

Исследование сцинтилляционных сборок для проектирования ПЭТ

(Исследование применимости сцинтилляционных сборок на основе кристалла **LaBr₃(Ce)** и **SiPM** для регистрации гамма-квантов в прототипе позитронно-эмиссионного томографа)



Студент:

Килинкаров Д.С.

Научный руководитель:

Канцеров В.А.

Рецензент:

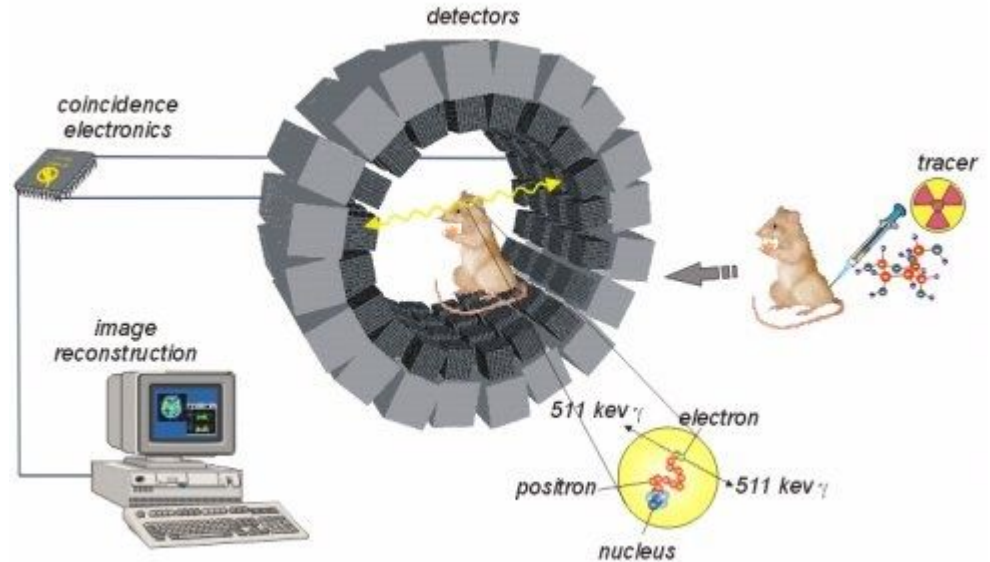
Дубинин Ф.А.

Цели и задачи работы

Цель: Исследование применимости сцинтилляционных сборок на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и SiPM для регистрации гамма-квантов в прототипе позитронно-эмиссионного томографа

Задача: проанализировать литературные источники, сравнить характеристики кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ с аналогами. Изучить работу детекторов на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и SiPM в режиме совпадений, провести анализ результатов.

Основы позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ)



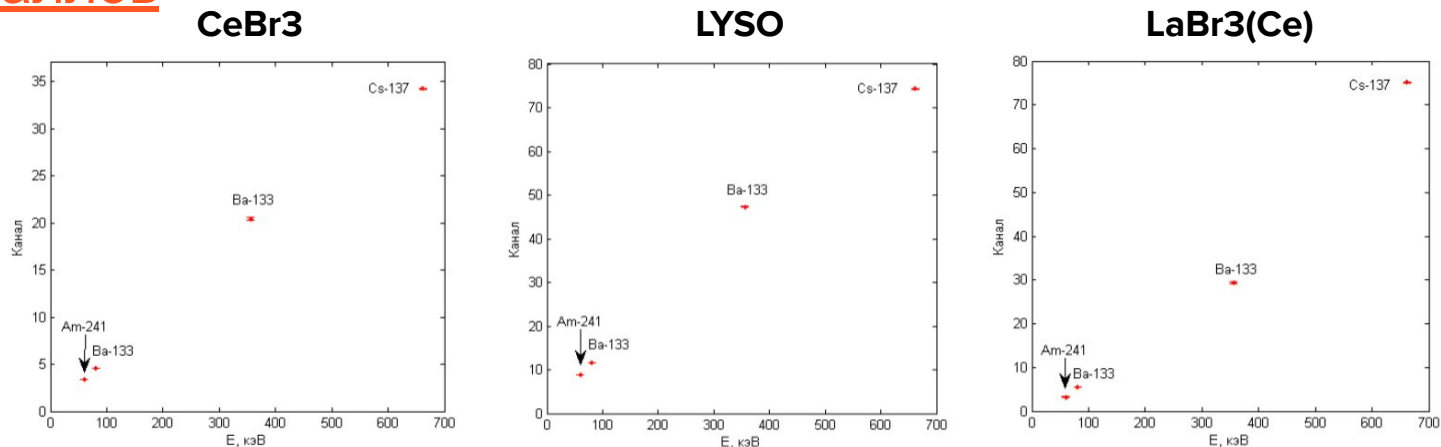
Основные сцинтилляторы, используемые в ядерной медицине и требования к ним

Сцинтиллятор	NaI(Tl)	CsI(Tl)	BGO	LYS O	LSO	LaBr ₃ (Ce)	CeBr ₃
$Z_{\text{эф}}$	51	54	74	63	66	45	46
ρ , г/см ³	3.67	4.51	7.1	7.1	7.4	5.08	5.1
Длина 50% ослабления (662 кэВ), мм	25	20	10	11	11	18	-
$\eta = \Delta E/E$, % (662 кэВ)	7.5	5.7	9.7	7.1	7.9	3.0	4.3
Световыход, фотонов/кэВ	38	40-45	9	32	27	65-70	47
τ , пс	250	1000	300	41	40	16	17
$\lambda_{\text{изх}}$, нм	415	550	480	420	420	365	370
Гигроскопичность	+	+/-	-	-	-	+	+

Требования:

1. Высокая плотность
2. Малое время высвечивания
3. Высокое энергетическое разрешение
4. Высокий световыход
5. Низкий собственный фон

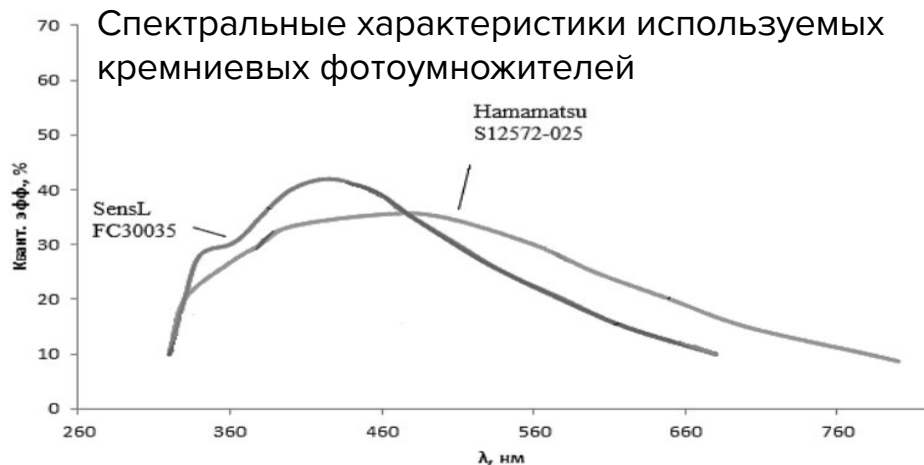
Величина отклика и энергетическое разрешение исследуемых кристаллов



Сцинтиллятор	Энергия гамма-излучения			
	60 кэВ	81 кэВ	356 кэВ	662 кэВ
LYSO	$(35.8 \pm 0.5) \%$	$(36.3 \pm 0.7) \%$	$(15.1 \pm 0.7) \%$	$(10.5 \pm 0.2) \%$
CeBr ₃	$(31.1 \pm 0.3) \%$	$(26.6 \pm 0.4) \%$	$(16.3 \pm 1.2) \%$	$(11.7 \pm 0.2) \%$
LaBr ₃ :Ce	$(20.1 \pm 0.2) \%$	$(15.9 \pm 0.2) \%$	$(6.1 \pm 0.5) \%$	$(5.1 \pm 0.1) \%$

Источник: Бердникова А. К. Сцинтилляционный гамма-зонд для радионуклидной диагностики в ядерной медицине : дис. . . . канд. / Бердникова А. К. — НИЯУ МИФИ, 2016.

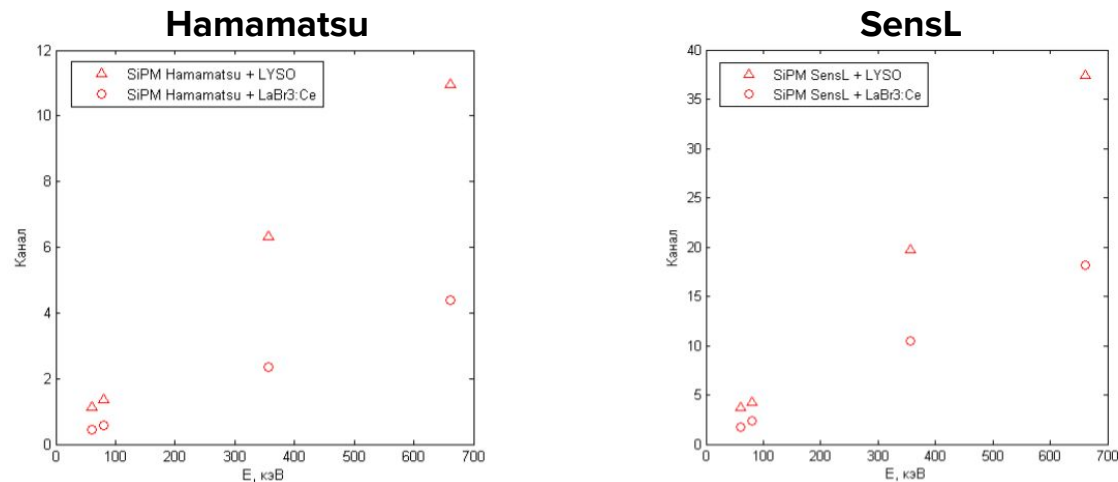
Характеристики используемых SiPM



Источник: Бердникова А. К. Сцинтилляционный гамма-зонд для радионуклидной диагностики в ядерной медицине : дис. . . . канд. / Бердникова А. К. — НИЯУ МИФИ, 2016.

	Hamamatsu S12572-025P	SensL MicroFC30035
Чувствительная площадь, мм ²	9	9
Количество ячеек	14400	4774
Размер ячейки, мкм ²	25	35
Коэфф. усиления	$\sim 5 \cdot 10^5$	$\sim 2 \cdot 10^6$

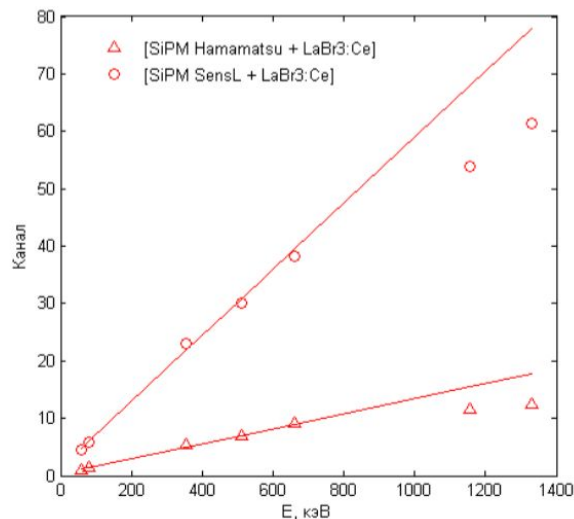
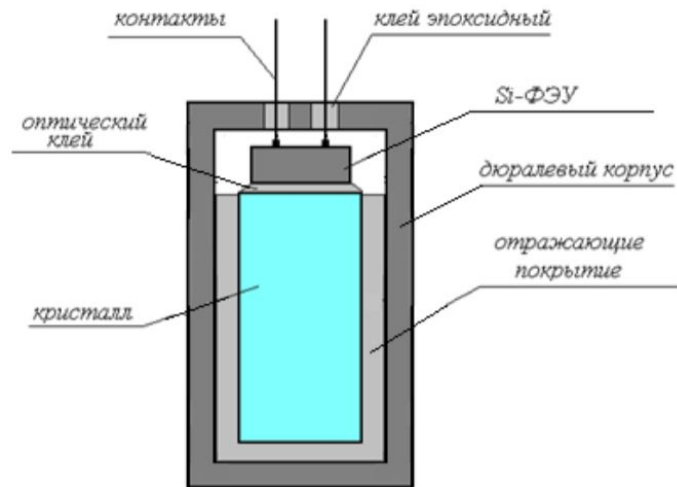
Величина отклика и энергетическое разрешение сборок SiPM-сцинтиллятор



SiPM	Сцинтиллятор	Энергия гамма-излучения			
		60 кэВ	81 кэВ	356 кэВ	662 кэВ
Hamamatsu	LYSO	(33.0 ± 0.5) %	(28.2 ± 0.5) %	(13.2 ± 0.5) %	(9.4 ± 0.3) %
	LaBr ₃ :Ce	(44.2 ± 0.7) %	(27.4 ± 0.6) %	(13.2 ± 1.5) %	(11.7 ± 0.2) %
SensL	LYSO	(28.3 ± 0.3) %	(25.6 ± 0.7) %	(13.3 ± 0.8) %	(14.3 ± 0.2) %
	LaBr ₃ :Ce	(31.7 ± 0.4) %	(21.6 ± 0.3) %	(9.7 ± 0.9) %	(8.6 ± 0.2) %

Источник: Бердникова А. К. Сцинтилляционный гамма-зонд для радионуклидной диагностики в ядерной медицине : дис. . . . канд. / Бердникова А. К. — НИЯУ МИФИ, 2016.

Характеристики детекторной сборки на основе $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и SiPM



Энергия гамма-излучения

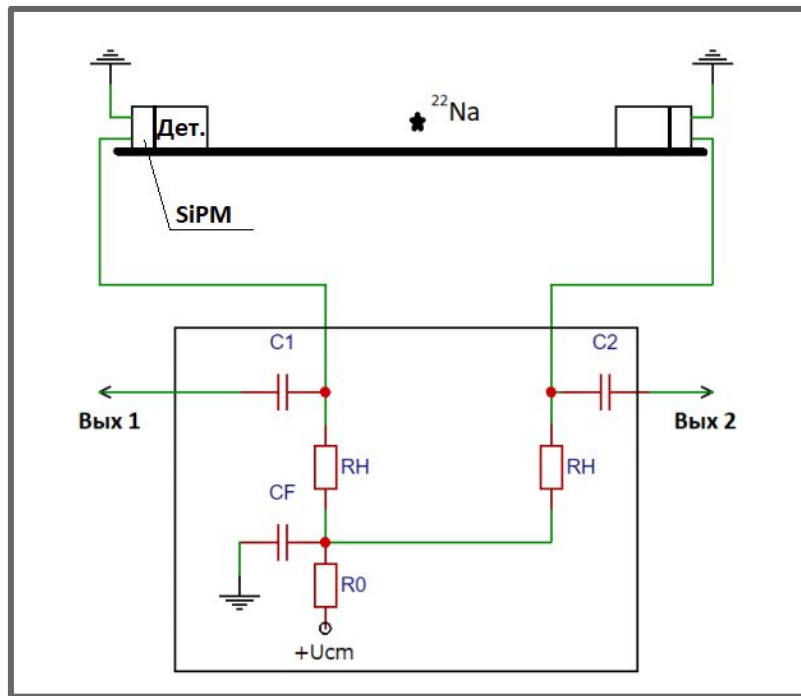
Детектор	60 кэВ	81 кэВ	356 кэВ	662 кэВ
Hamamatsu_S12572 + $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$	$(22.3 \pm 0.5) \%$	$(17.5 \pm 0.3) \%$	$(6.7 \pm 0.7) \%$	$(5.8 \pm 0.2) \%$
SensL_FC30035 + $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$	$(19.4 \pm 0.3) \%$	$(14.2 \pm 0.3) \%$	$(7.2 \pm 0.7) \%$	$(5.4 \pm 0.2) \%$

Источник: Бердникова А. К. Сцинтилляционный гамма-зонд для радионуклидной диагностики в ядерной медицине : дис. . . . канд. / Бердникова А. К. — НИЯУ МИФИ, 2016.

Этапы исследования детекторов в режиме совпадений

1. Создание экспериментального макета и схемы питания SiPM
2. Проведение измерения пространственного разрешения детекторов в режиме совпадений
3. Проведение измерения временного разрешения детекторов в режиме совпадений
4. Обработка и анализ полученных данных

Экспериментальный макет и схема питания SiPM

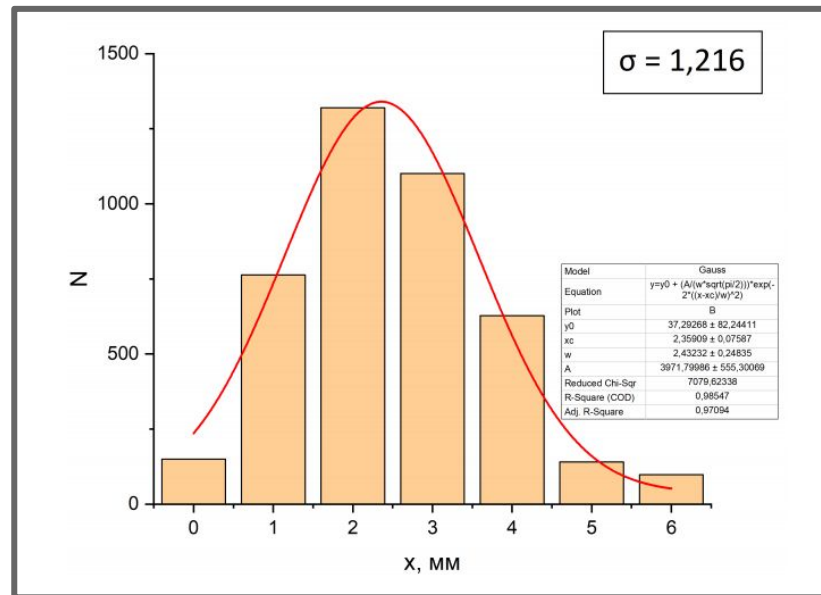
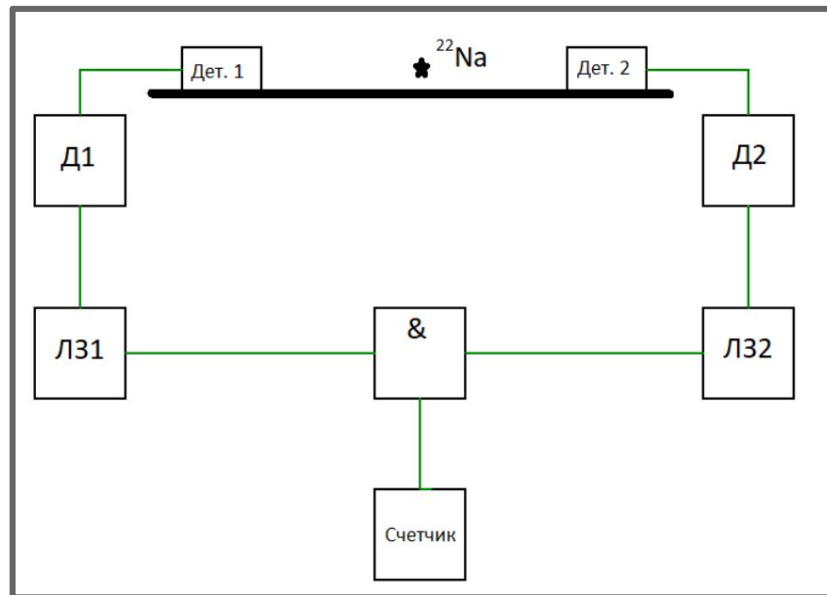


Экспериментальный макет

Описание:

- Детекторы: LaBr₃(Ce) и SiPM SensL FC30035 в едином корпусе
- Размеры кристалла: 4x10 мм, цилиндр
- Расстояние между детекторами: 15 см
- Источник: Na-22

Определение пространственного разрешения

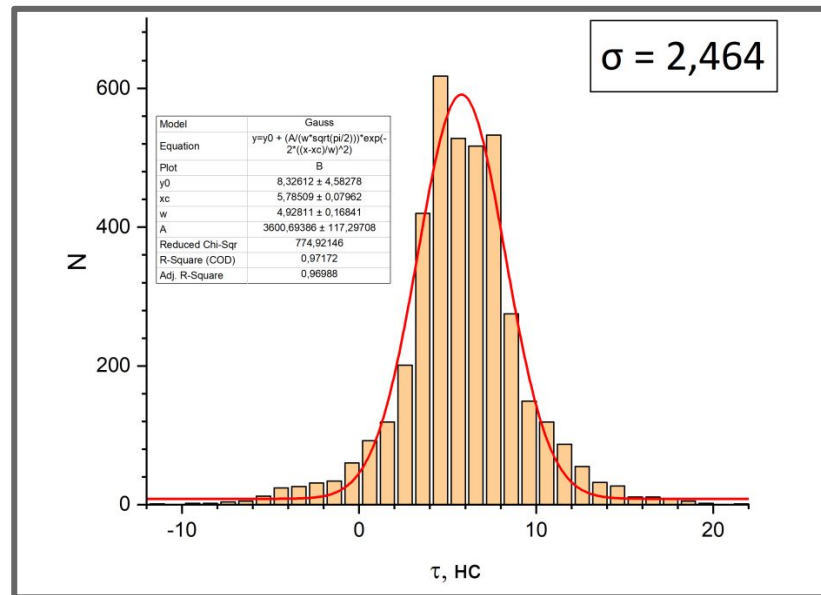
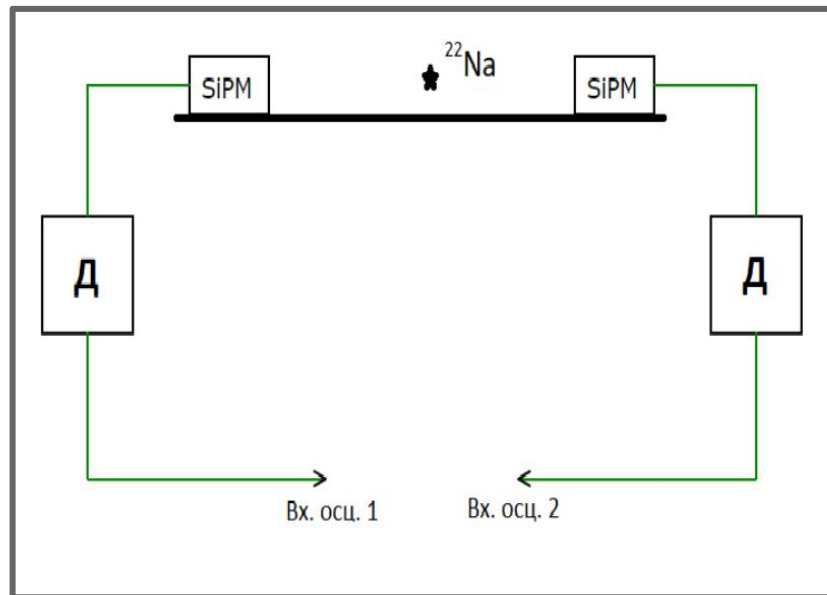


- Источник: Na-22
- Смещение проводилось вдоль оси, перпендикулярной оси детекторов и равноудаленной от них
- Шаг смещения: 1 мм
- Количество положений источника: 7
- Время набора статистики: 10 минут на каждое положение

$$X_{\text{дет.}} = \frac{2.35 * \sigma}{\sqrt{2}} = 2.1 \text{ мм}$$

$$X_{\text{уст.}} = 2.35 * \sigma = 2.9 \text{ мм}$$

Определение временного разрешения



- Источник: Na-22
- Источник располагался на оси детекторов, равноудаленно от них
- Временная привязка производилась по переднему фронту сигнала дискриминатора первого канала
- Измерялись времена прихода сигнала относительно начала шкалы осциллографа, вычислялась их разность
- Время набора статистики: 30 минут

$$t_{\text{дет.}} = \frac{2.35 * \sigma}{\sqrt{2}} = 4.2 \text{ нс}$$

$$t_{\text{уст.}} = 2.35 * \sigma = 5.9 \text{ нс}$$

Причины, повлиявшие на полученные результаты

Пространственное разрешение:

- Диаметр кристалла
- Неточность в фиксации высоты источника
- Неточности в фиксации координаты источника и его центровке

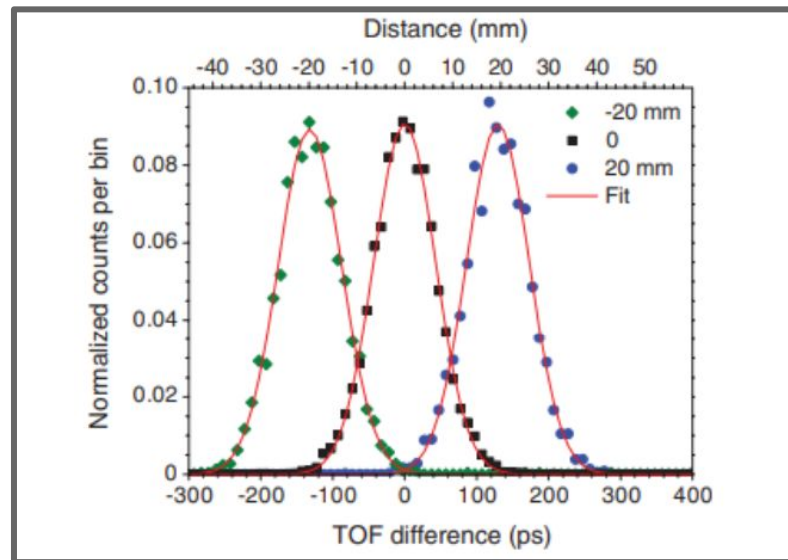
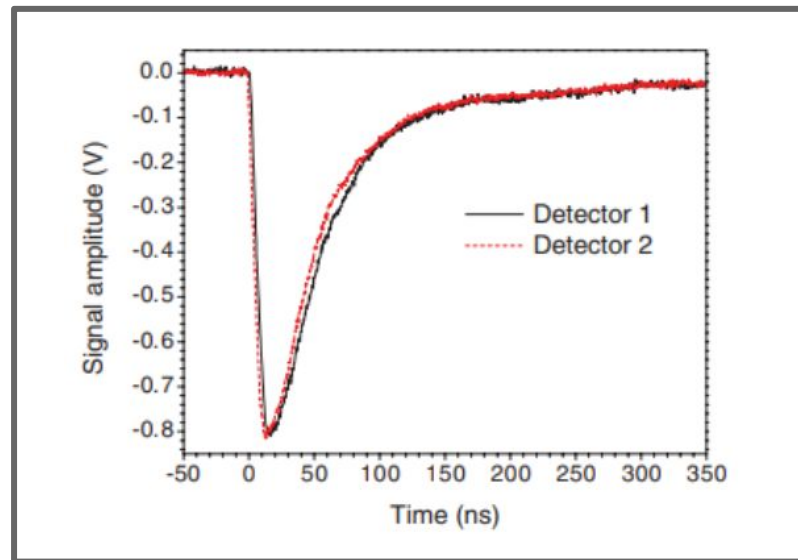
Временное разрешение:

- Устранимые:
 - Низкая статистика
 - Возможная нестабильность работы фотодетекторов и дискриминаторов
 - Выбранная шкала ВЦП осциллографа
 - Метод временной привязки
- Требующие изменения установки:
 - Параметры сцинтилляционного кристалла
 - Температурная стабильность SiPM

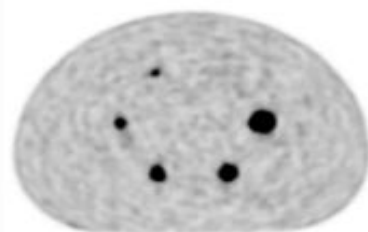
Методы улучшения временного разрешения

- Дифференцирование сигнала с SiPM. Продифференцировав сигнал, можно привязываться к максимумам амплитуд, что позволит компенсировать флуктуации во времени нарастания фронта.
- Использование дискриминаторов со следящим порогом. Их использование позволит ввести поправку на время нарастания сигнала в широком диапазоне амплитуд.

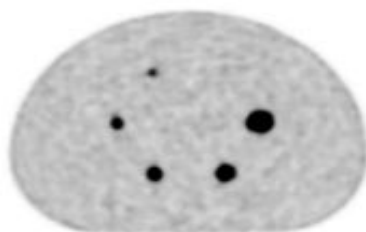
Использование $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ в PET-TOF сканерах



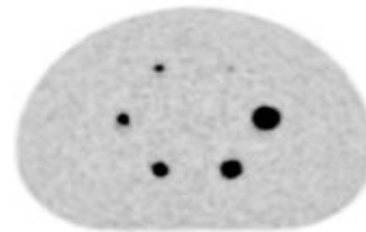
Источник: $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ and SiPMs for time-of-flight PET: Achieving 100 ps coincidence resolving time / D. Schaart [и др.]



(a) nonTOF



(b) TOF, 527ps



(c) TOF, 210ps

Заключение

Кристалл $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ в сочетании с SiPM отвечает всем необходимым требованиям, предъявляемым к сцинтилляционным детекторам, применяемым для регистрации гамма-квантов в радионуклидной диагностике, а именно:

- Высокая эффективность регистрации за счет высоких плотности и эффективного заряда
- Малое время высвечивания
- Высокое энергетическое разрешение
- Высокий световыход

На основе данных, полученных в ходе анализа литературных источников и проведенных измерений, можно заключить, что кристалл $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ является перспективным для использования в ПЭТ-сканерах и имеет преимущества перед аналогами: лучшее энергетическое разрешение для аннигиляционных гамма-квантов, высокий уровень выходного сигнала и потенциально достижимое временное разрешение в режиме совпадений ~ 100 пс.