

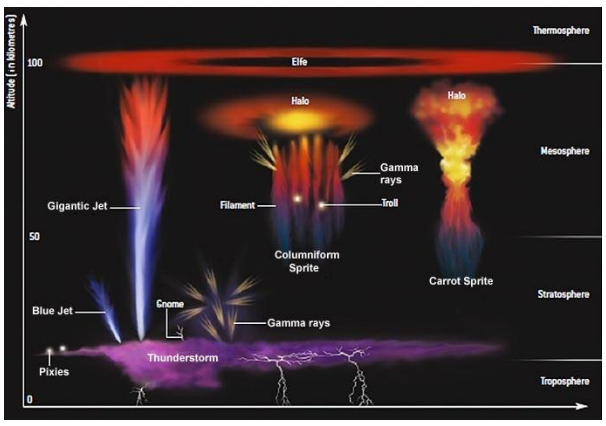
# **ДЕТЕКТИРОВАНИЕ НЕЙТРОНОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА GAGG:Ce**

**Коржик Михаил Васильевич, Лобко Александр Сергеевич,  
Максименко Сергей Афанасьевич, Мечинский Виталий  
Александрович**

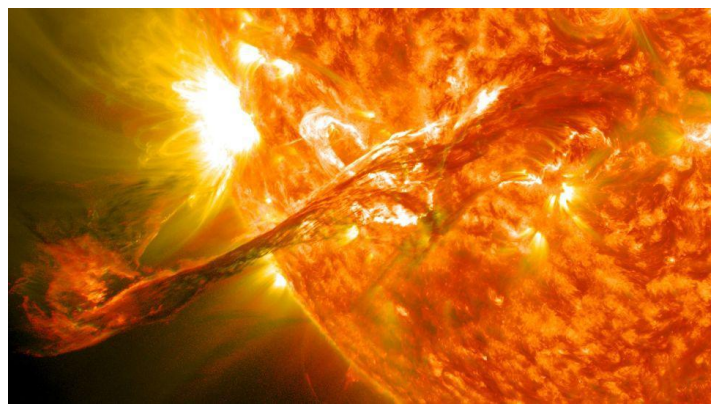
*НИУ НИИ ядерных проблем Белорусского государственного  
университета, Минск, Беларусь*

**Москва, 2024**

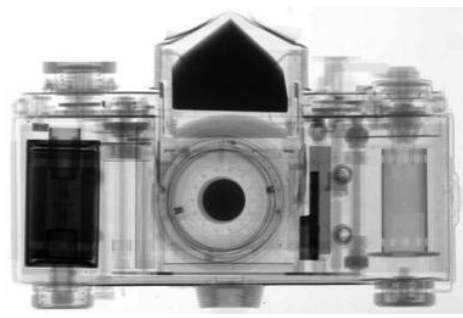
# Возрастающая потребность применения детекторов нейтронов



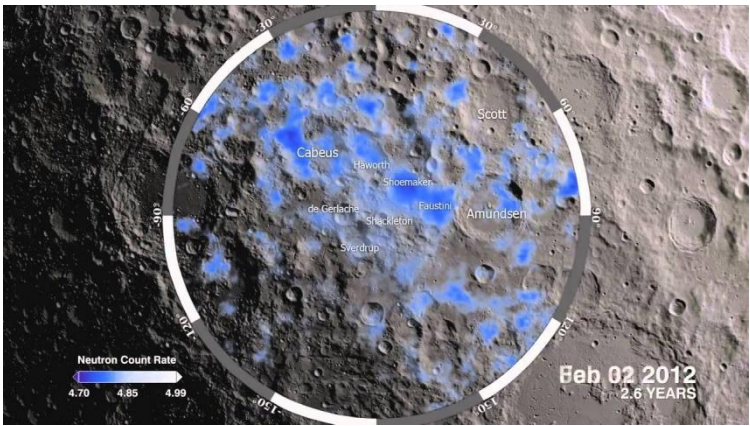
Природа атмосферных явлений



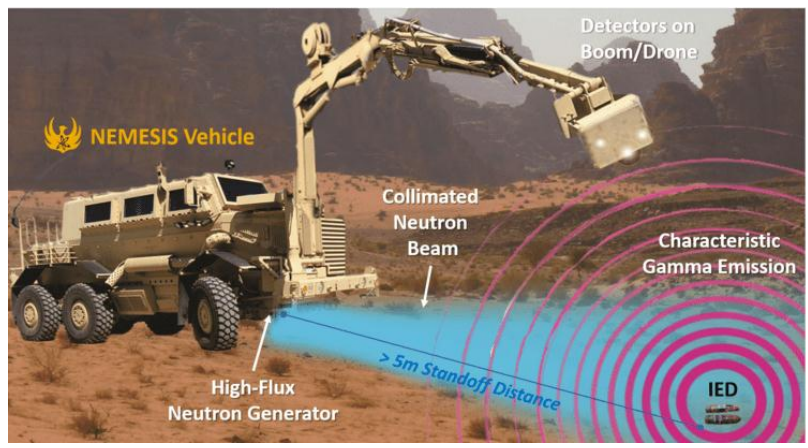
Солнце и космическое излучение.  
Нейтрино, антинейтрино



Система безопасности  
активного досмотра



Планетарная ядерная спектроскопия.  
Нейтронный картотаж



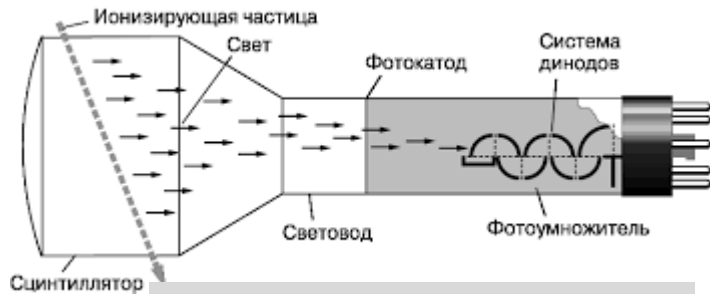
Идентификация взрывчатых и делящихся веществ

# Типы детекторов нейтронов

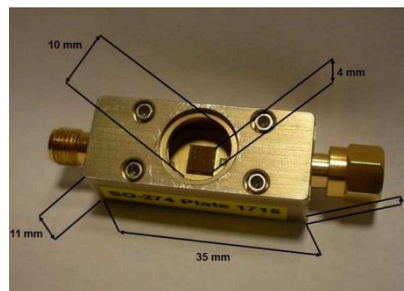
Изотоп	Ядерная реакция	Природное содержание изотопа, %	Сечение взаимодействия с тепловыми нейтронами, барн
${}^3\text{He}$	${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{H} + p$	0,00014 Нарабатывается вследствие реакции: ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + e^- + \nu$	5330
${}^6\text{Li}$	${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^3\text{H} + \alpha$	7,4	940
${}^{10}\text{B}$	${}^{10}\text{B} + n \rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha$	19,8	3840
${}^{12}\text{C}$	${}^{12}\text{C} + n \rightarrow {}^9\text{Be} + \alpha$	98,93	3,4



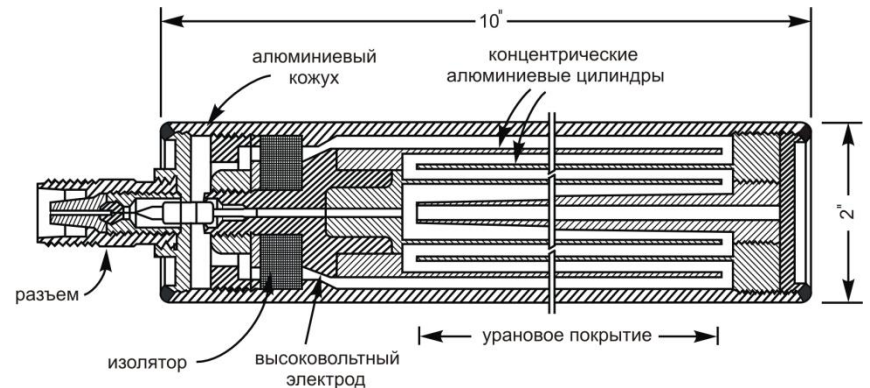
Пример гелиевого счётчика с модератором нейтронов



Сцинтилляционный детектор



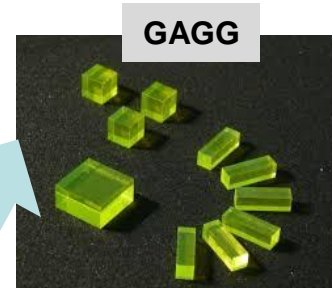
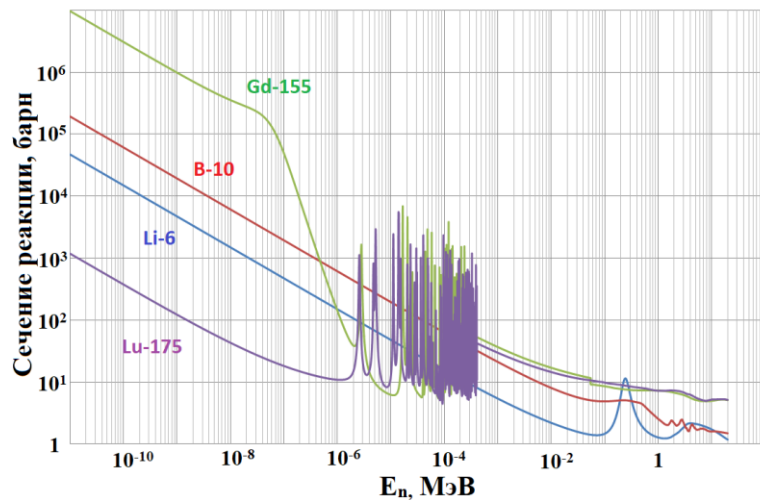
Полупроводниковый детектор



Камера деления

# Сцинтилляционные материалы на основе редкоземельных элементов для регистрации нейтронов

Химическая формула	Световой выход, (ф/МэВ)	Кинетика высвечивания, нс	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Z <sub>eff</sub>	Резонансный интеграл сечения радиационного захвата нейтронов матрица образующего элемента, барн	Сечение радиационного захвата тепловых нейтронов матрица образующего элемента, барн
Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ce (LuAG:Ce)	24000	55-65	6,67	62,9	900 (Lu)	77 (Lu)
Gd <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Ga <sub>3</sub> O <sub>12</sub> :Ce (GAGG:Ce)	58000	90-170	6,2	54,4	390 (Gd) / 18,7(Ga)	49000 (Gd) / 2,9 (Ga)
Lu <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce (LSO:Ce)	~30000	40	7,4	66,4	900 (Lu)	77 (Lu)
Gd <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce (GSO:Ce)	12500	56;600	6,71	59,4	390 (Gd)	49000 (Gd)
Lu <sub>2(1-x)</sub> Y <sub>2x</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce (LYSO:Ce)	32000	30-35	7,2	63-65	900 (Lu) / 1,0 (Y)	77 (Lu) / 1,0 (Y)
GdBr <sub>3</sub> :Ce	44000	20 (26%), 212 (65%), 13500 (9%)	4,55	52,4	390 (Gd) / 90(Br)	49000 (Gd) / 6,8 (Br)

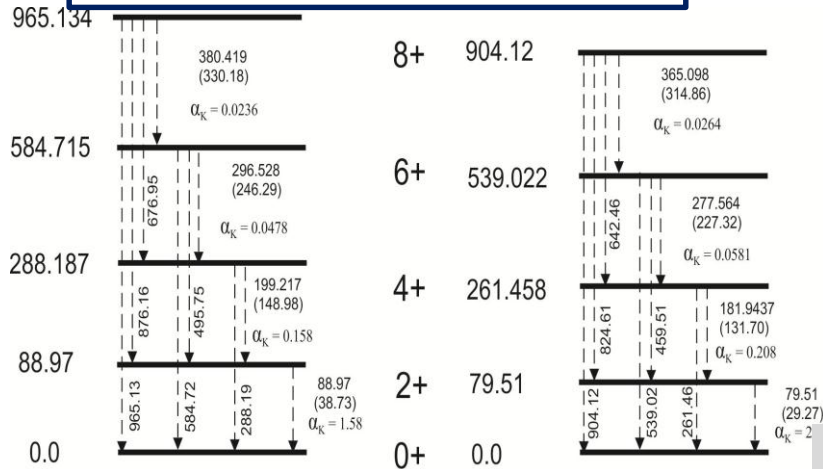
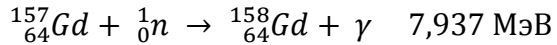
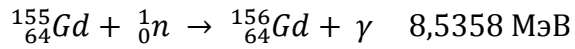


**Лучший вариант Ga<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub>:**

- высокий световыход
- негигроскопичен
- отсутствует природная радиоактивность



# Принцип детектирования тепловых нейтронов материалами, содержащими гадолиний

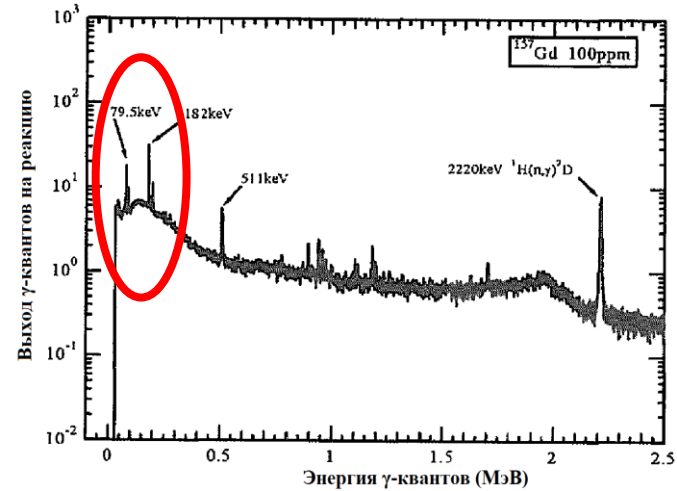


156 Gd

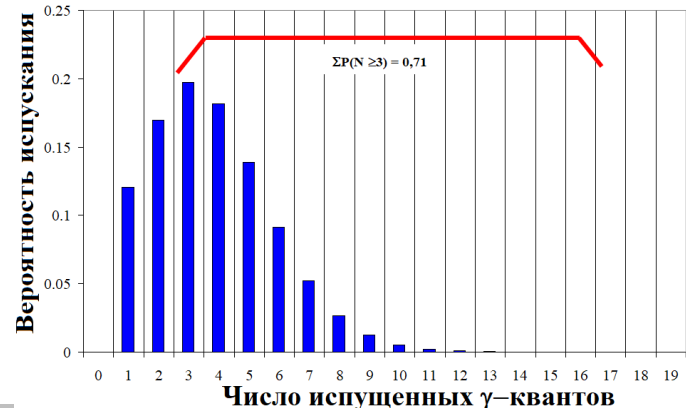
158 Gd

Схема нижних энергетических уровней изотопов ядер  $^{156}\text{Gd}$  и  $^{158}\text{Gd}$

Изотоп	Сечение взаимодействия с тепловыми нейтронами, барн	Процентное содержание в природном Gd, %
152	739,76	0,2
153	22379	0
154	86	2,18
155	60991	14,8
156	1,799	20,47
157	254840	15,65
158	2,222	24,84
160	1,424	21,86

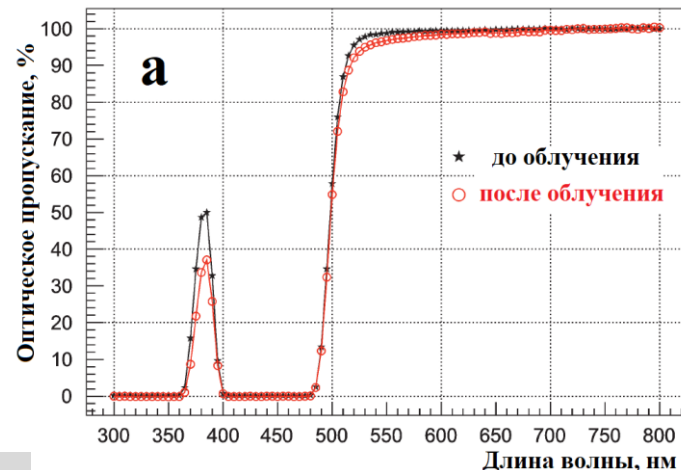
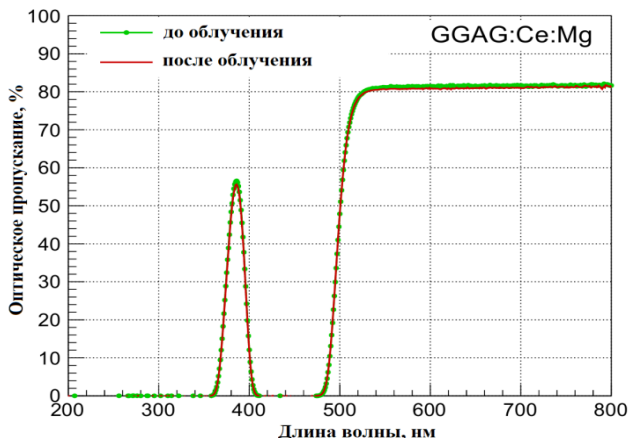


Амплитудный спектр  $\gamma$ -квантов реакции  $^{157}\text{Gd} (n, \gamma) ^{158}\text{Gd}$  в металлическом гадолинии измеренный с детектором NaI(Tl)



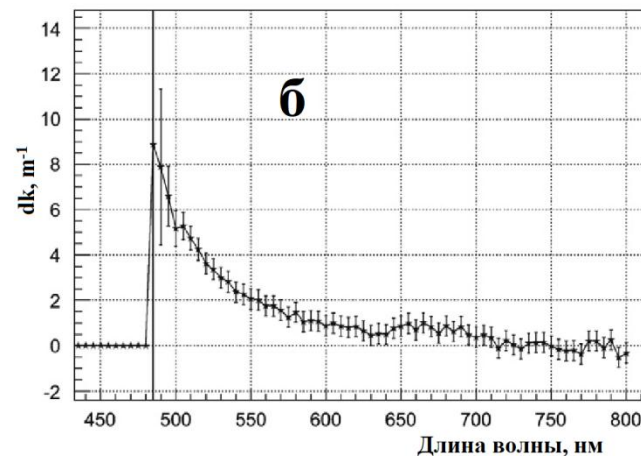
Гистограмма распределения вероятности испускания  $\gamma$ -квантов разной множественности в ходе реакции  $\text{Gd}(n, \gamma)$

# Радиационная стойкость к различным компонентам ионизирующего излучения



Оптическое пропускание кристалла GAGG:Ce,Mg до (зелёная) и после облучения  $\gamma$ -квантами поглощённой дозы 120 кГр (красная)

Временные константы кинетики высвечивания и их весовые коэффициенты, нс (%)	33 (30), 86 (56), 130 (14)
CTR (+20 °C), пс	165±3
Энергетическое разрешение, %	7,6
Световой выход, фотонов/МэВ	39000
Максимум спектра испускания, нм	540
$dk, m^{-1}$ (поглощённая доза при облучении $\gamma$ -квантами 120 кГр)	0,6 ± 0,3

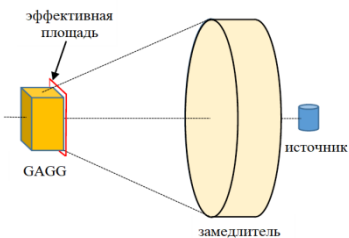


Оптическое пропускание кристалла GAGG:Ce,Mg до (звёздочки) и после (кружки) облучения протонами с флюенсом  $3,1 \cdot 10^{15}$  протон/см<sup>2</sup>

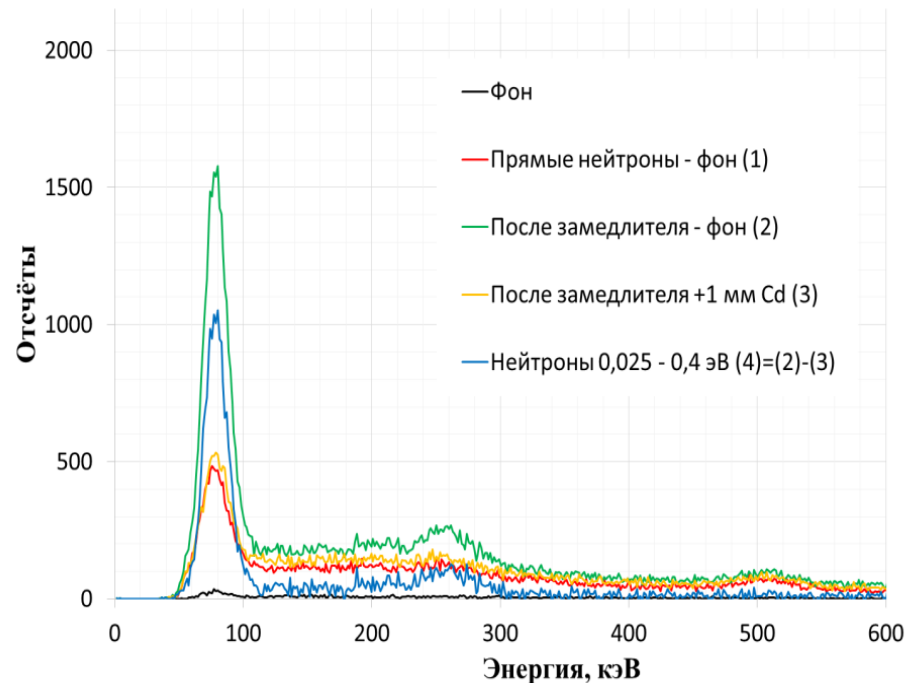
Достигнутые параметры материала позволили приступить к созданию детекторов нейтронов на его основе

# Отклик детектора на основе кристалла GAGG к Am-Be источнику нейтронов (сертифицированный стенд для измерения нейтронов в АТОМТЕХ, Беларусь)

Амплитудный спектр отклика к Am-Be источнику нейтронов

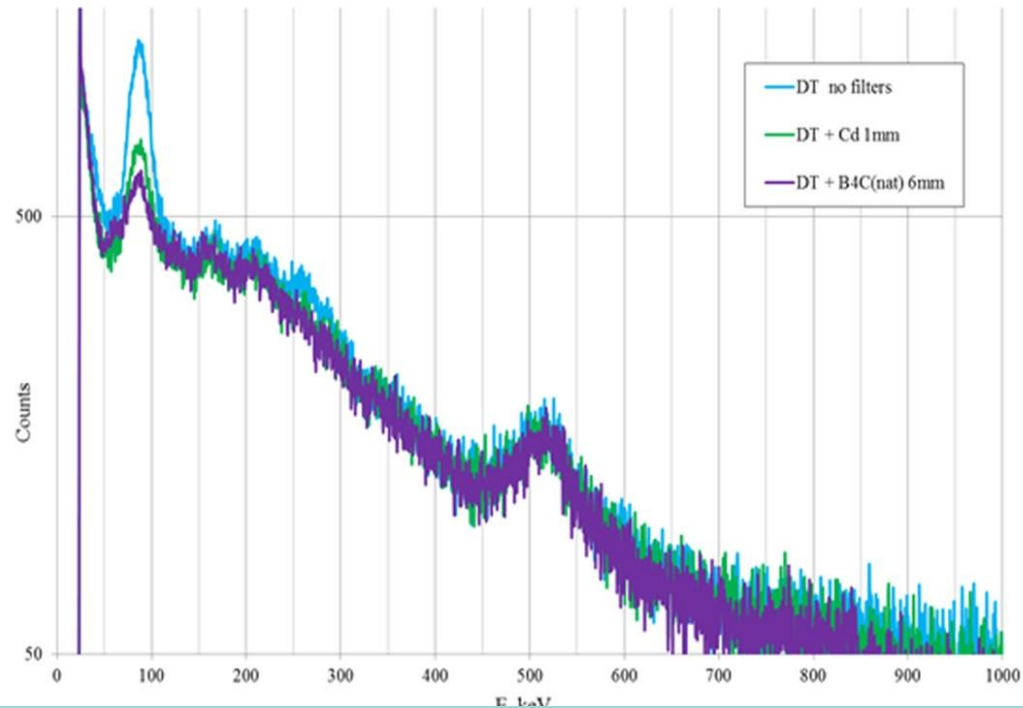


Стенд АТ-140 и принципиальная схема геометрии эксперимента



Диапазон энергии $\gamma$ -квантов, кэВ	Быстрые нейтроны		Тепловые нейтроны	
	Чувствительность (нейтрон/см <sup>2</sup> с)	Эффективность регистрации нейтронов (%)	Чувствительность (нейтрон/см <sup>2</sup> с)	Эффективность регистрации нейтронов (%)
45-305	0,182	9,29	1,64	64,6
45-1000	0,298	15,2	2,04	80,3

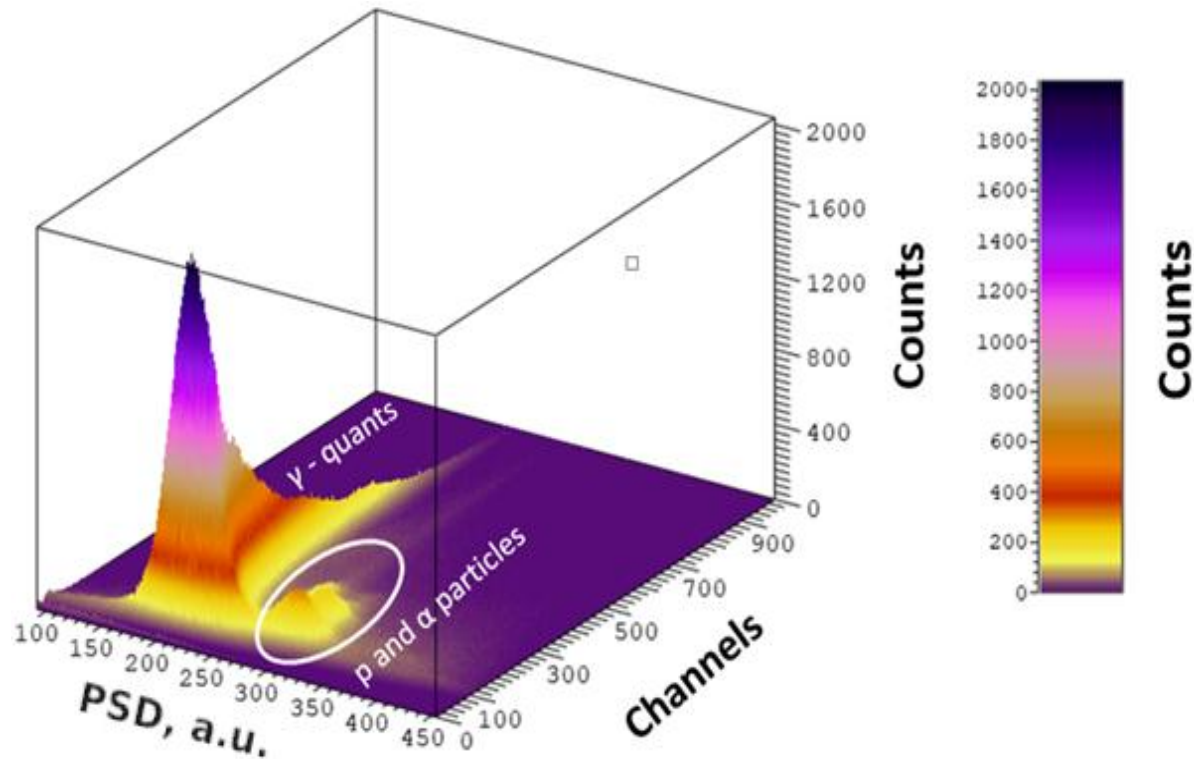
# Отклик детектора к импульсному нейтронному генератору 14.6 МэВ и разделение по форме импульса фона и сигналов быстрых нейтронов



Амплитудные спектры, измеренные с помощью сцинтиллятора GAGG:Ce при облучении генератора нейтронов (синяя линия). Зеленой и фиолетовой линиями показаны спектры, полученные с помощью фильтров Cd 1 мм и B4C 5 мм соответственно, установленных между детектором и генератором нейтронов.

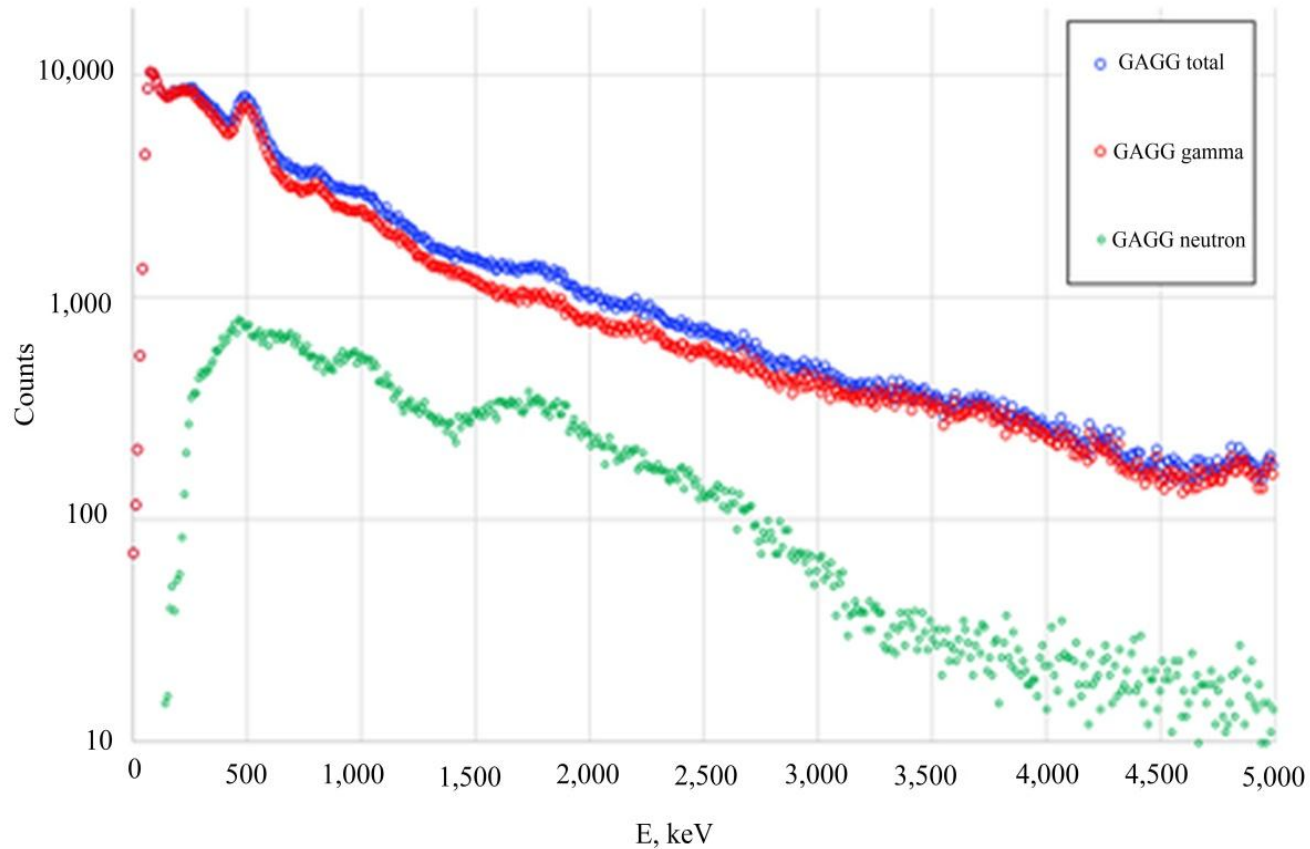


# Разделение по форме импульса гамма-квантов и вторичных частиц ( $\alpha$ и $p$ ), образованных нейтронами

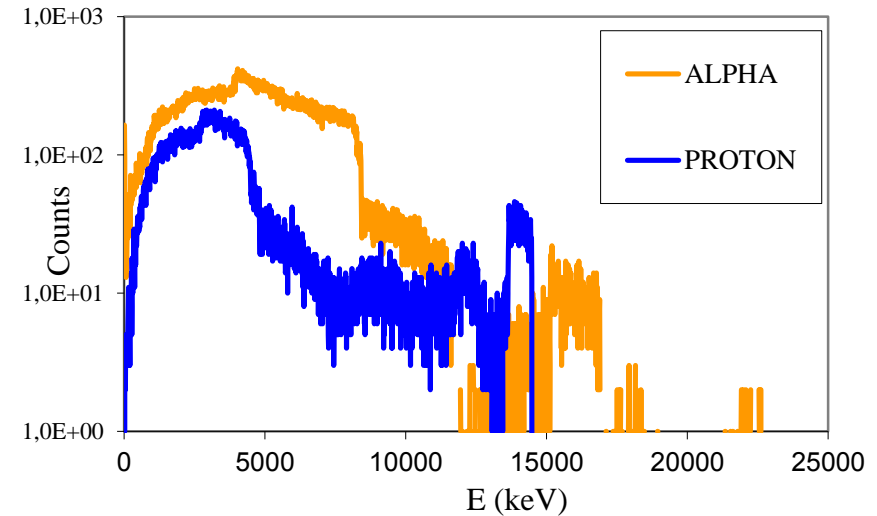
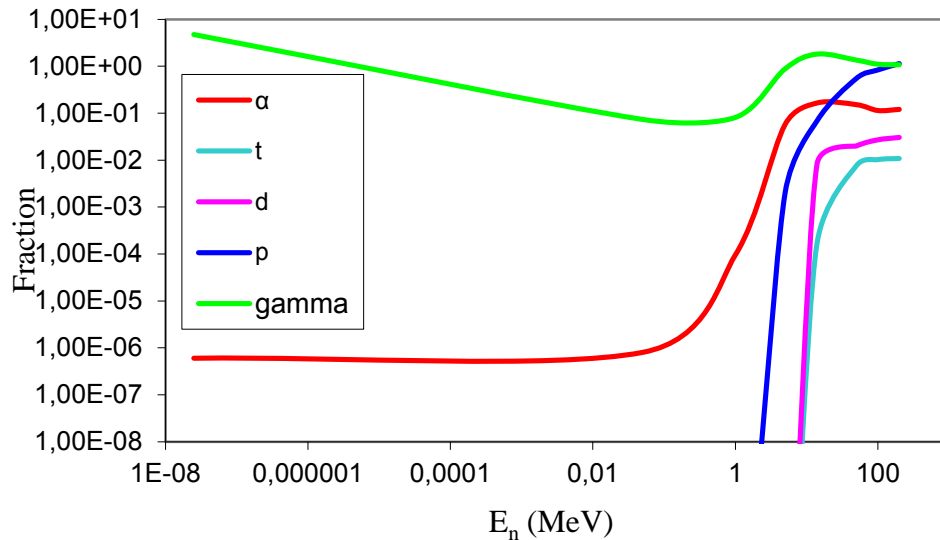


Трехмерная гистограмма импульсов сцинтилляционного кристалла GAGG:Ce, зарегистрированных при облучении нейтронами с энергией  $E_n = 14,6$  МэВ.

# Выделение сигнала, обусловленного нейтронами на фоне $\gamma$ -квантов



# Результаты GEANT4 моделирования



Оценка среднего числа частиц разных типов, испускаемых при попадании одного нейтрона с энергией  $E_n$  в GAGG:Ce 24×24×40 мм (без поправки на эффективность регистрации).

Результаты моделирования энергетического распределения вторичных  $\alpha$ -частиц и протонов в GAGG:Ce при облучении нейтронами с энергией 14,6 МэВ.

Сравнивая данные моделирования можно утверждать, что сигналы от вторичных протонов должны доминировать в спектре отклика заряженных частиц, при этом они должны быть сдвинуты в низкоэнергетическую область относительно  $\alpha$ -частиц. Это хорошо коррелирует с результатами измерений и разделением сигналов по форме импульса: от сигналов  $\gamma$ -квантов отделяются два пика, которые можно отнести к вторичным  $\alpha$ -частицам и протонам, соответственно.

# Регистрация релятивистских нейтронов методом времени пролёта (time-of-flight)

$$E_n = \frac{m_n c^2}{1 - \sqrt{\left(\frac{S_n}{t_n \cdot c}\right)^2}} - 1, \text{ где}$$

$m_n$  – масса покоя нейтрона,

$c$  – скорость света,

$E_n$  – кинетическая энергия нейтрона,

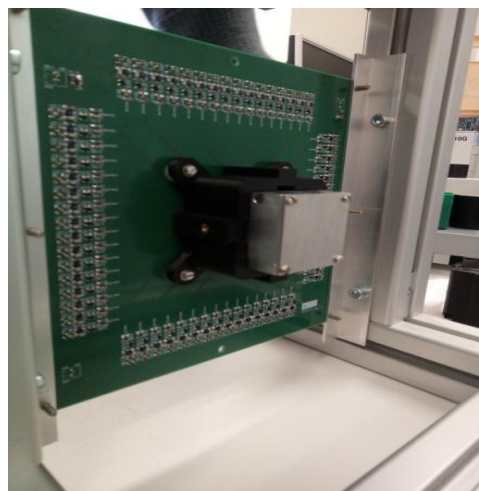
$S_n$  – длина пролёта,

$t_n$  – время пролёта нейтрона

- 64 GAGG кристаллов (3x3x40 мм<sup>3</sup>)
- Материал отражателя: MYLAR®
- Оснащён 64 SiPM-ами
- Иммерсионный слой Baysilone® M 300.000



Матрица GAGG в алюминиевом корпусе

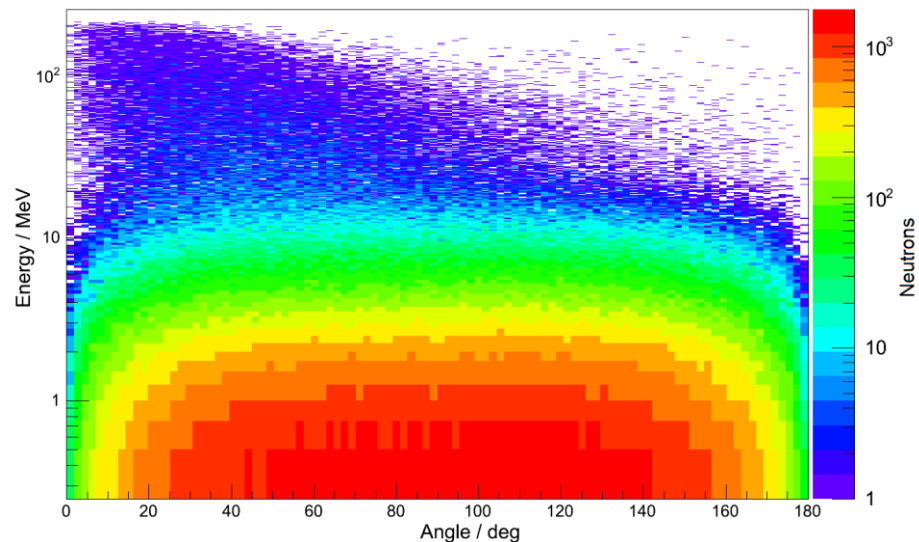
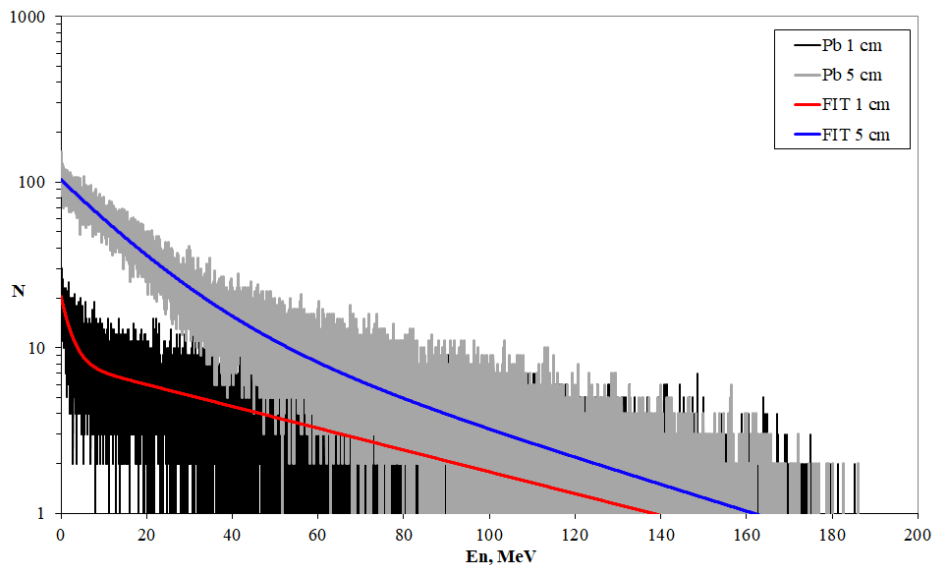


GAGG матрица соединённая с платой предусилителей



Система сбора данных

# Получение нейтронов высоких энергий

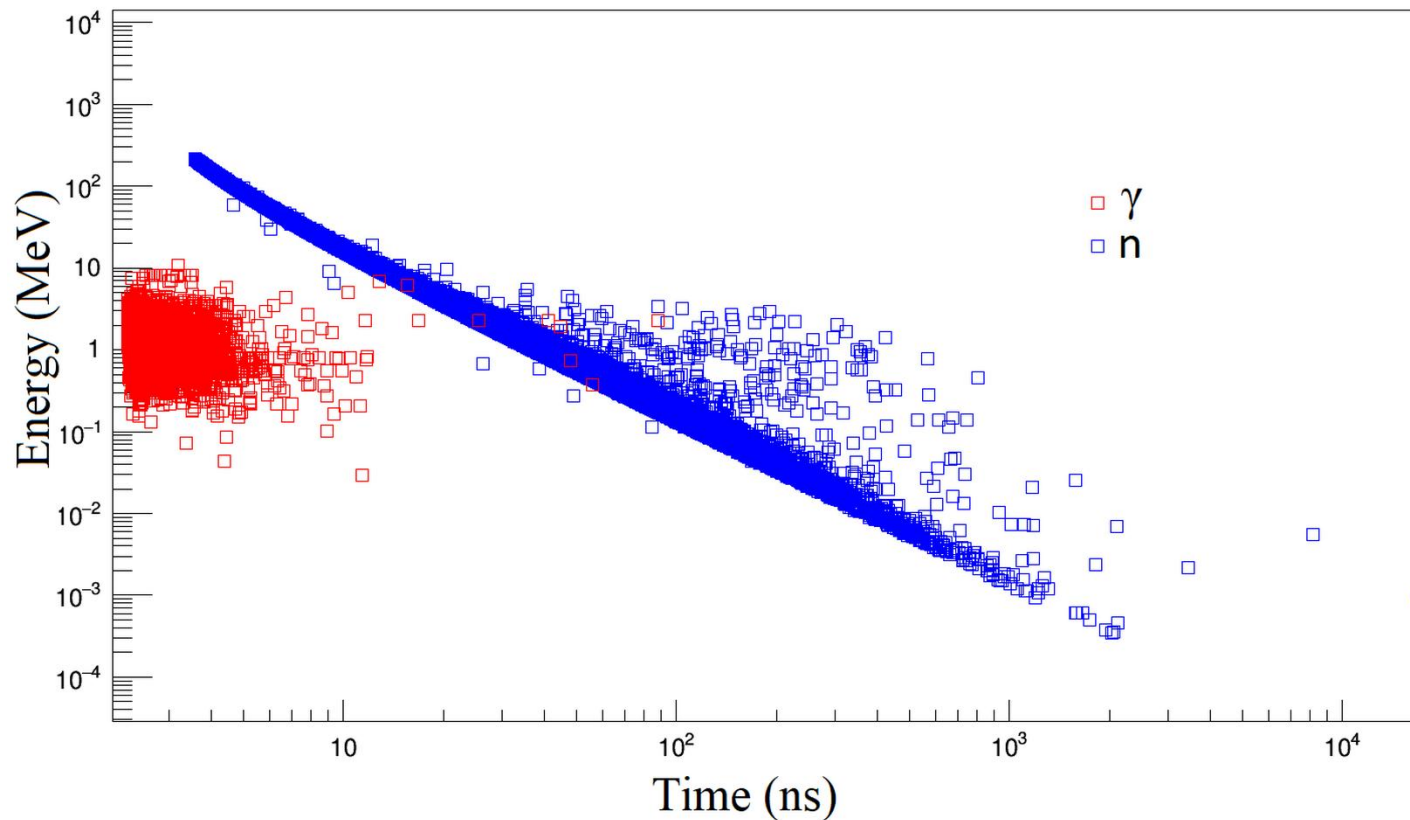


Энергетические спектры нейтронов, испускаемых свинцовой мишенью при различной толщине мишени и облучении протонами 220 МэВ.

Моделировалось распределение нейтронов по энергии и углам вылета за пределами мишени размером  $10 \times 10 \times 6$  см. Нейтроны - от  $(p,n)$ -реакции в мишени,  $E_p = 220$  МэВ, углы указаны относительно исходного направления пучка протонов.

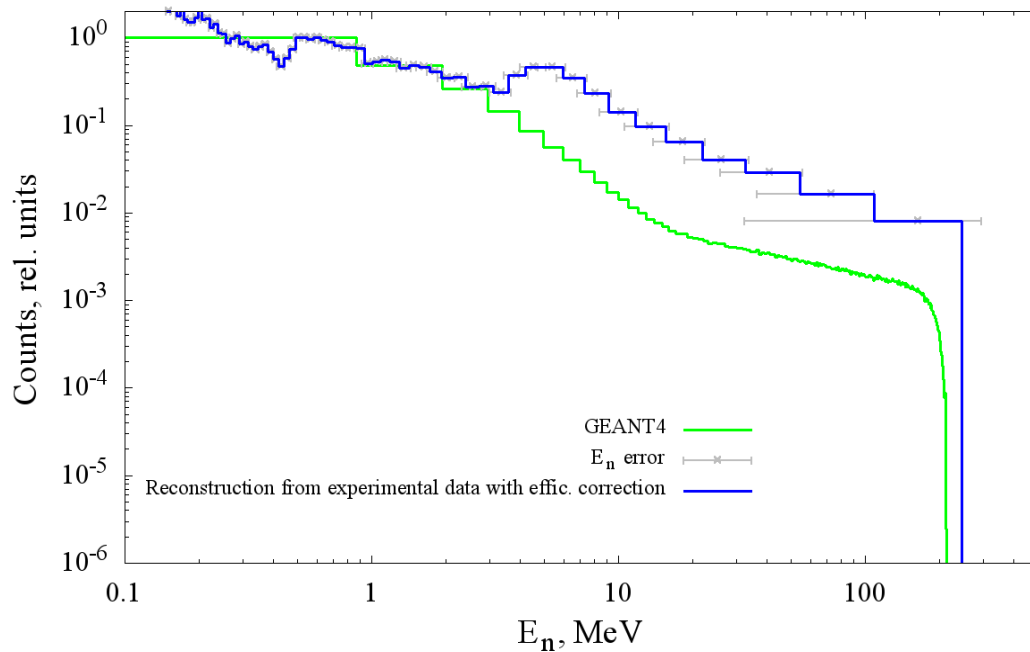


# Результаты GEANT4 моделирования



Смоделированная зависимость энергии нейтронов и  $\gamma$ -квантов от времени регистрации в объеме **матрицы** детектора. Свинцовая мишень размерами  $10 \times 10 \times 6$  см находилась на расстоянии 0,5 м.

# Восстановление спектра излученных нейтронов на короткой базе 0.5 м



Восстановленный энергетический спектр нейтронов в сравнении с результатами моделирования GEANT4. Столбики погрешностей рассчитывались для оценки фиксированного временного разрешения 1 нс (с учетом релятивистских поправок).

Матрица GAGG:Ce может использоваться для регистрации нейтронов в широком диапазоне энергий. Исследована возможность времяпролетной регистрации быстрых нейтронов с помощью пиксельного детектора на основе сцинтилляционного кристалла GAGG:Ce. Анализ полученных данных демонстрирует способность прототипа различать по времени пролета быстрые нейтроны от сопутствующих  $\gamma$ -квантов и эпитептермальных нейтронов.

# ПРИЛОЖЕНИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ НИУ НИИ ЯП В СОЗДАНИИ УСТАНОВОК

1. В рамках компетенций, развитых в НИИ ЯП БГУ по детектированию нейтронов, НИИ ЯП может принять участие в качестве соисполнителя по выполнению пункта 4. Проекта программы " Экспериментальное оснащение реактора МБИР".
2. Мы заинтересованы в кооперации, предполагающей широкое участие специалистов и организаций РБ в создании экспериментальных установок и их эксплуатации.
3. Готовы выступить соисполнителем по разработке и организации производства на территории РФ или РБ следующего измерительного оборудования:
  - 3.1 Разработка линейки детекторов нейтронов, от тепловых до эпitherмальных, на основе элементной базы, выпускаемой в РФ и РБ, создание прототипов и их испытание.
  - 3.2 Разработка прямопоказывающего носимого индикатора нейтронного излучения на основе элементной базы, выпускаемой в РФ и РБ, создание прототипов и их испытание.
  - 3.3 Разработка прямопоказывающего носимого дозиметра тепловых нейтронов на основе элементной базы, выпускаемой в РФ и РБ, создание прототипов и их Испытание.