

Монте-Карло модель сцинтилляционного детектора нейтронов на основе литиевого стекла

Е. С. Кузьмин, И. Ю. Зимин, Н. А. Кучинский,
В. Л. Малышев

Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Джелепова

Г. Д. Бокучава, А. А. Круглов

Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка

Детекторы нейтронов



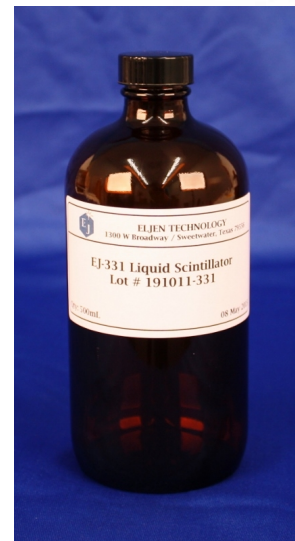
Пропорциональный счетчик на основе ^3He



Сульфид цинка активированный серебром



Пропорциональный счетчик на основе BF_3



Жидкий сцинтиллятор с содержанием Gd

Литиевые стекла

Достоинства:

- Хорошая прозрачность по сравнению с ${}^6\text{LiF/ZnS(Ag)}$;
- Малое время высвечивания (~ 70 нс);
- Высокая эффективность регистрации нейтронов, вызванная высоким содержанием ${}^6\text{Li}$ ($\sim 9\%$);

Недостаток:

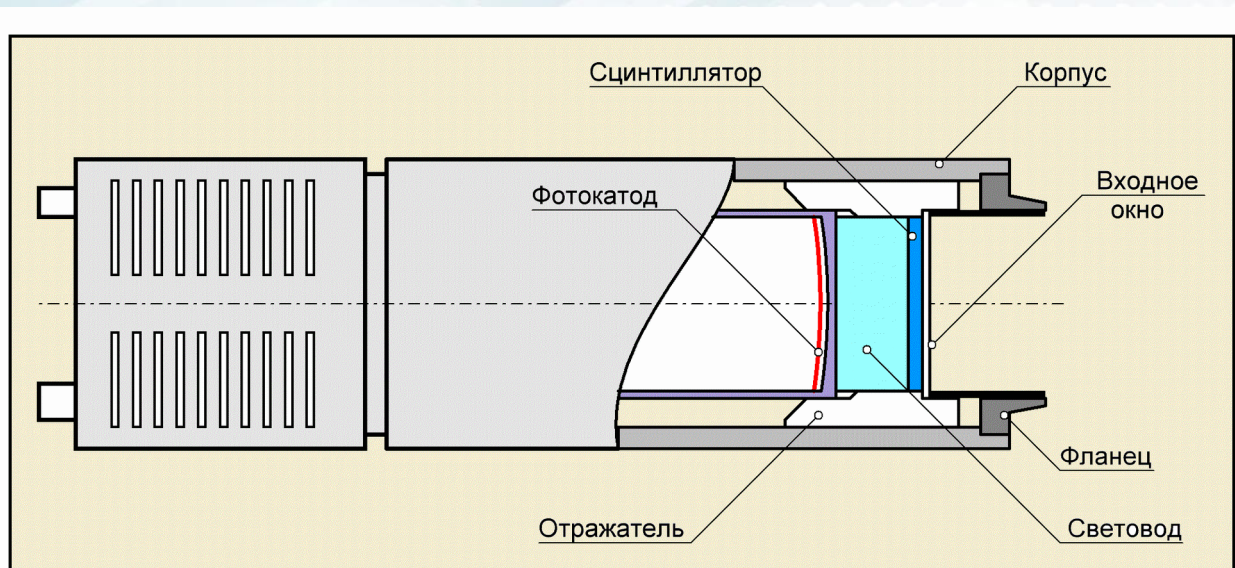
- Достаточно высокий уровень чувствительности к γ -квантам (10^{-4}).

В данной работе использовалось литиевое стекло NE912.

- Плотность $2,4 \text{ г/см}^3$
- Коэффициент преломления $1,55$
- Максимум длины излучения 397 нм
- Световыход для электрона 3257 фотонов/МэВ
- Сечение захвата тепловых нейтронов ${}^6\text{Li}$ 940 барн

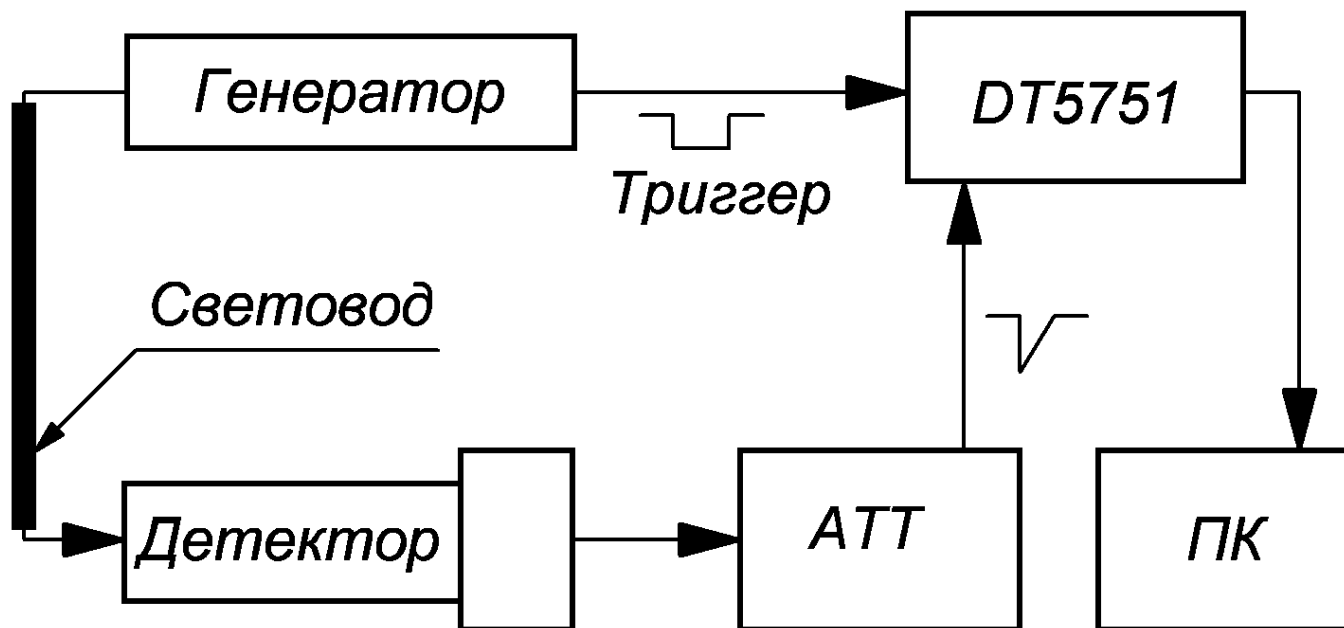
Химический состав литиевого стекла NE912			
	SiO_2	Ce_2O_3	Li_2O
Доля, %	74,7	4,6	20,7

Детектор



	Входное окно	NE912	PMMA	Фотокатод ФЭУ
Толщина, мм	0,5	2	25	-
Диаметр, мм	40	40	40	40

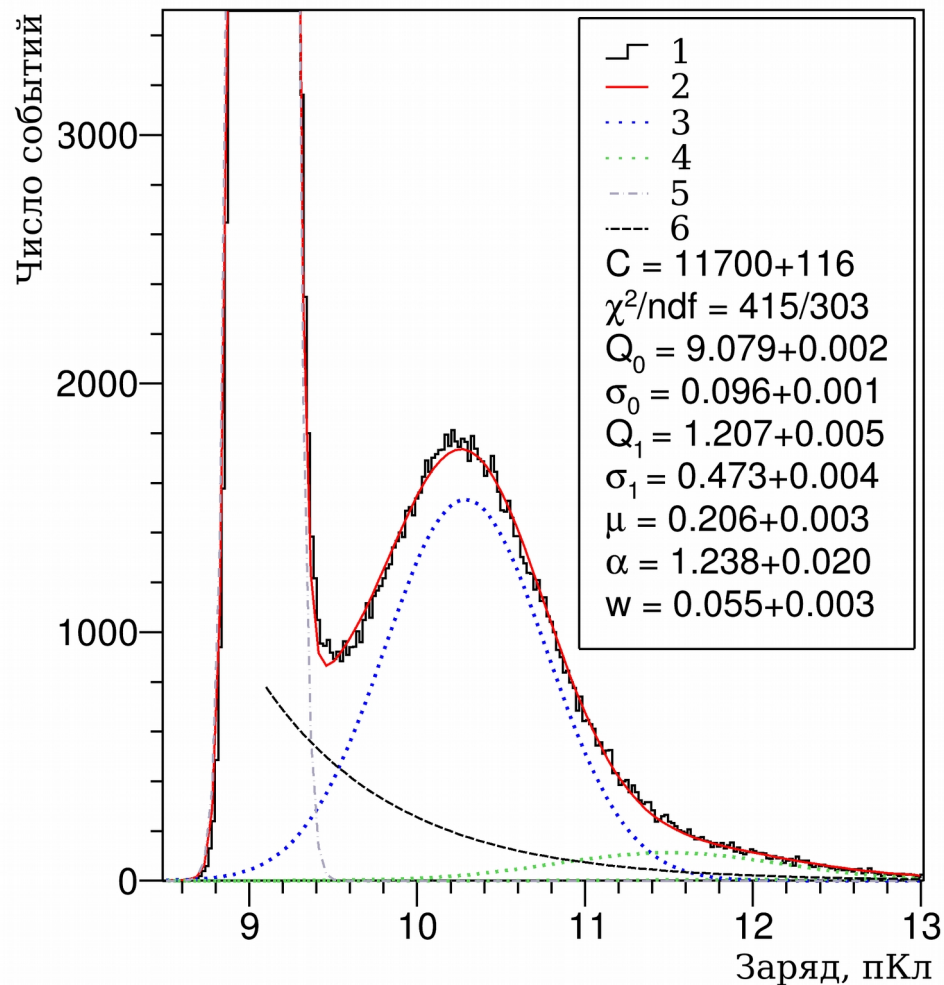
Схема, использованная при калибровке ФЭУ



DT5751 - дигитайзер,
АТТ - аттенюатор.

Спектр импульсов, зарегистрированный при калибровке ФЭУ

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



Калибровка ФЭУ проводилась по спектру единичного электрона, 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;

σ_0 - стандартное отклонение

пьедестала;

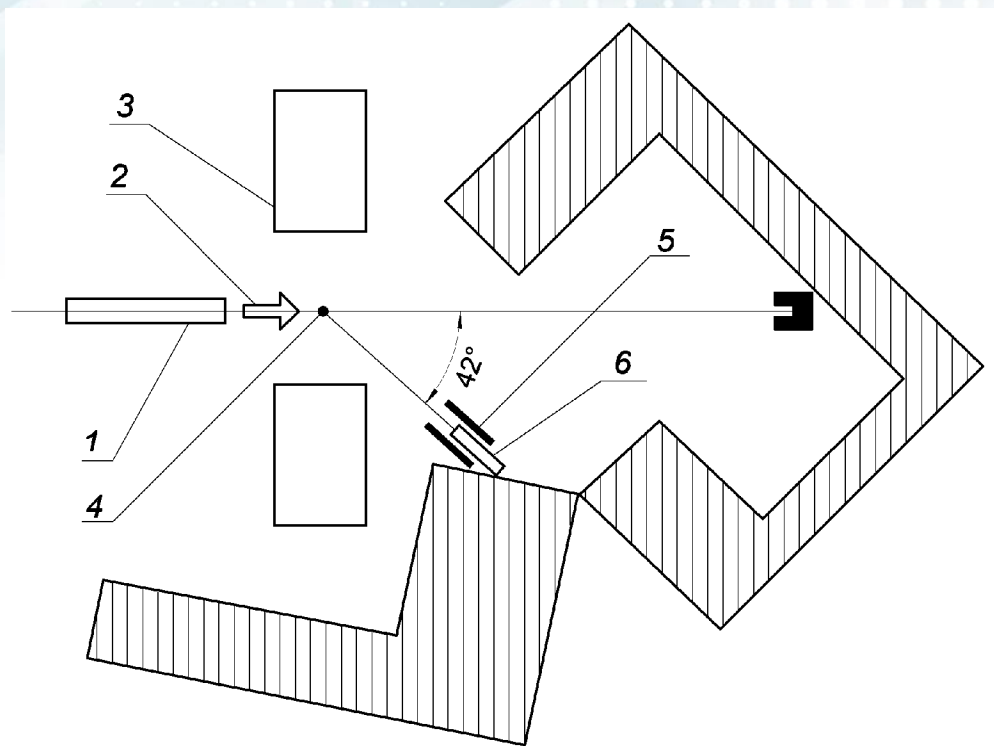
Q_1 - математическое ожидание одноэлектронного распределения импульсов;

σ_1 - стандартное отклонение одноэлектронного распределения импульсов;

μ - среднее количество фотоэлектронов, собранных на первом диноде;

α - постоянная экспоненты, характеризующей фоновые процессы второго типа.

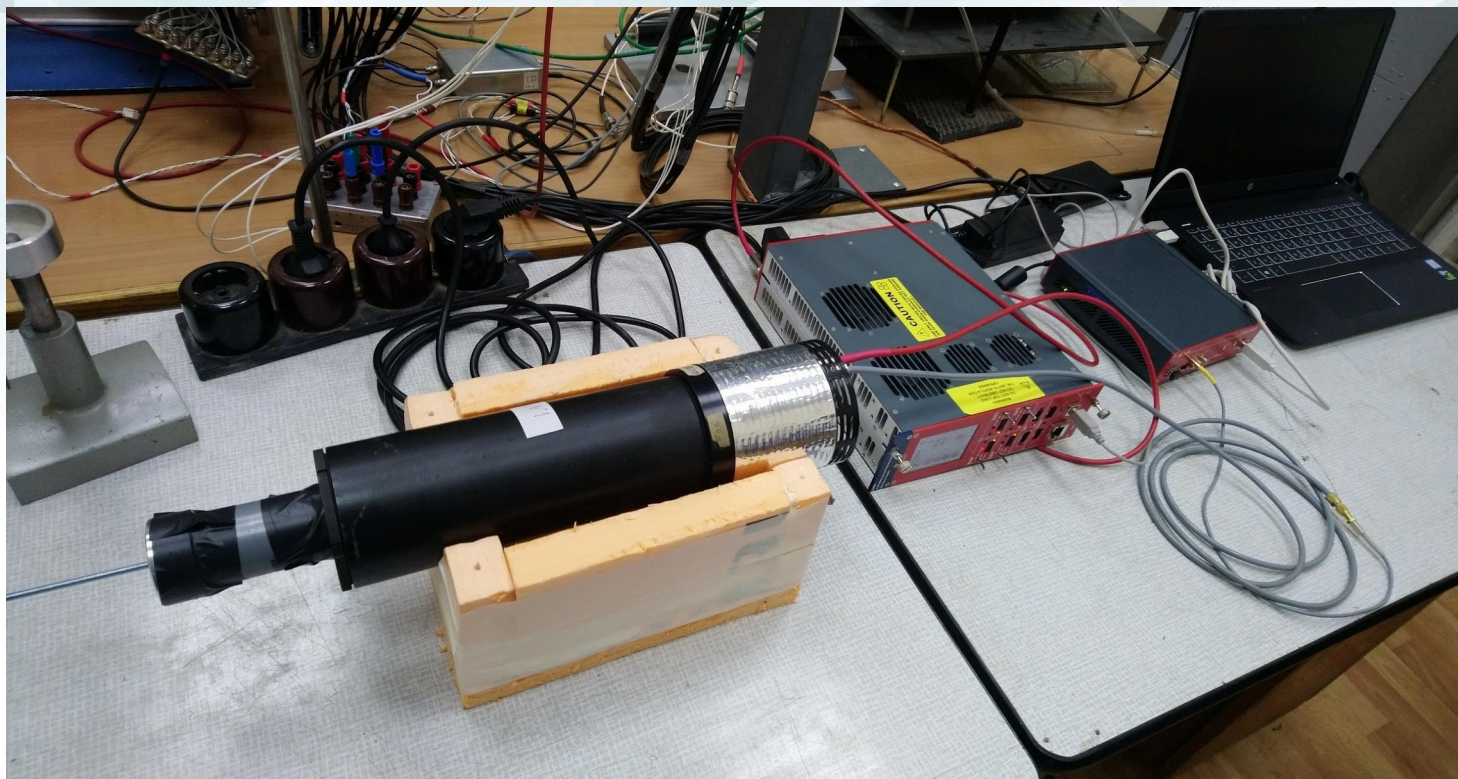
Измерения с нейтронами на пучке дифрактометра FSS (ИБР-2)



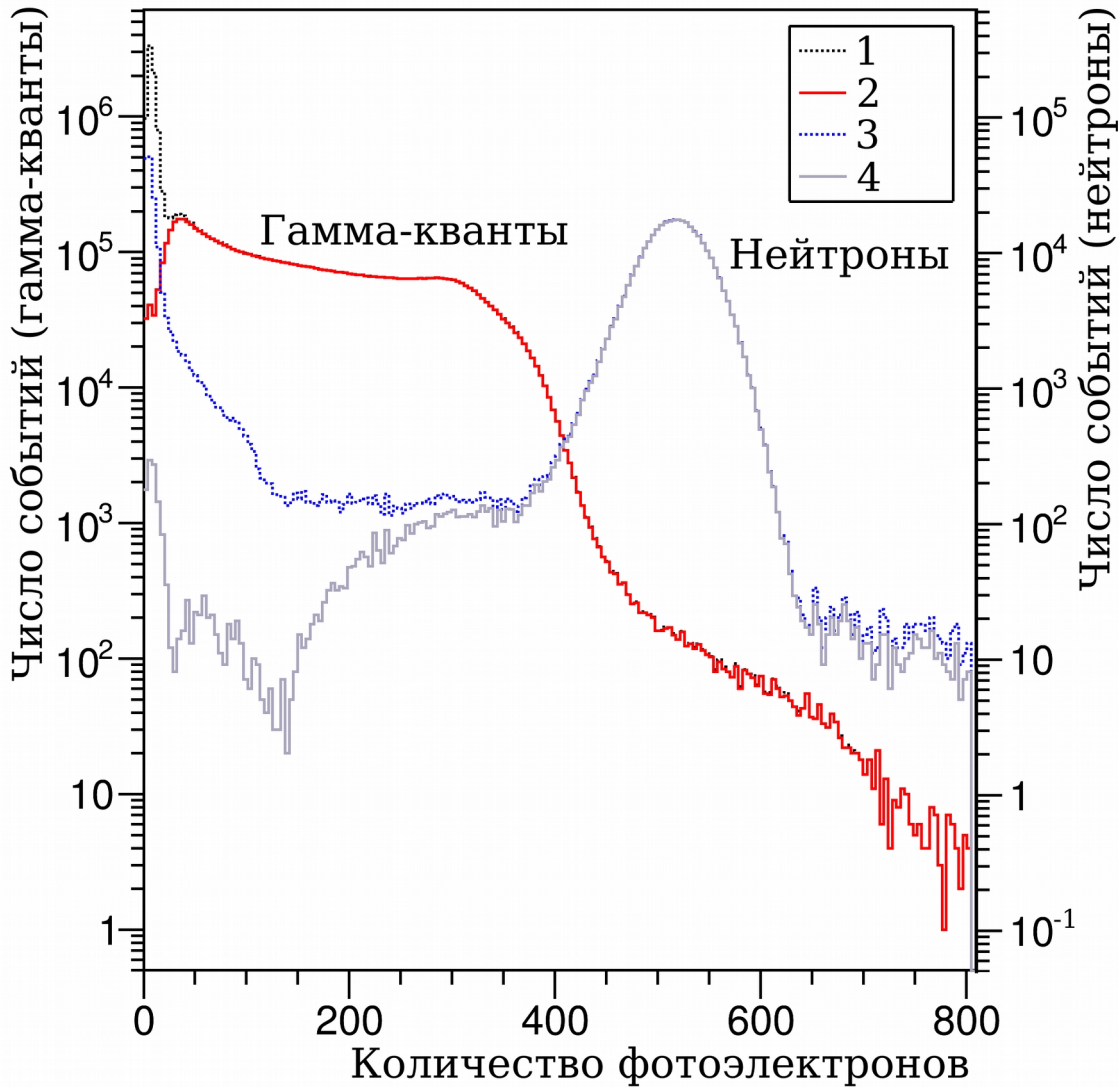
1 - нейтронотвод; 2 - пучок тепловых нейтронов; 3 - вспомогательное оборудование; 4 - рассеиватель из реакторного графита; 5 - защита детектора; 6 - детектор.

Средняя частота регистрации нейтронов была на уровне 600 с^{-1}

Измерения с гамма-квантами с источником ^{60}Co



На данном этапе измерений радиоактивный источник ^{60}Co (46,3 кБк) располагался на расстоянии 16 мм от сцинтиллятора. Средняя частота регистрации γ -квантов была на уровне 500 с^{-1} . Настройки измерительного оборудования были аналогичными, как и при измерениях на нейтронном пучке.



Спектры сигналов от ⁶⁰Со и тепловых нейтронов до и после обработки

1 - γ -кванты исходные данные;
 2 - γ -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.

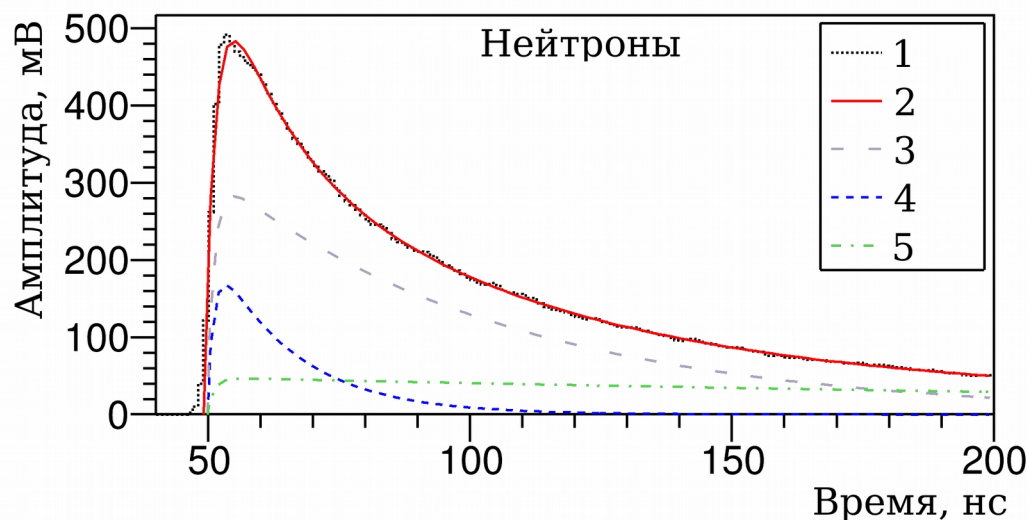
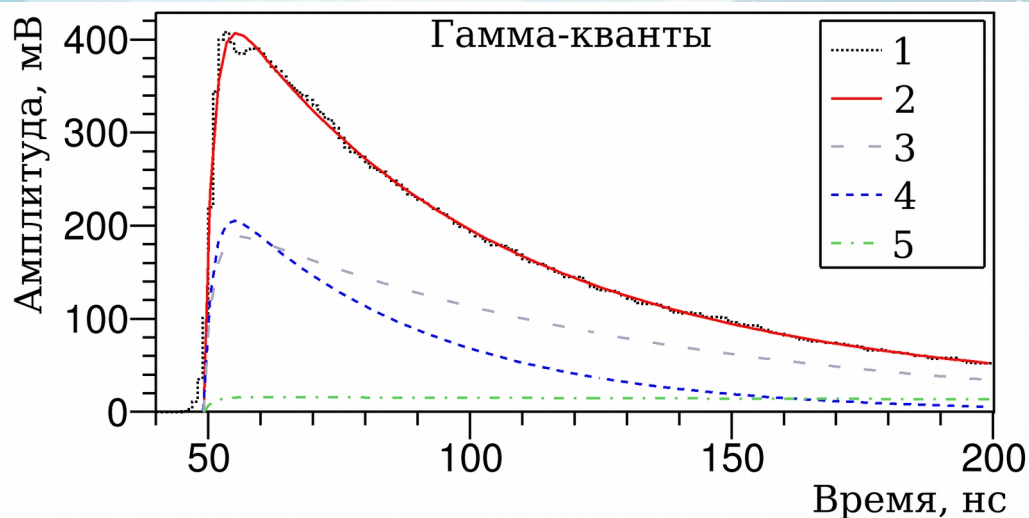
Описание формы импульса сигнала

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]:

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

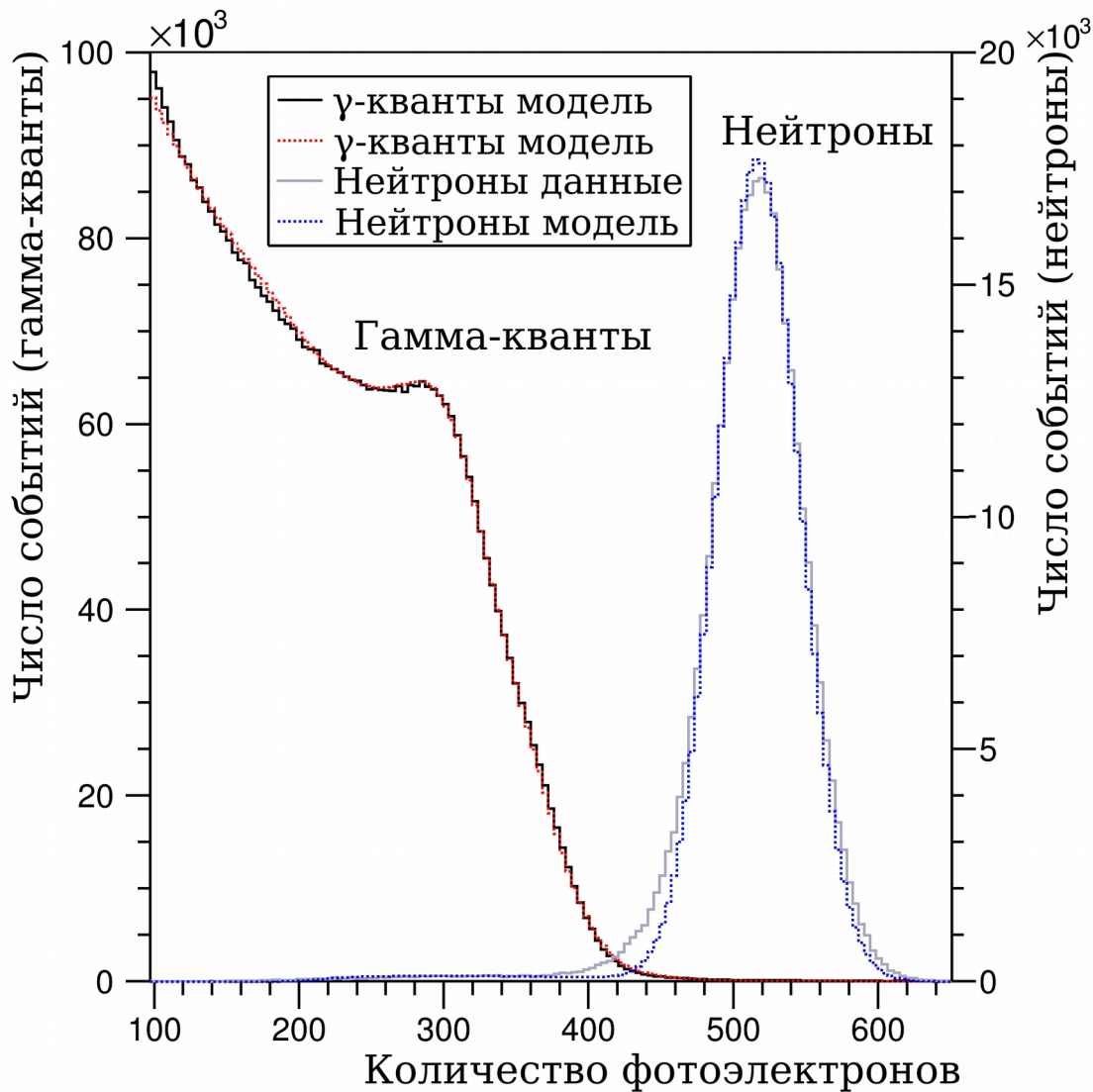
где $\lambda = 1/\tau$ - постоянная высвечивания сцинтиллятора, λ_1 - быстрая компонента, λ_2 - медленная компонента, λ_3 - послесвечение. θ - постоянная времени анода; t_0 - время начала импульса; A , B и C - амплитуды компонент высвечивания.

Характеристики высвечивания сцинтиллятора



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, нс (эксперимент)	0.39	0.53	0.08
Время высвечивания, нс (эксперимент)	15	56	303
Время высвечивания, нс (данные от производителя)	18	55	-

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

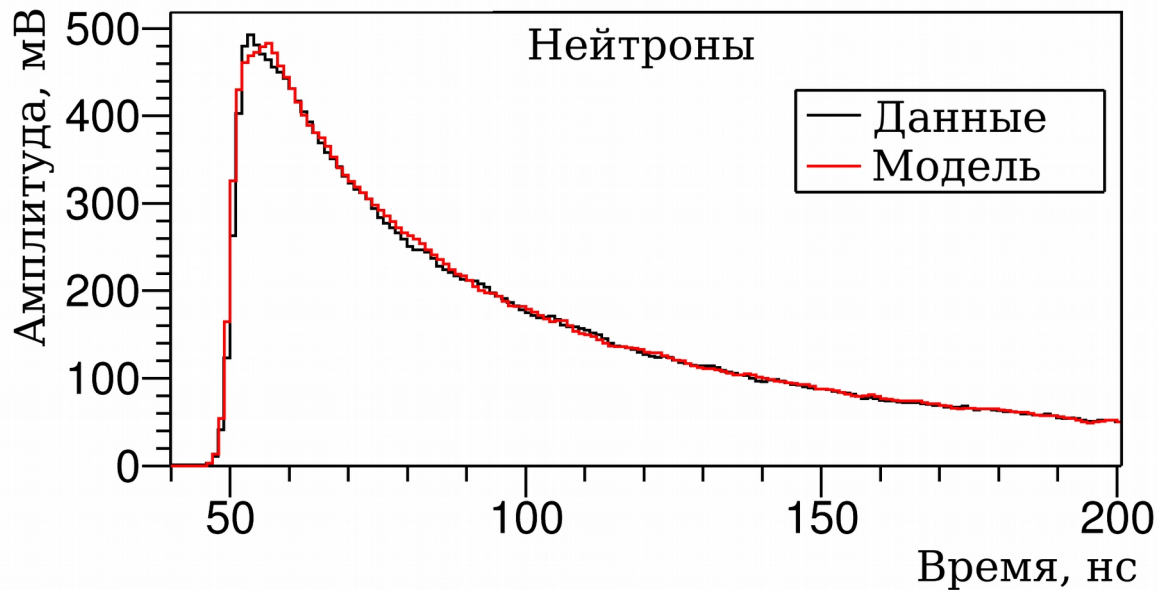
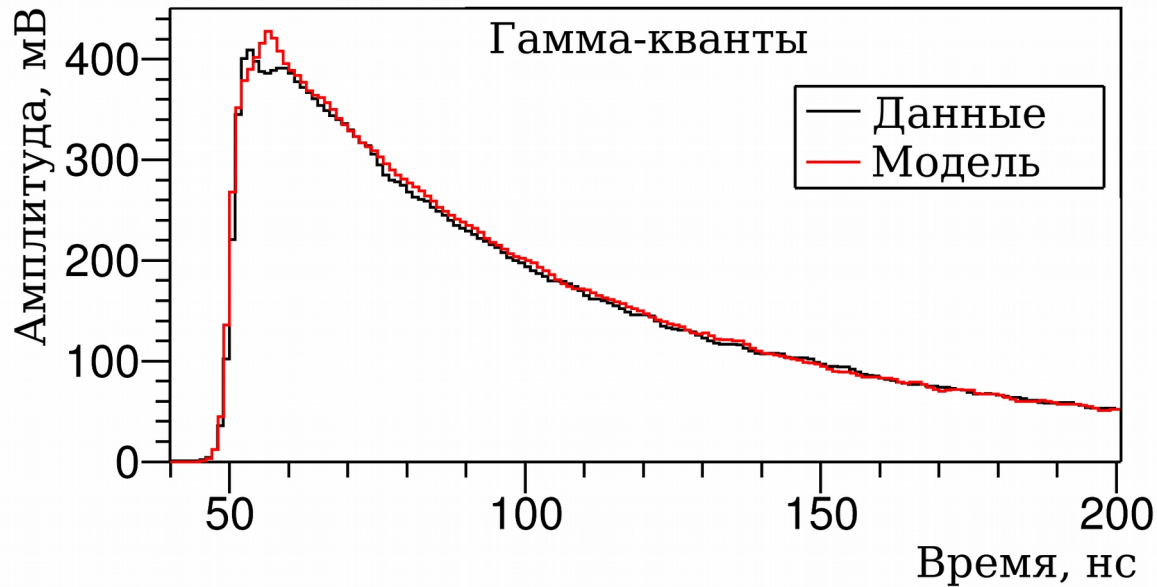


Моделирование спектров событий от γ -квантов и нейтронов

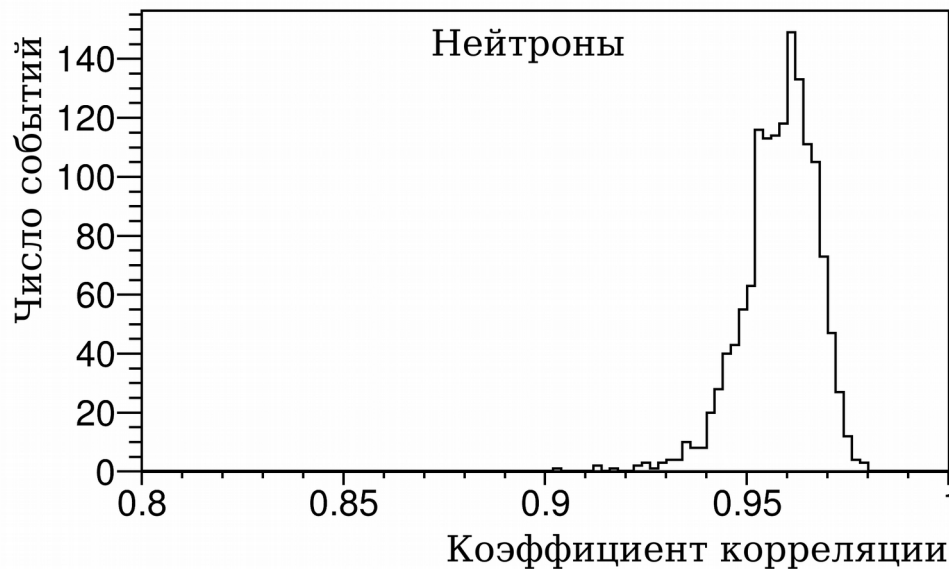
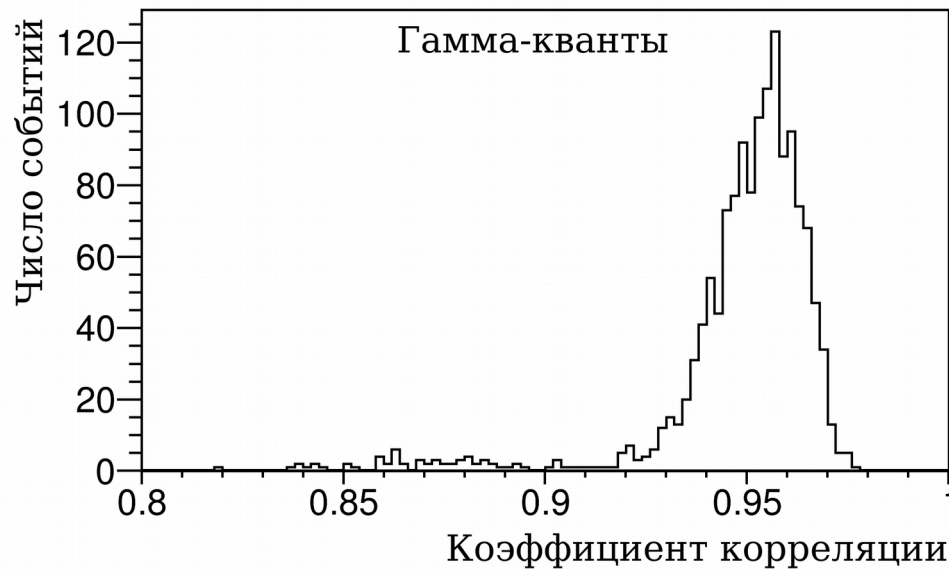
С помощью моделирования, путем варьирования световыхода сцинтиллятора, были определены:

- световыход при регистрации нейтронов $L_n = 1048$ фотонов/МэВ,
- квантинг-фактор $QF = 0.32$.

Моделирование импульсов сигналов от γ -квантов и нейтронов



Оценка подобия смоделированных и экспериментальных импульсов



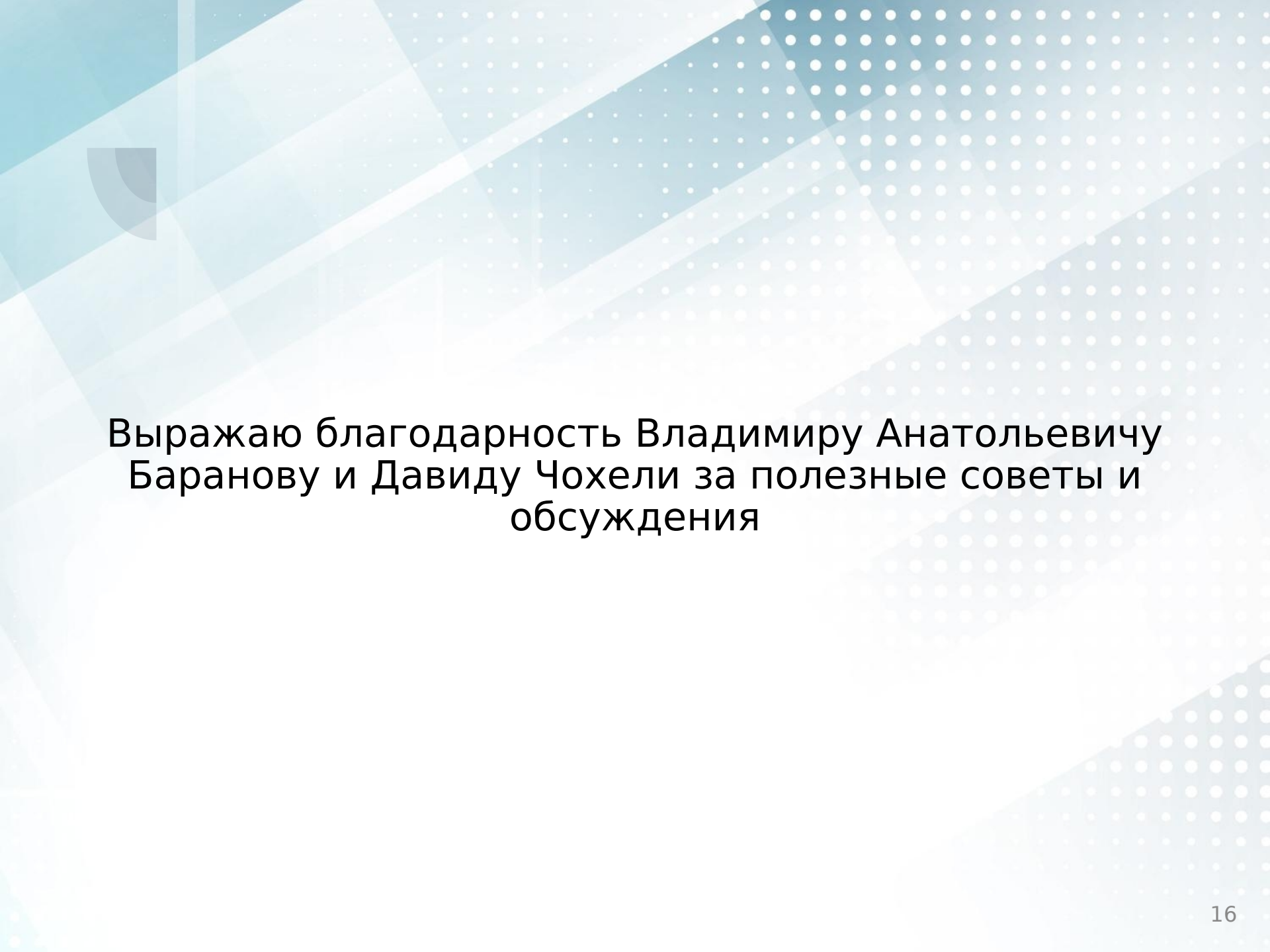
Формула для расчета корреляционных коэффициентов Пирсона [5]:

$$r_{xy} = \frac{\Sigma(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x-\bar{x})^2 \Sigma(y-\bar{y})^2}} \quad (3)$$

Результат демонстрирует высокую степень подобия модельных и экспериментальных импульсов. Среднее значение коэффициента корреляции составляет 0.96 для нейтронов и 0.95 для γ -квантов.

Заключение

- Создана и верифицирована Монте-Карло модель сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов на основе литиевого стекла NE 912.
- Определены характеристики сцинтиллятора: световыход при регистрации нейтронов, квенчинг-фактор, временные параметры высвечивания.
- Точность воспроизведения формы импульсов, зарегистрированных в эксперименте, позволит исследовать γ -чувствительность детектора при использовании различных методов селекции частиц.
- На основе полученных результатов будет построена модель детектора с гетерогенным сцинтиллятором и разработка цифровых методов селекции частиц.



Выражаю благодарность Владимиру Анатольевичу
Баранову и Давиду Чохели за полезные советы и
обсуждения

Список литературы

- 1) Химический состав
- 2) Чириков-Зорин И.Е. Дис. канд. физ.-мат. наук. ОИЯИ. Дубна, 2014.
<https://search.rsl.ru/ru/record/01007866157>
- 3) Marrone S., Cano-Ott D., Colonna N., Domingo C., Gramegna F., Gonzalez E.M., Gunsing F., Heil M., Kappeler F., Mastinu P.F., Milazzo P.M., Papaevangelou T., Pavlopoulos P., Plag R., Reifarh R., Tagliente G., Tain J.L., Wisshak K. // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. V. A490. 2002. P. 299. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01063-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01063-X)
- 4) Fairley E.J., Spowart A.R. // Nucl. Instrum. and Methods. 1978. V. 150. P. 159
- 5) Методы расчета коэффициента корреляции // URL: http://www.rnz.ru/econometrica/raschet_koefficienta_korrelyatsii.php