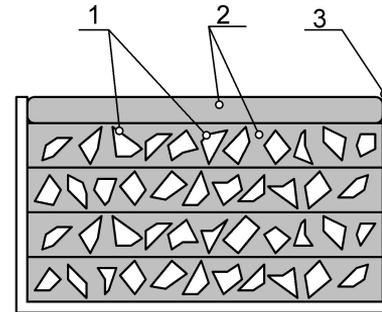
Объединенный  
институт ядерных  
исследований

Сцинтиллятор имел форму диска Ø40 и толщиной 2 мм.  
Виды компаундов представлены в таблице. Из каждого из них  
были изготовлены композитные сцинтилляторы с  
концентрациями 25, 30 и 35%.

В итоге было получено 9 композитов + монолитное стекло.

Каждый из них был изготовлен в пластиковой кювете путем  
последовательной заливки.

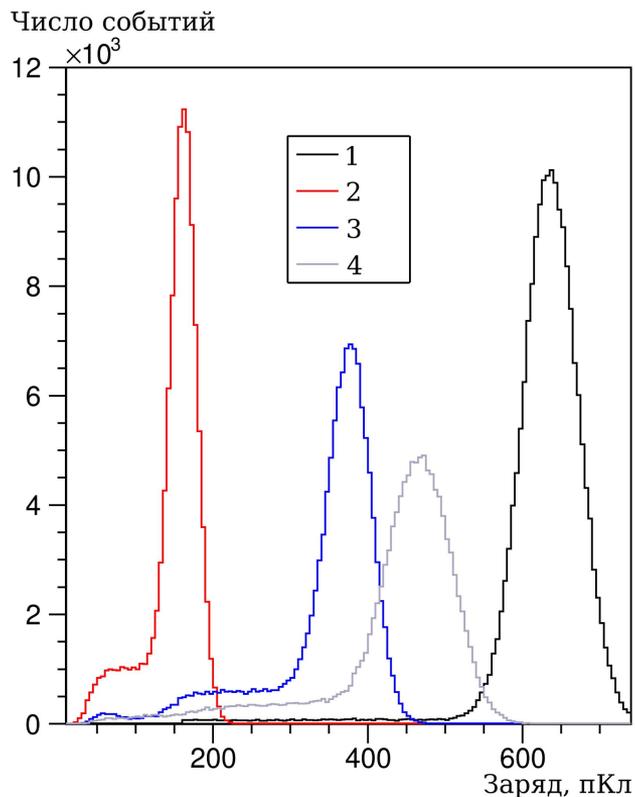
Вещество	Атомный состав	Плотность (г/см <sup>3</sup> )
Силиконовый компаунд	$C_2H_6SiO$	1,02
Акриловая смола	$C_5H_8O_2$	1,16
Эпоксидная смола	$C_{39}H_{52}O_7$	1,2



- 1 — фрагменты стеклянного  
сцинтиллятора;  
2 — полимер; 3 — корпус  
кюветы



Гетерогенный  
сцинтиллятор.  
Содержание  
сцинтиллятора 35%.  
Компаунд Силикон



## Спектры сигналов, зарегистрированных на пучке тепловых нейтронов от образцов гетерогенных сцинтилляторов с концентрацией фрагментов стекла 30%

Вид компаунда: 1 - монолитное стекло; 2 - акриловая смола; 3 - эпоксидная смола; 4 - силиконовый компаунд.

Отбор событий осуществлялся:

- По базовой линии. Исключались события, когда регистрируемый импульс накладывался на послесвечение предыдущего.
- По положению пика импульса сигнала. Отбирались события, при которых импульс не был сильно смещен относительно триггера.
- По форме импульса. Проводилось различение импульсов сигналов сцинтиллятора от шумов ФЭУ.

# Испытания образцов на тепловых нейтронах

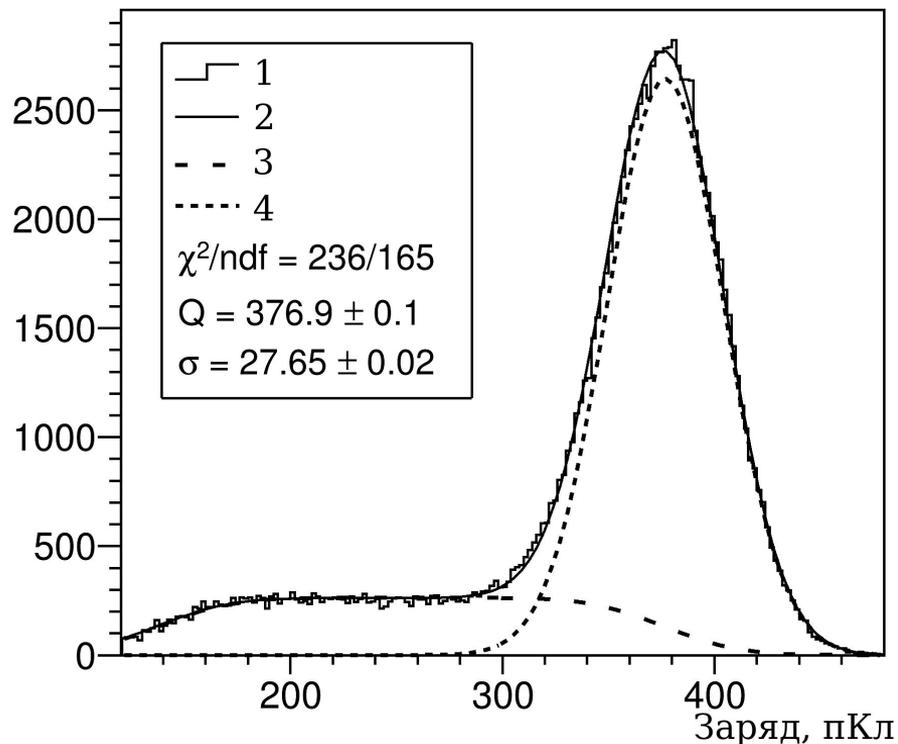


Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований

Число событий



Спектр сигналов, зарегистрированных на пучке тепловых нейтронов от образца гетерогенного сцинтиллятора с концентрацией фрагментов стекла 30%.  
Нейтральное связующее – эпоксидная смола

1 – данные измерений;  
2 – результат аппроксимации;  
3 – распределение зарядов от событий с полным энерговыведением в стеклянном сцинтилляторе;  
4 – распределение зарядов от событий с неполным энерговыведением в стеклянном сцинтилляторе.



## Эффективность регистрации нейтронов по отношению к эффективности стеклянного сцинтиллятора

	Модель	Эпоксидная смола	Силиконовый компаунд	Акриловая смола
25%	$51,6 \pm 0,2\%$	$52,0 \pm 0,5$	$53,4 \pm 0,6$	$46,3 \pm 0,5$
30%	$57,0 \pm 0,2\%$	$57,2 \pm 0,6$	$56,5 \pm 0,6$	$56,4 \pm 0,6$
35%	$61,5 \pm 0,2\%$	$60,6 \pm 0,6$	$61,6 \pm 0,6$	$62,8 \pm 0,6$

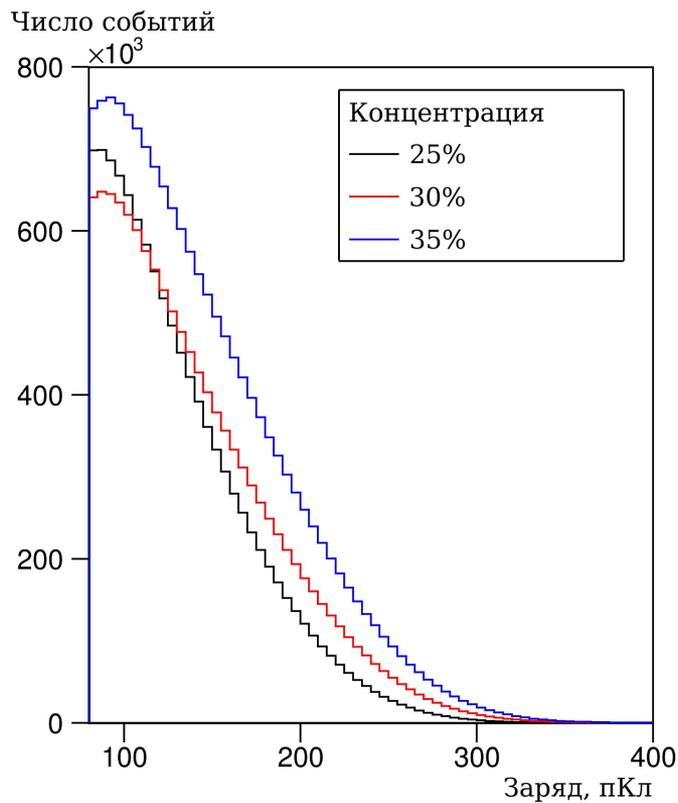
# Испытания образцов на $\gamma$ -квантах



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелеева



Объединенный  
институт ядерных  
исследований



Спектры событий, зарегистрированных от источника  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  для образцов гетерогенных сцинтилляторов с различной концентрацией фрагментов стекла. Нейтральное связующее — эпоксидная смола.



## Гамма-чувствительность по сравнению со стеклянным сцинтиллятором

Для монолитного стекла гамма-чувствительность  $(1,42 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$ .

	Эпоксидная смола	Силиконовый компаунд	Акриловая смола
25%	$(9,25 \pm 0,13) \cdot 10^{-6}$	$(1,35 \pm 0,11) \cdot 10^{-6}$	$(0,53 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$
30%	$(13,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$	$(2,65 \pm 0,08) \cdot 10^{-6}$	$(6,04 \pm 0,08) \cdot 10^{-6}$
35%	$(22,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$	$(4,90 \pm 0,13) \cdot 10^{-6}$	$(13,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$



- Уточнены характеристики литиевого стекла NE 912: световыход при захвате нейтрона (1048 фотонов/МэВ), усредненный для продуктов реакции захвата нейтрона квенчинг-фактор (0,32), временные параметры высвечивания.
- С помощью Монте-Карло модели найдена оптимальная область параметров структуры композита, при которых достигаются лучшие характеристики сцинтиллятора.
- Созданы образцы композитных сцинтилляторов, с уровнем нейтрон/гамма-дискриминации на 2 порядка лучше, чем у гомогенного литиевого стекла.
- Было показано, что для данного сцинтиллятора создание композитной структуры является лучшим методом для нейтрон/гамма-дискриминации по сравнению с методами электронной селекции сигналов.



- 1) Spowart A. R. Neutron scintillating glasses: part II // Nucl. Instrum. and Methods.. 1977. №140. С. 19-28.
- 2) Dalton A.W. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 254 (1987) 361–366.
- 3) Kuzmin E. S., Bokuchava G. D., Zimin I. Yu., Kruglov A. A., Kuchinskiy N. A., and Malyshev V. L. Instrum. and Experimental Techniques, 2021, Vol. 64, No. 2, P. 195. DOI: 10.1134/S0020441221010279.
- 4) Absolute calibration and monitoring of a spectrometric channel using a photomultiplier / E.H. Bellamy [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 1994. – Vol. A339. – P. 468-476.
- 5) Test of long scintillation counters for supercollider detectors / E.H. Bellamy [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 1994. – Vol. A334. – P. 484-488.
- 6) Чириков-Зорин И.Е. Развитие методики сцинтилляционных и газоразрядных трековых детекторов для физики высоких энергий: дис. ... канд. физ.-мат. наук. ОИЯИ. Дубна, 2014.
- 7) Fairley E.J. Neutron scintillating glasses part III pulse decay time measurements at room temperature / Fairley E.J., Spowart A.R. // Nuclear Instruments and Methods – 1978. – Vol. 150. – P.159-163.
- 8) Dalton A.W. Light conversion efficiency of small lithium scintillators for electrons, protons, deuterons and alpha particles // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 1987. – Vol. A254. – P. 361-366.

# Публикации автора по теме диссертации



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований

- 1) Монте-Карло модель сцинтилляционного детектора нейтронов на основе литиевого стекла / Е. С. Кузьмин [и др.] // Приборы и техника эксперимента – 2021. – № 2. – С. 25-31.
- 2) Кузьмин Е.С. Оптимизация структуры гетерогенного сцинтиллятора для регистрации тепловых нейтронов / Е.С. Кузьмин, И.Ю. Зимин // Приборы и техника эксперимента – 2021. – № 5. – С. 22-27.
- 3) Изготовление и характеристики композитных сцинтилляторов на основе литиевого стекла / Е. С. Кузьмин [и др.] // Приборы и техника эксперимента – 2022. – № 4. – С. 51-56.
- 4) Сравнительный анализ методов нейтрон – гамма дискриминации для сцинтилляторов на основе литиевого стекла / Е.С Кузьмин [и др.] // Приборы и техника эксперимента – 2024. – № 2.



В заключение я бы хотел выразить искреннюю благодарность и большую признательность своему научному руководителю Кузьмину Е. С. за научное руководство и помощь в формировании меня, как ученого.

Хочу поблагодарить Бокучава Г. Д. и Круглова А. А. за организацию и участие в испытании детекторов на пучке тепловых нейтронов на 13 канале ИБР-2М.

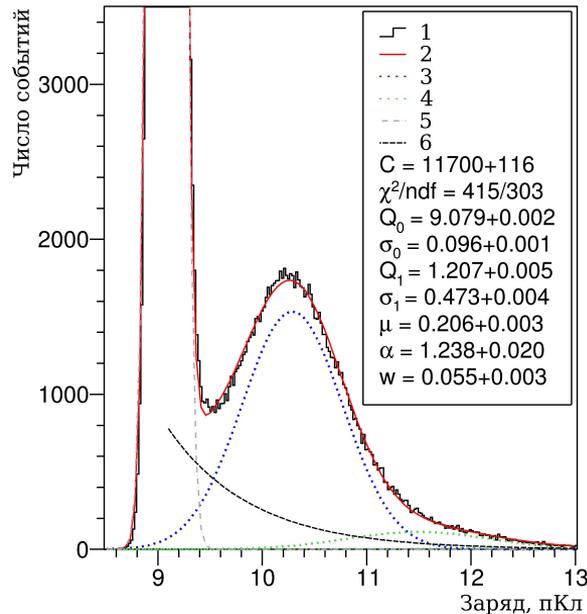
Хочу поблагодарить Малышева В. Л. за организацию испытаний детекторов на гамма-квантах с источником  $^{60}\text{Co}$  и участие в анализе данных.

Хочу поблагодарить Кучинского Н. А. за полезные обсуждения и помощь в решении административных вопросов.

Хочу поблагодарить Гурова Ю. Б. за полезные советы и обсуждения.



$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!} \left\{ \frac{(1-w)}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{(x - nQ_1 - Q_0)^2}{-2\sigma_n^2} \right] + w\theta(x - Q_0)\alpha \exp[-\alpha(x - Q_0)] \right\}. \quad (1)$$



Калибровка ФЭУ проводилась по спектру единичного электрона [4-6], первый момент спектра был определен с точностью 0.4%.

1 - данные измерений; 2 - результат аппроксимации по формуле (1); 3 - распределение зарядов от единичного электрона; 4 - распределение зарядов от 2 и 3 фотоэлектронов; 5 - пьедестал; 6 - фоновые процессы второго типа;

- $Q_0$  - значение пьедестала;
- $\sigma_0$  - стандартное отклонение пьедестала;
- $Q_1$  - математическое ожидание одноэлектронного распределения импульсов;
- $\sigma_1$  - стандартное отклонение одноэлектронного распределения импульсов;
- $\mu$  - среднее количество фотоэлектронов, собранных на первом диоде;
- $\alpha$  - постоянная экспоненты, характеризующей фоновые процессы второго типа.
- $w$  - вероятность сопровождения измеряемого сигнала фоновыми процессами второго типа

# Описание формы импульса сигнала



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелеева



Объединенный  
институт ядерных  
исследований

В нашем случае сцинтиллятор обладает двумя быстрыми компонентами высвечивания и одной медленной компонентой, описывающей послесвечение, следовательно, форма импульса может быть описана суммой трех слагаемых [3]:

$$L = A \{ \exp[-\theta(t-t_0)] - \exp[-\lambda_1(t-t_0)] \} + B \{ \exp[-\theta(t-t_0)] - \exp[-\lambda_2(t-t_0)] \} + C \{ \exp[-\theta(t-t_0)] - \exp[-\lambda_3(t-t_0)] \} \quad (2)$$

где  $\lambda = 1/\tau$  – постоянная высвечивания сцинтиллятора,  $\lambda_1$  – быстрая компонента,  $\lambda_2$  – медленная компонента,  $\lambda_3$  – послесвечение.  $\theta$  – постоянная времени анода;  $t_0$  – время начала импульса;  $A$ ,  $B$  и  $C$  – амплитуды компонент высвечивания.

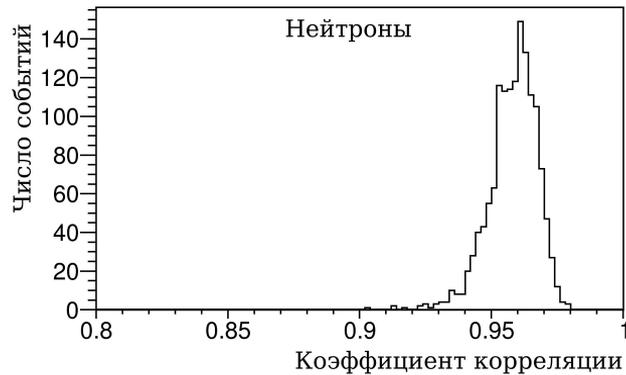
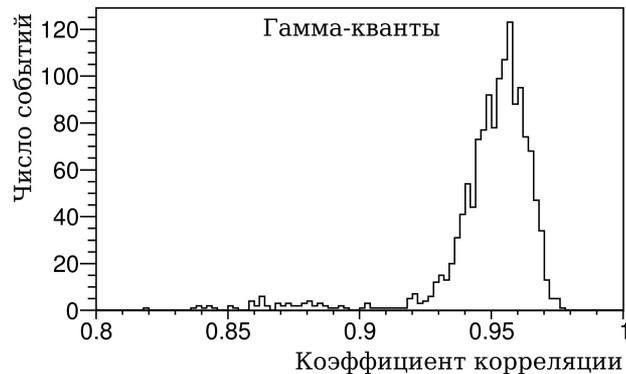
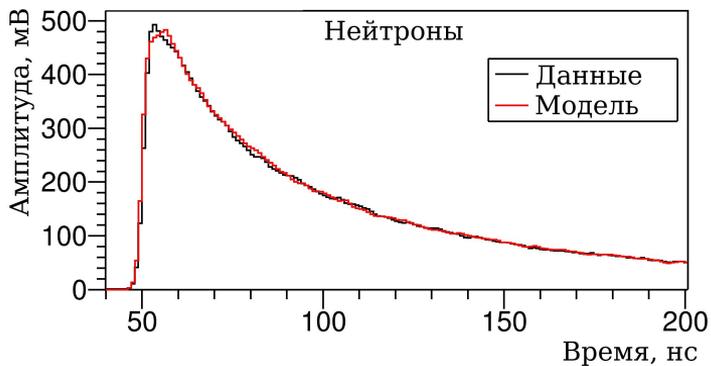
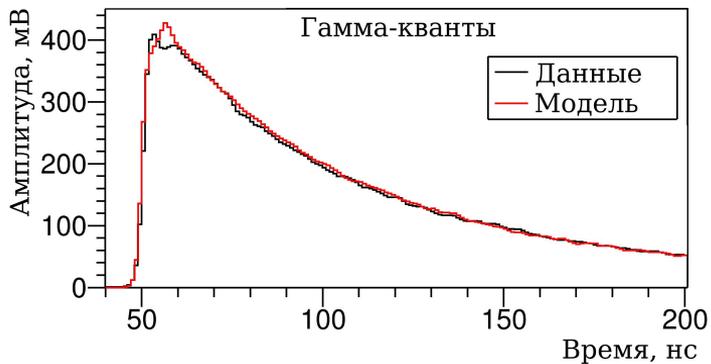
# Моделирование импульсов сигналов от $\gamma$ -квантов и нейтронов



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзельева



Объединенный  
институт ядерных  
исследований



# Результаты аппроксимации экспериментальных спектров



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований

Образец	Среднее значение	Стандартное отклонение	Разрешение
Стекланный сцинтиллятор	635	40,4	0,15
Силиконовый компаунд	446	42,0	0,21
Эпоксидная смола	377	28,2	0,18
Акриловая смола	162	17,1	0,25

# Образцы гетерогенных СЦИНТИЛЛЯТОРОВ



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований

Изготовлено 9 образцов на основе литиевого стекла и с компаундами (акрил, силикон, эпоксидная смола)



Гомогенный  
сцинтиллятор



Гетерогенный  
сцинтиллятор.  
Содержание  
сцинтиллятора 35%.  
Компаунд Силикон



Гетерогенный  
сцинтиллятор.  
Содержание  
сцинтиллятора 35%.  
Компаунд эпоксидная  
смола



Гетерогенный  
сцинтиллятор.  
Содержание  
сцинтиллятора 25%.  
Компаунд силикон

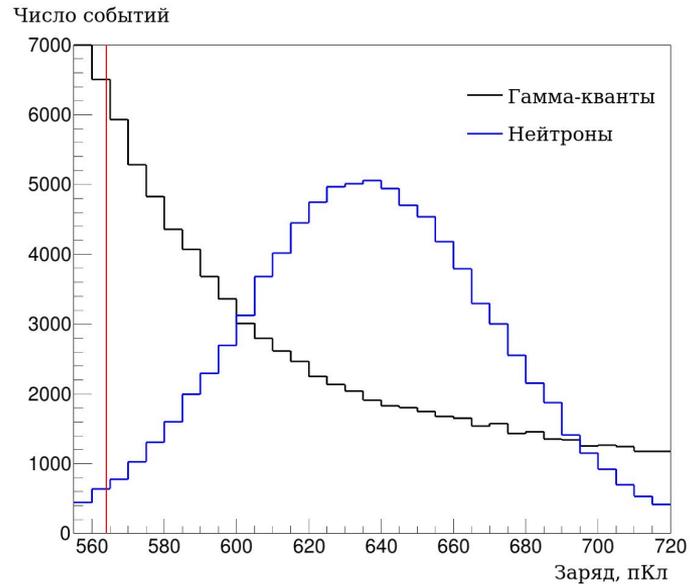
# Спектры энергвыделения нейтронов и гамма-квантов



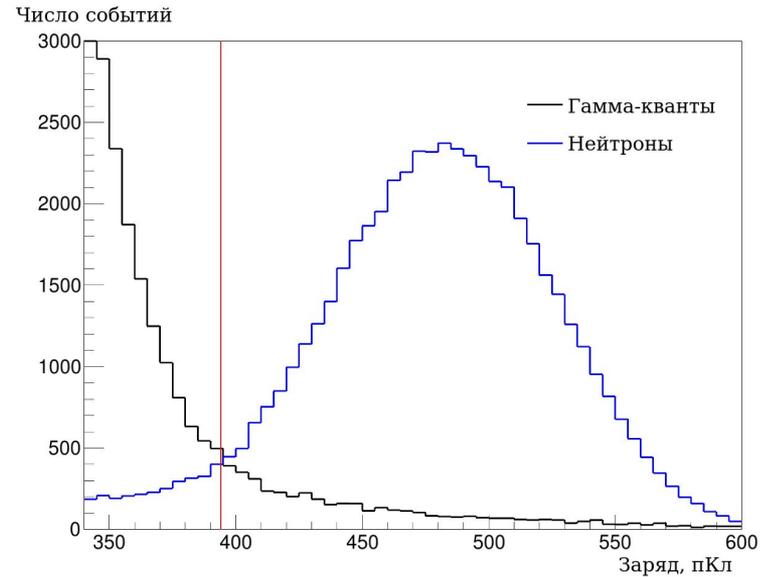
Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелеева



Объединенный  
институт ядерных  
исследований



Гомогенный сцинтиллятор



Гетерогенный сцинтиллятор. Содержание сцинтиллятора 35%. Компонд Силикон

# Испытания образцов на тепловых нейтронах

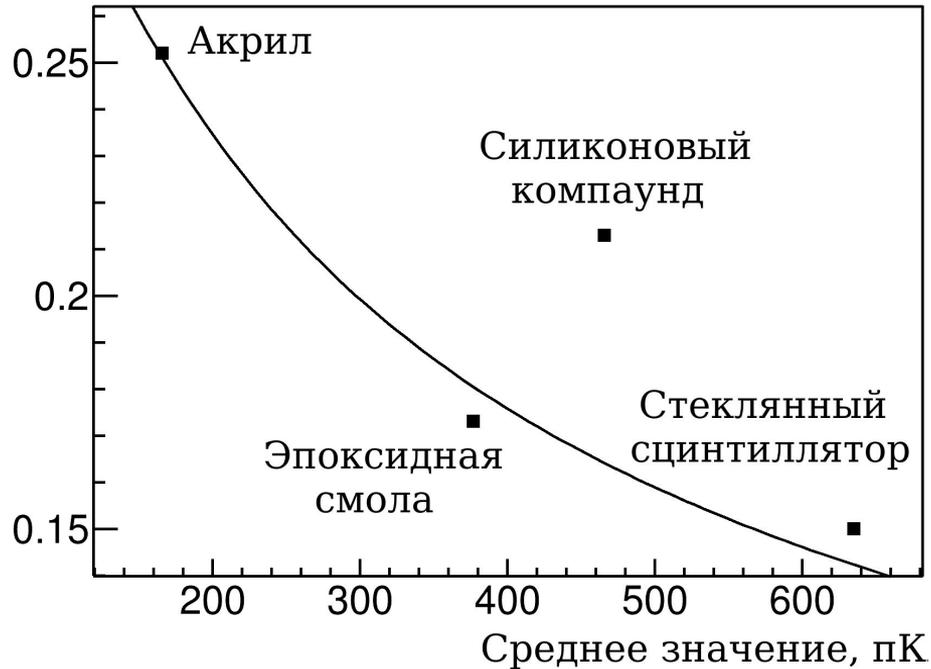


Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелепова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований

Разрешение



Черные точки – соответствуют значениям разрешения нейтронного пика и его среднего значения. Данные приведены для композитных сцинтилляторов с концентрациями 30 %. Линия аппроксимация по формуле [4]:

$$R = \frac{(\alpha + \beta Q)^{1/2}}{Q},$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, а  $Q$  – среднее значение нейтронного пика.