



# «Гетерогенные сцинтилляторы для регистрации тепловых нейтронов на базе литиевых стекол. Структура, возможности, эксперимент.»

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

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



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 сцинтиллятора 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. Джелепова



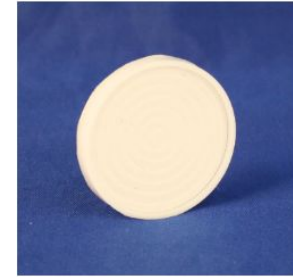
Объединенный  
институт ядерных  
исследований



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  $2,4 \text{ г/см}^3$
- 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

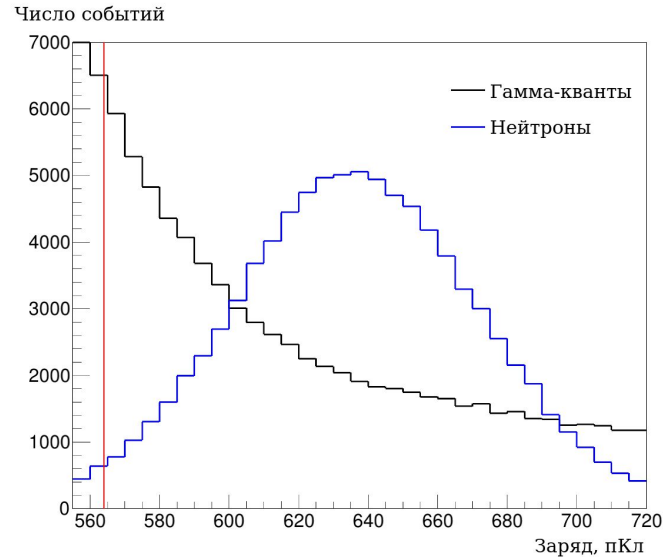
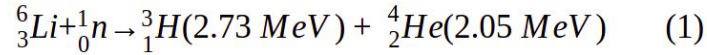
# Регистрация нейтронов и гамма-квантов



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  $10^4$

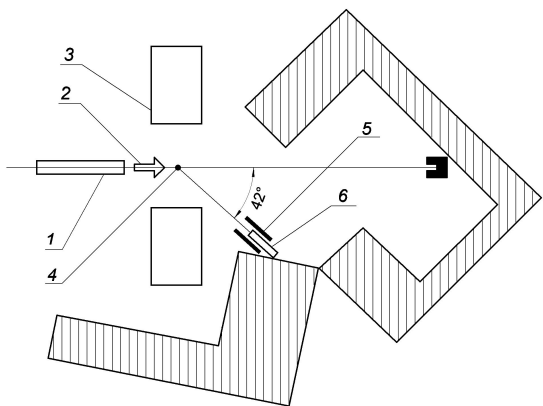
# Спектры сигналов от $^{60}\text{Co}$ и тепловых нейтронов ИБР-2М



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Желепова

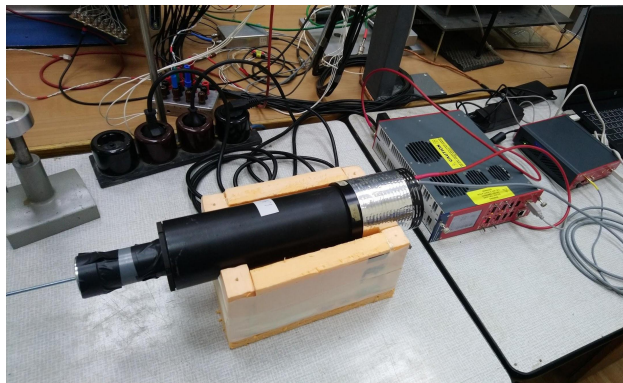


Объединенный  
институт ядерных  
исследований

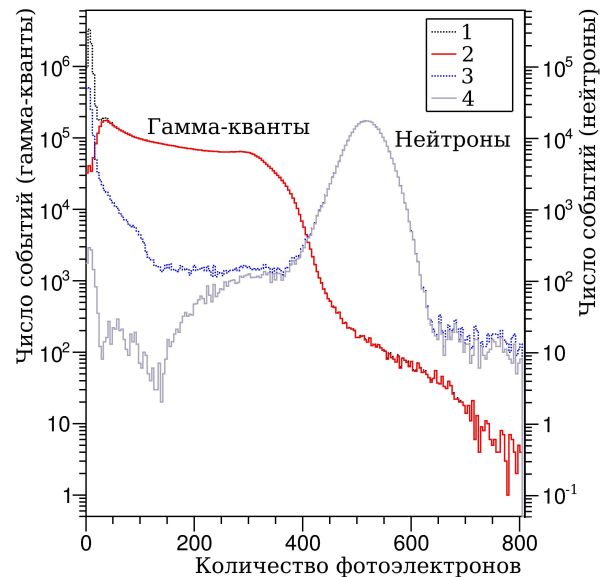


ИБР-2М 13-ый канал.

1 – нейтронпровод; 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 скintиллятора.



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

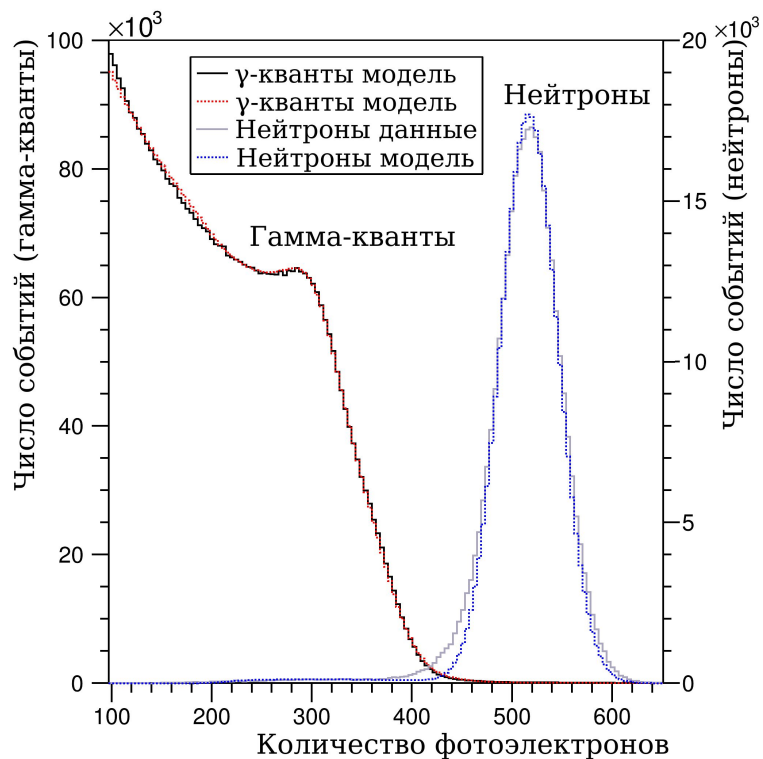
# Моделирование спектров событий от $\gamma$ -квантов и нейтронов (Geant4)



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелеева



Объединенный  
институт ядерных  
исследований



Из статьи [6] известно, что световыход при регистрации электронов  $L_n = 3257$  фотонов/МэВ.

С помощью моделирования, путем варьирования световыхода сцинтиллятора, был определен световыход 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.

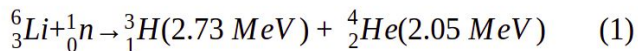
# Гетерогенный сцинтиллятор



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



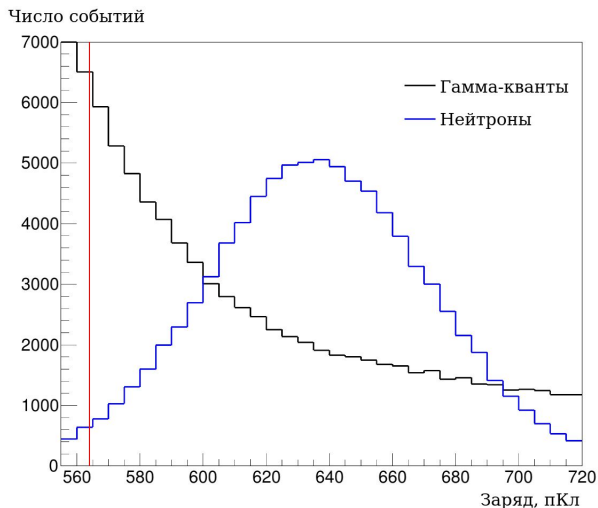
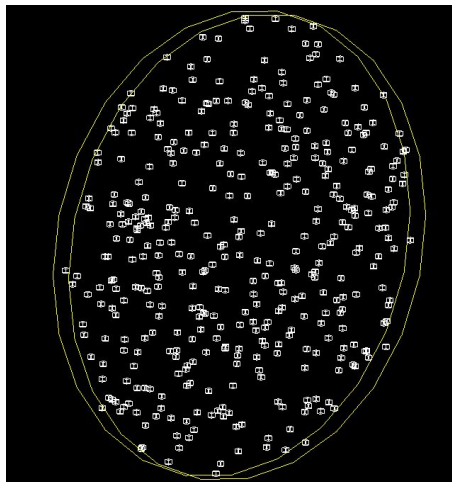
Объединенный  
институт ядерных  
исследований



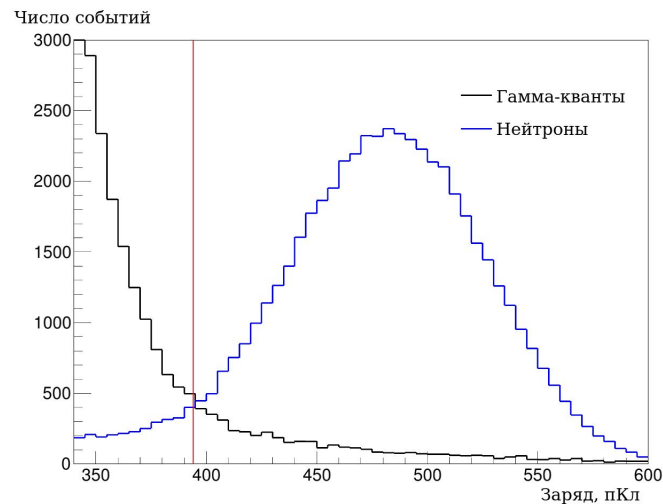
( $R_\alpha = 6 \text{ мкм}$ ,  $R_t = 36 \text{ мкм}$ )

Эффект Комптона ( $R_e \sim 2 \text{ мм}$ )

Спектры сигналов от  ${}^{60}\text{Co}$  и тепловых нейтронов в детекторах на основе литиевого стекла (экспериментальные данные из предыдущих исследований!) [7]



Монолитный сцинтиллятор



Гетерогенный сцинтиллятор. Содержание сцинтиллятора 35%. Компаунд Силикон



# Структура гетерогенного сцинтиллятора



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелепова



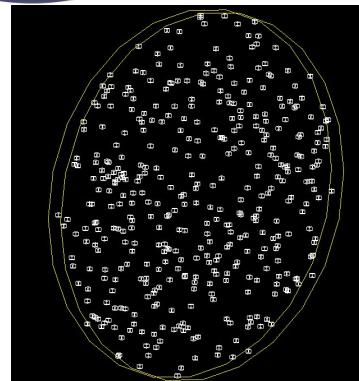
Объединенный  
институт ядерных  
исследований

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)	$SiO_2(74,7\%)+LiO_2(20,7\%)+Ce_2O_3(4,6\%)$	2,4

# Результаты моделирования

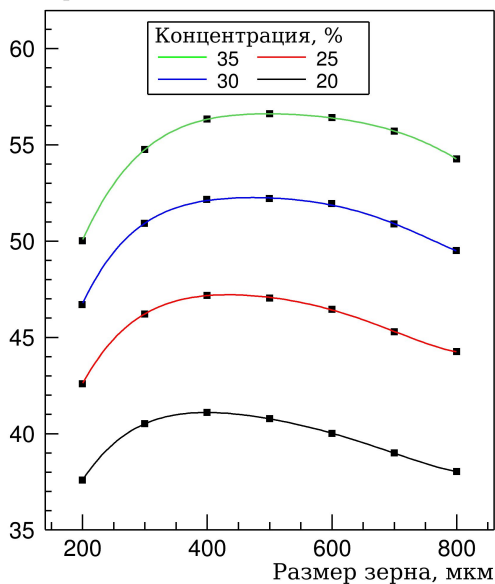


Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелепова



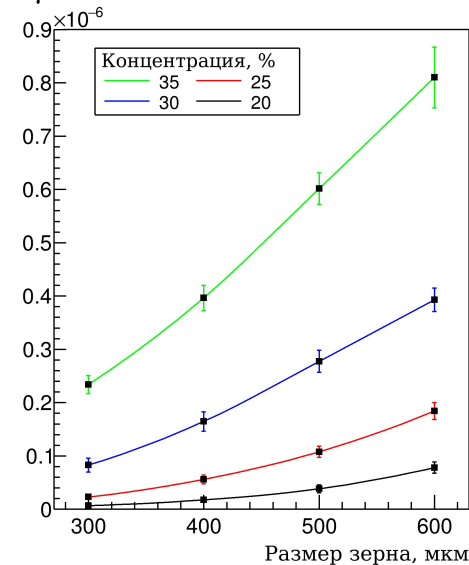
Объединенный  
институт ядерных  
исследований

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.

# Структура композитного сцинтиллятора



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова

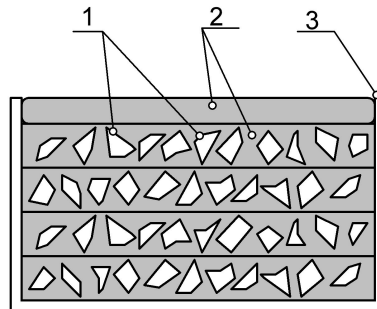


Объединенный  
институт ядерных  
исследований

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%. Гранулы имели размер от 350 до  
500 мкм.

В итоге было получено 9 композитов + монолитное стекло.

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



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

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



Гетерогенный сцинтиллятор.  
Содержание сцинтиллятора 35%.  
Компаунд Силикон

# Испытания образцов на тепловых нейтронах

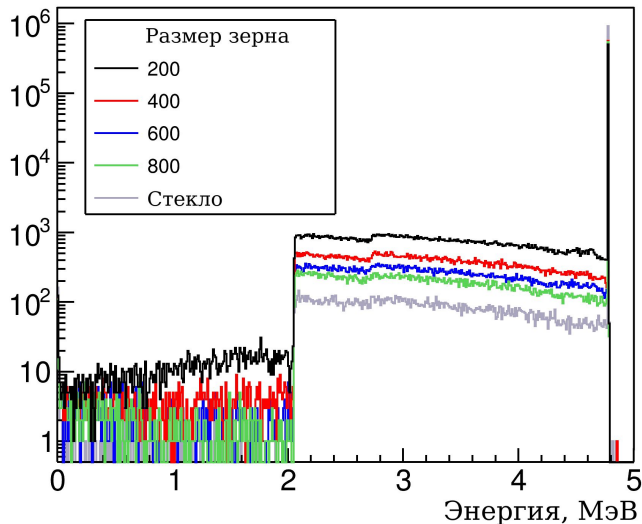


Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелеева



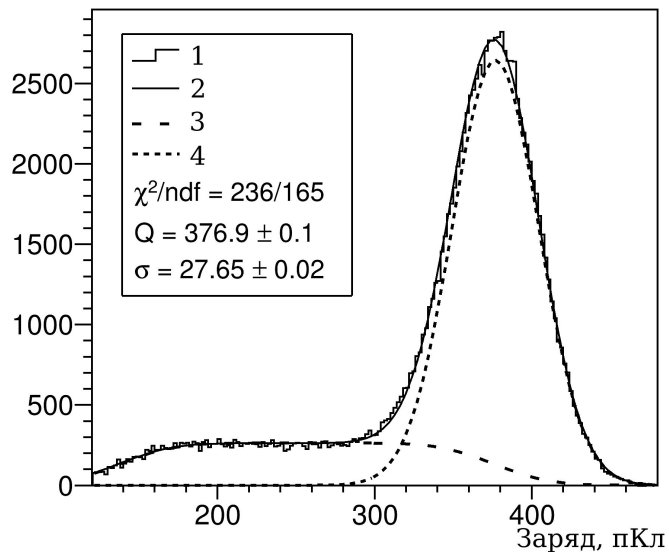
Объединенный  
институт ядерных  
исследований

Число событий



Функция передачи энергии сцинтиллятору  
(Моделирование)

Число событий



Спектр сигналов, зарегистрированных на пучке тепловых нейтронов от образца гетерогенного сцинтиллятора с концентрацией фрагментов стекла 30% .

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



## Эффективность регистрации нейтронов по отношению к эффективности стеклянного сцинтиллятора

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



## Гамма-чувствительность по сравнению со стеклянным сцинтиллятором

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

Концентрация литиевого стекла	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).
- 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.



- 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 разделения сигналов от нейтронов и гамма-квантов от сцинтилляторов на основе литиевого стекла / Е. С. Кузьмин [и др.] // Приборы и техника эксперимента – 2024 – №2 – С. 46-52





Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Джелпова



Объединенный  
институт ядерных  
исследований

Спасибо за внимание!



- 1) Spowart A. R. Neutron scintillating glasses: part II // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – 1977 – Vol. 140 – P. 19-28.
- 2) Dalton A.W. Light conversion efficiency of small lithium scintillators for electrons, protons, deuterons and alpha particles // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – 1987 – Vol. A 254 – P. 361-366.
- 3) Монте-Карло модель сцинтилляционного детектора нейтронов на основе литиевого стекла / Е. С. Кузьмин [и др.] // Приборы и техника эксперимента – 2021. – № 2. – С. 25-31.
- 4) Pulse shape analysis of liquid scintillators for neutron studies / S. Marrone [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 2002 – Vol. A490 – P. 299 - 307.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Чириков-Зорин И.Е. Развитие методики сцинтилляционных и газоразрядных трековых детекторов для физики высоких энергий: дис. ... канд. физ.-мат. наук. ОИЯИ. Дубна, 2014.
- 10) Glenn F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-07338-5. 1999.

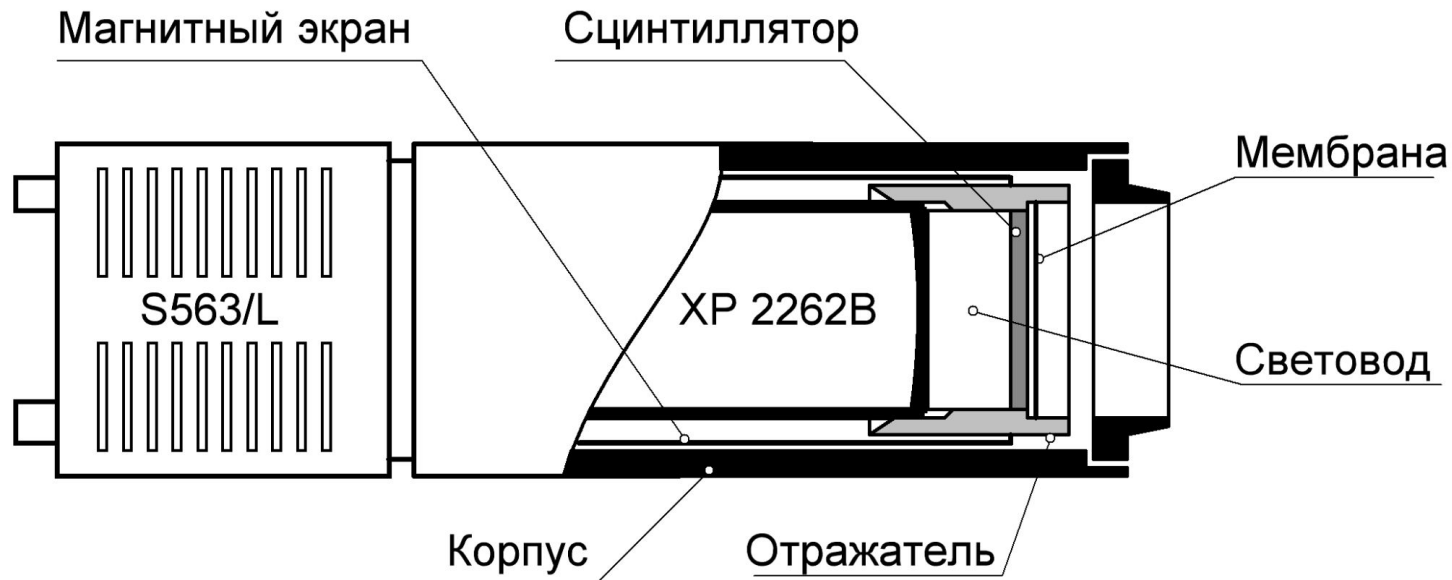
# Схема детектора



Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



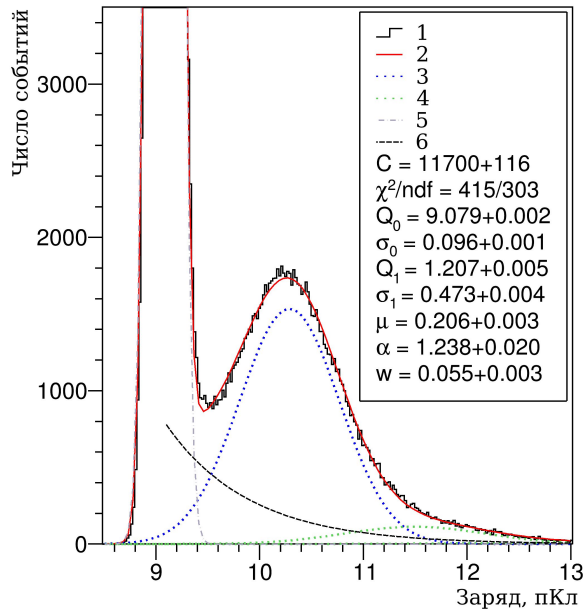
Объединенный  
институт ядерных  
исследований



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



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



Калибровка ФЭУ проводилась по спектру единичного электрона [7-9], 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

# Характеристики высвечивания сцинтиллятора



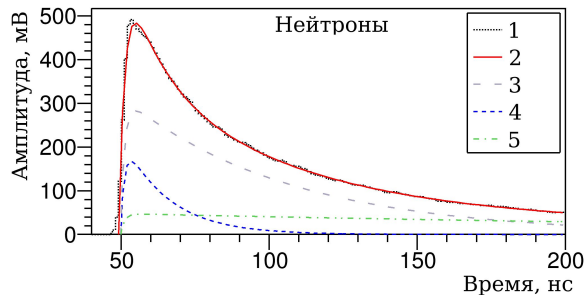
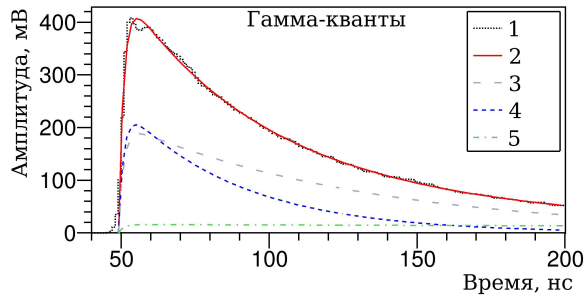
Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



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 [4].



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) [5]	18	55	

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

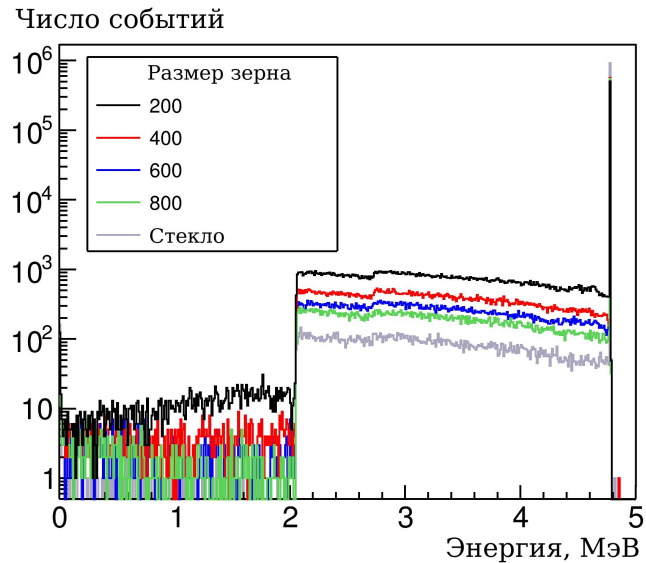
# Сравнение спектров энерговыведения



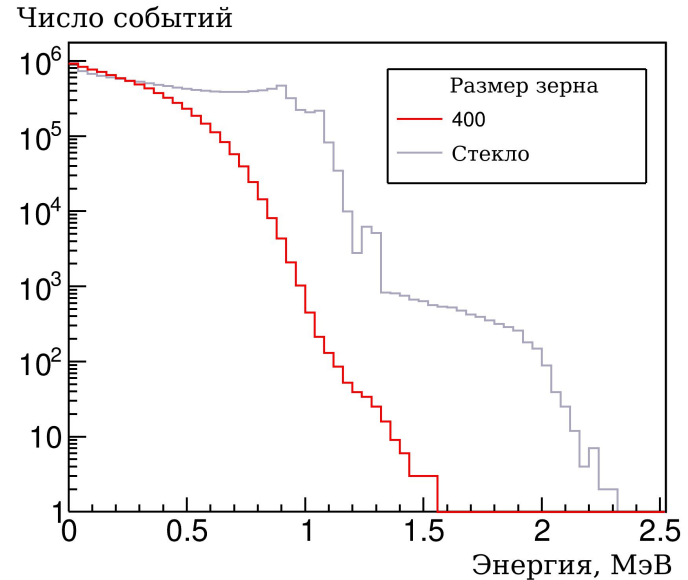
Лаборатория  
ядерных проблем  
им. В. П. Дзелепова



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%.

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

# 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



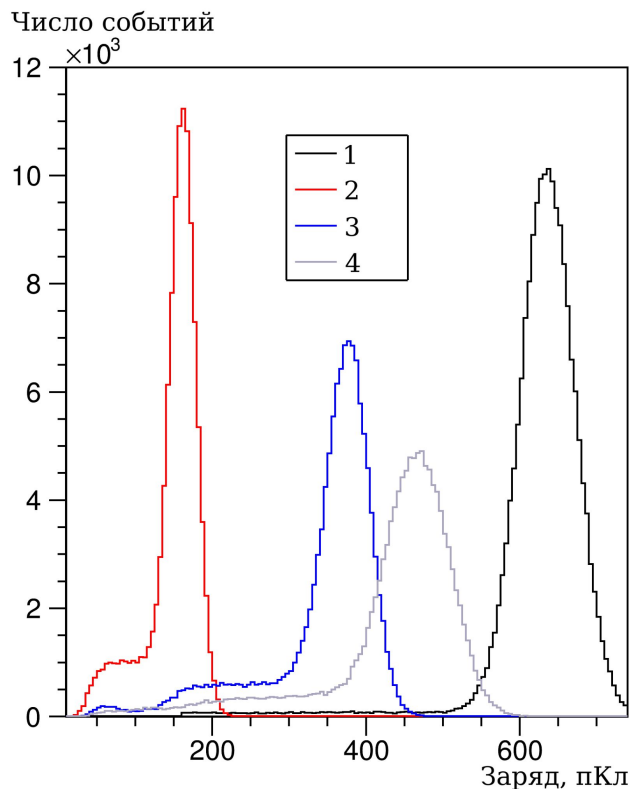
Гетерогенный  
сцинтиллятор.  
Содержание  
сцинтиллятора 35%.  
Компаунд Силикон



Гетерогенный  
сцинтиллятор.  
Содержание  
сцинтиллятора 35%.  
Компаунд эпоксидная  
смола



Гетерогенный  
сцинтиллятор.  
Содержание  
сцинтиллятора 25%.  
Компаунд силикон



## Спектры 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 различие импульсов сигналов сцинтиллятора от шумов ФЭУ.