



ВНИИА  
РОСАТОМ

# **Измерение отклика гамма- детекторов при облучении 14 МэВ нейтронами**

*В.Ф. Батяев, С.Г. Беличенко, М.Д. Каратников, А.Д.  
Мазницин, А.Ю. Пресняков*



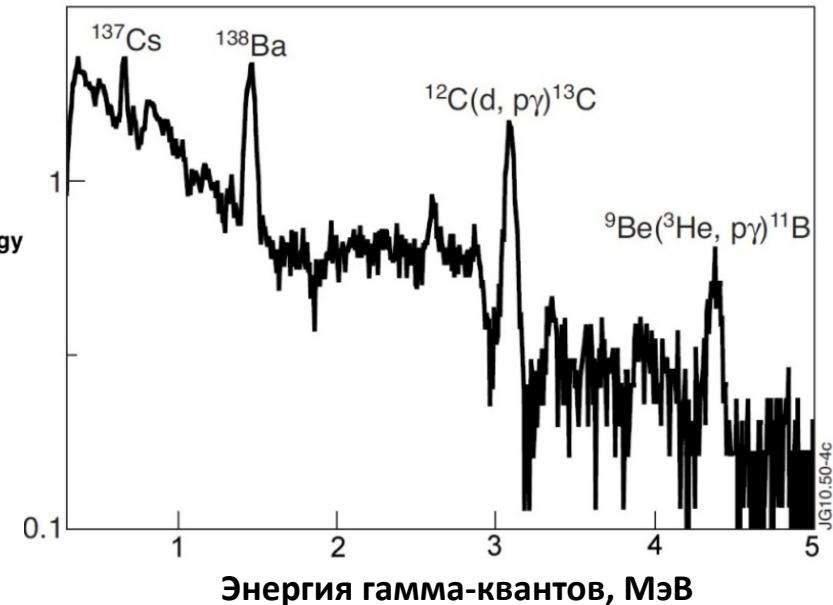
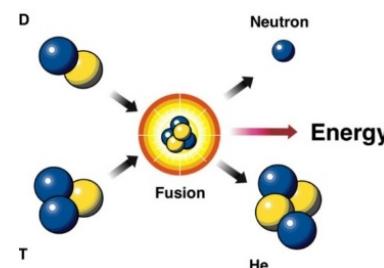
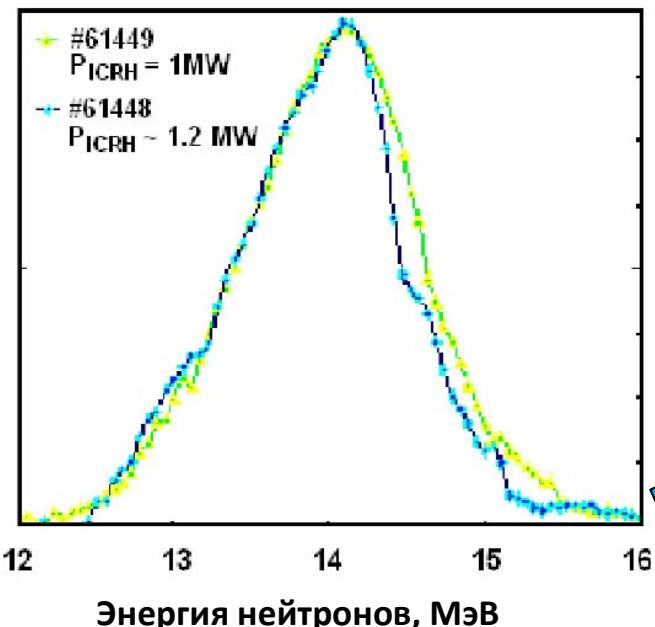
# Содержание



1. Актуальность задачи.
2. Особенности гамма-спектрометрии при нейтронном фоне.
3. Световойход в сцинтилляторе при нейтронном облучении.
4. Метод меченых нейтронов для измерения отклика гамма-детектора при воздействии 14 МэВ нейтронов.
5. Результаты измерений и сравнение с аналогичными экспериментами.
6. Метод меченых нейтронов для измерения отклика гамма-детекторов от рассеянных нейтронов с энергией меньше 14 МэВ

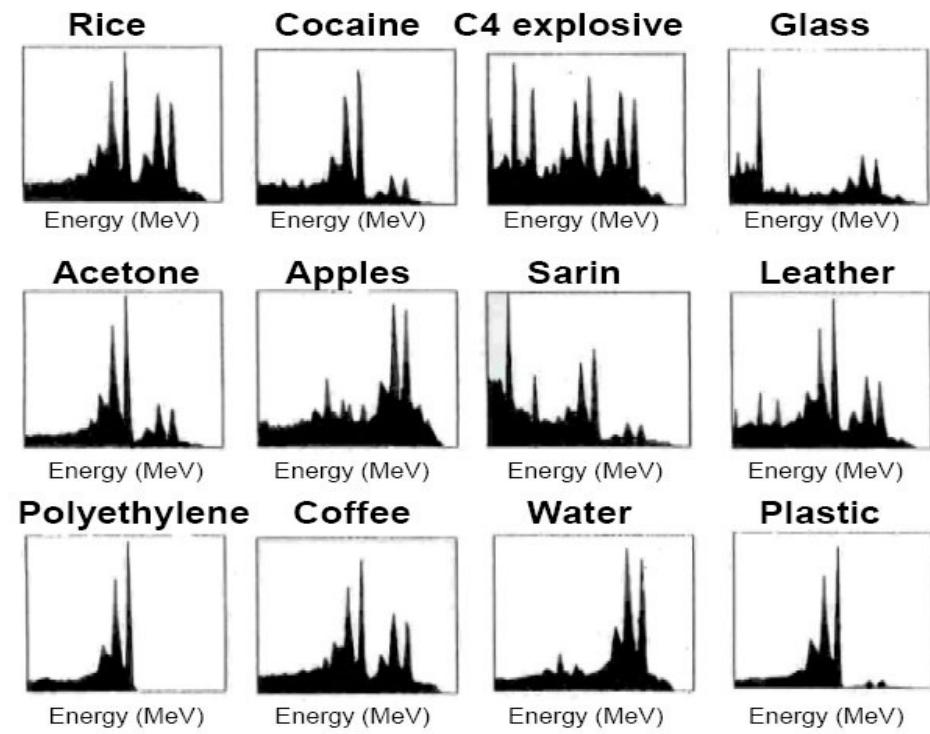
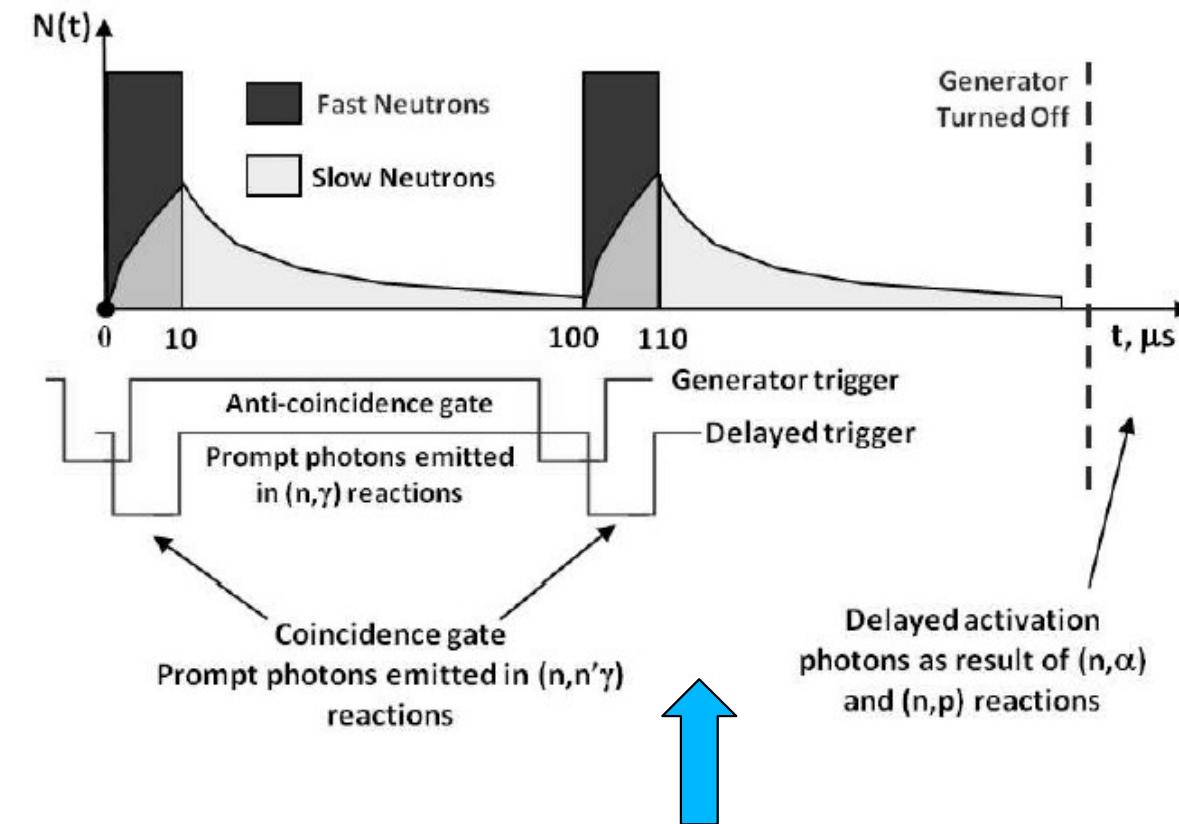
# Гамма-спектрометрия термоядерной плазмы

1. Измерение температуры быстрых ионов
2. Исследование магнитогидродинамических неустойчивостей
3. Определение содержания примесей



Измерения гамма-излучения производятся при сильном нейтронном фоне

# Активационный анализ на быстрых нейтронах



Необходимо выделять сигнал от  
гамма-квантов на фоне сигналов от  
быстрых нейтронов

# Особенности гамма-спектрометрии в условиях нейтронного фона



1. Измерение спектра смешанного гамма-нейтронного излучения.
2. Измерение отдельно нейтронного спектра  $S(E_n)$  детекторами нейтронов.
3. **Измерение отклика гамма-детекторов  $R(E, E_n)$  при воздействии нейтронного излучения со спектром  $S(E_n)$ .**
4. Оценка вклада нейтронного излучения в спектр смешанного гамма-нейтронного излучения.
5. Вычитание нейтронной составляющей из спектра смешанного гамма-нейтронного излучения.

# Требования к гамма-детекторам для спектрометрии в нейтронных полях

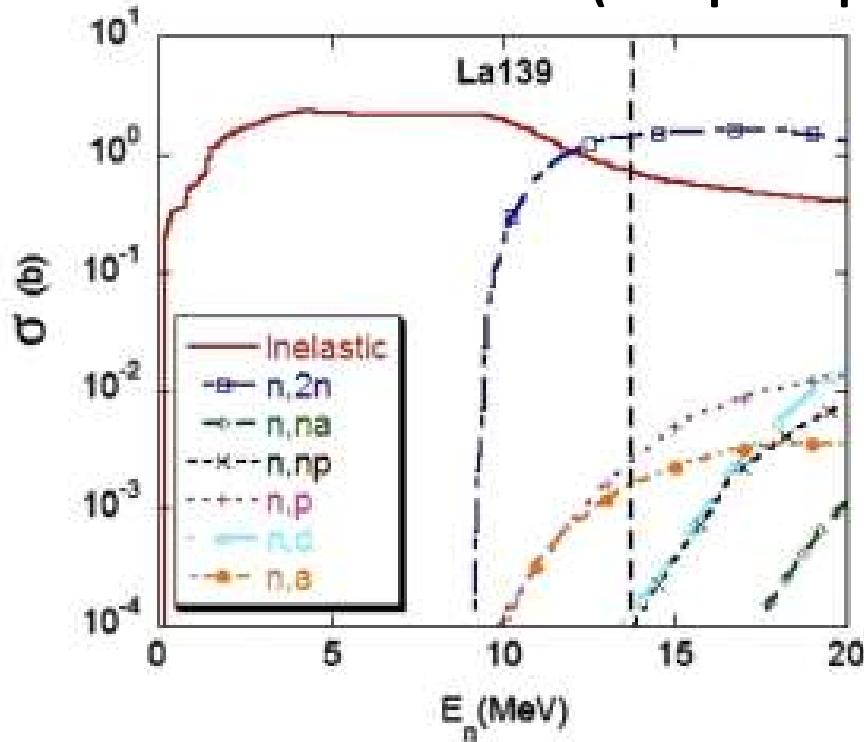


- Высокий световой выход для хорошего энергетического разрешения.
- Малое время высвечивания для работы при больших загрузках.
- Спектральный диапазон высвечивания, близкий спектральной чувствительности ФЭУ.
- Малая радиационная длина для высокой эффективности регистрации в фотопике.
- Радиационная стойкость.

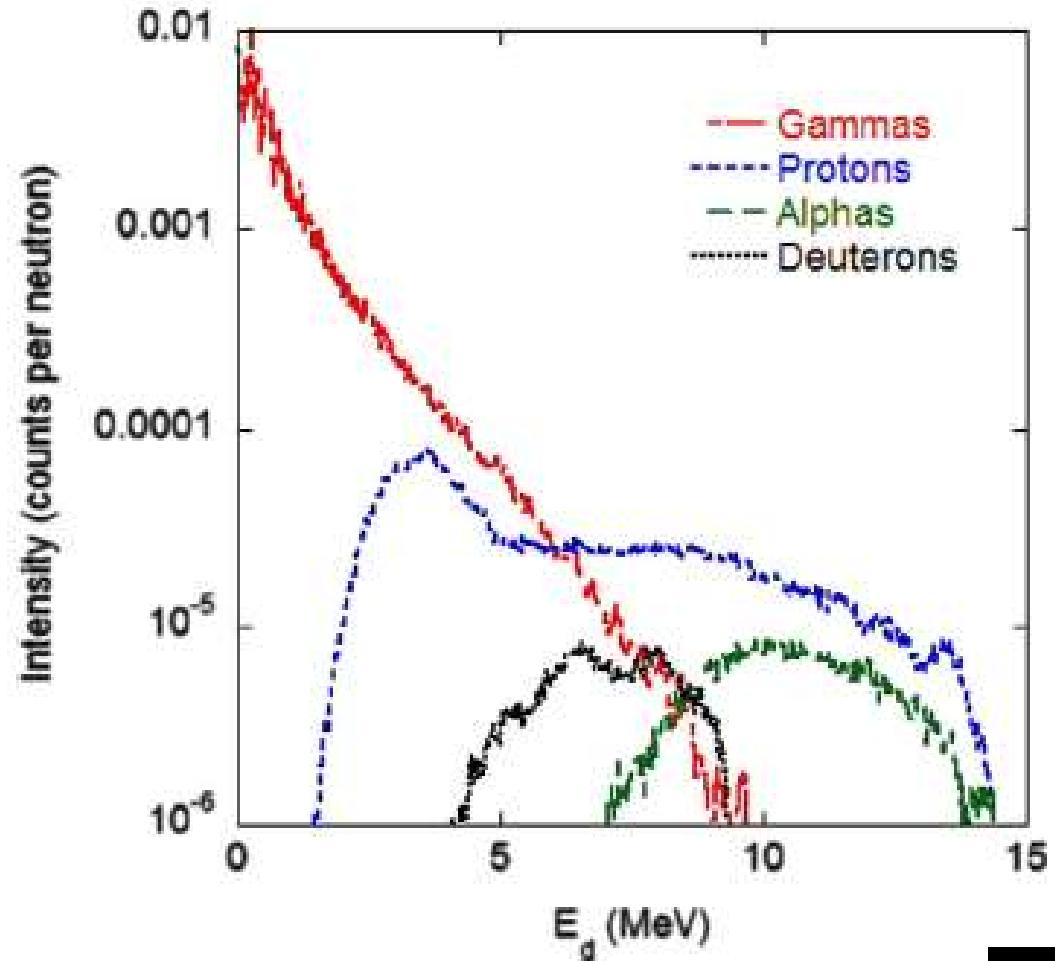
## Параметры гамма-детекторов с быстрыми неорганическими сцинтилляторами

Параметр	Сцинтиллятор			
	LYSO	LaBr <sub>3</sub> (Ce)	BGO	NaI(Tl)
Плотность, г/см <sup>3</sup>	7.4	5.29	7.13	3.67
Эффективность в фотопике для 1.33 МэВ, %	71	43	69	32
Время высвечивания, нс	40	16	300	250
Энергетическое разрешение для пика 1,33 МэВ, %	6.6	2.3	7.3	7.0
Радиационный ресурс, рад	$10^5 - 10^6$	$10^3 - 10^4$	$10^4 - 10^5$	$10^3 - 10^4$
Температурный коэффициент, %/град	+0.04	-0.02	-(1 – 1,5)	-0.3

## Реакции в сцинтилляторе при прохождении 14 МэВ нейтронов (на примере LaBr<sub>3</sub> сцинтиллятора)

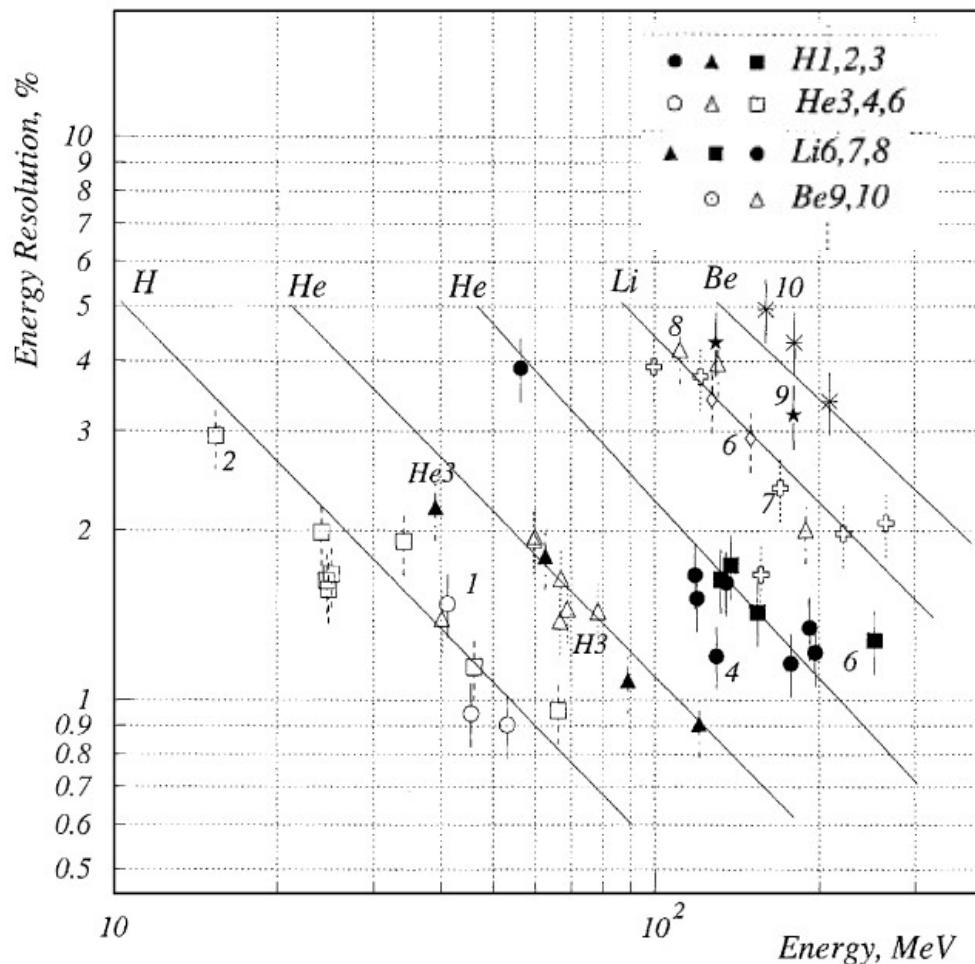


Гамма-кванты	1.178
Нейтроны ( $n,2n$ )	$4.513 \times 10^{-1}$
Протоны	$9.54 \times 10^{-3}$
Дейтроны	$7.63 \times 10^{-4}$
Альфа-частицы	$1.10 \times 10^{-3}$



# Разброс световогохода сцинтилляторов для частиц разных энергий

Зависит от качества материала и технологии изготовления



Формула Биркса

$$dL/dx = \text{const.} \frac{dE/dx}{1 + kB dE/dx}$$

$$dE/dx \simeq c \frac{AZ^2}{E}$$

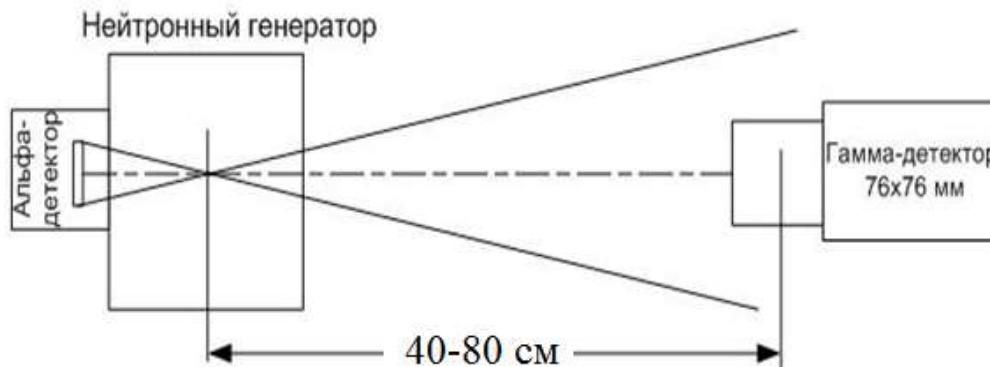
Световыход для разных частиц

$$L(E, A, Z) = a_1 \left( E - a_2 AZ^2 \ln \left| \frac{E + a_2 AZ^2}{a_2 AZ^2} \right| \right)$$

V. Avdeichikov et al. Range-energy relation, range straggling and response function of CsI(Tl), BGO and GSO(Ce) scintillators for light ions, NIM, A 439 (2000)

# Использование традиционных D-T и D-D нейтронных генераторов

## Схема эксперимента. Гамма-детектор в потоке меченых нейтронов



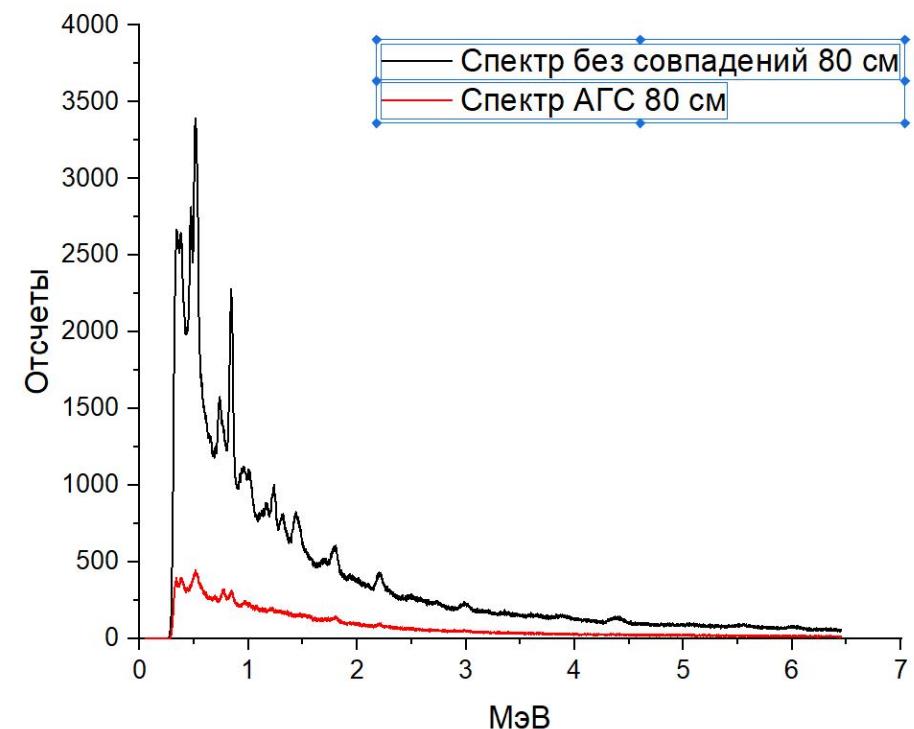
### Достоинство:

- 👍 Простота, доступность
- 👍 Фиксированная энергия нейтронов

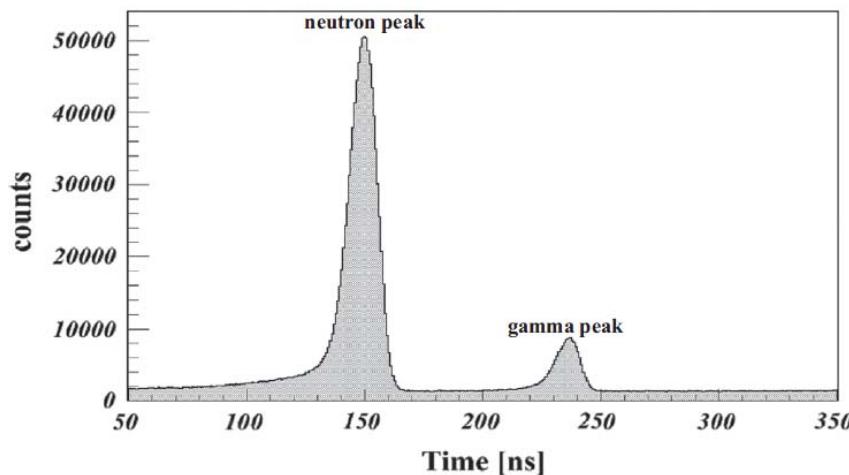
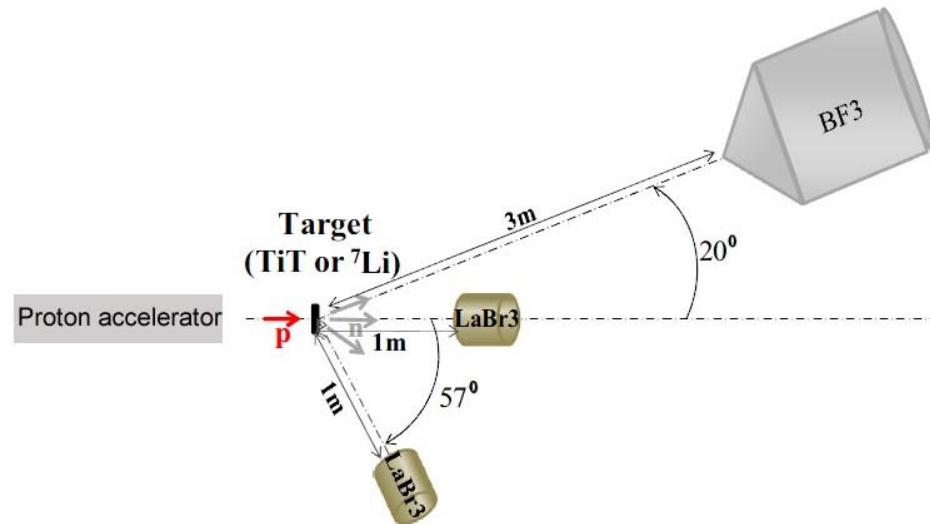
### Недостатки:

- 👎 Большая (до 15%) погрешность мониторирования потока нейтронов
- 👎 Высокий уровень фона

## Сравнение спектра без совпадений и спектра от меченых нейтронов на расстоянии 80 см



# Времяпролетный метод измерения нейтронного отклика гамма-детектора



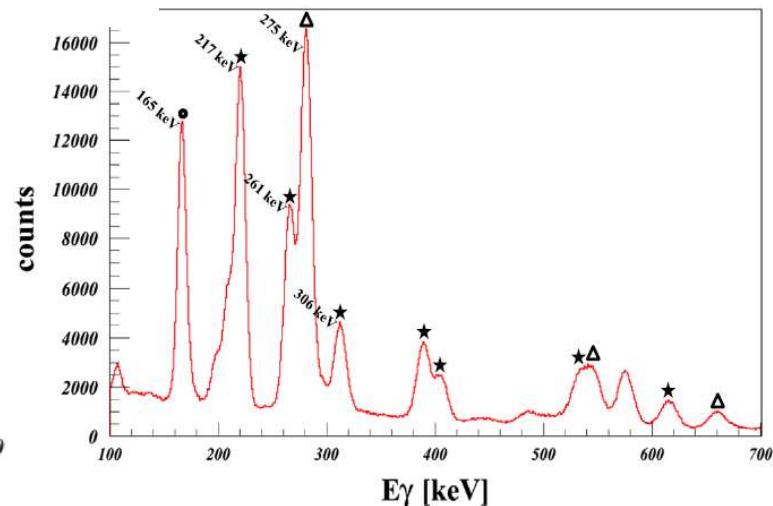
## Достоинство:

👍 Широкий диапазон энергий нейтронов

## Недостатки:

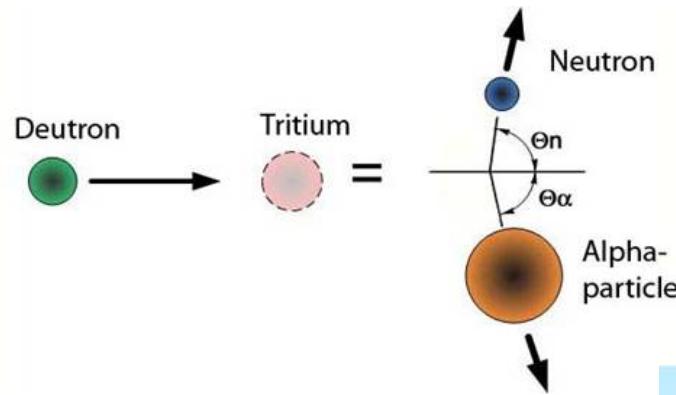
👎 Высокая стоимость и сложность реализации

👎 Большая длительность облучения из-за требования отсутствия наложения сигналов



A.Ebran, O.Roig, V.Méot et al. Neutron efficiency of LaBr<sub>3</sub>:Ce detector, NIM A768 (2014)

## Метод меченых нейтронов

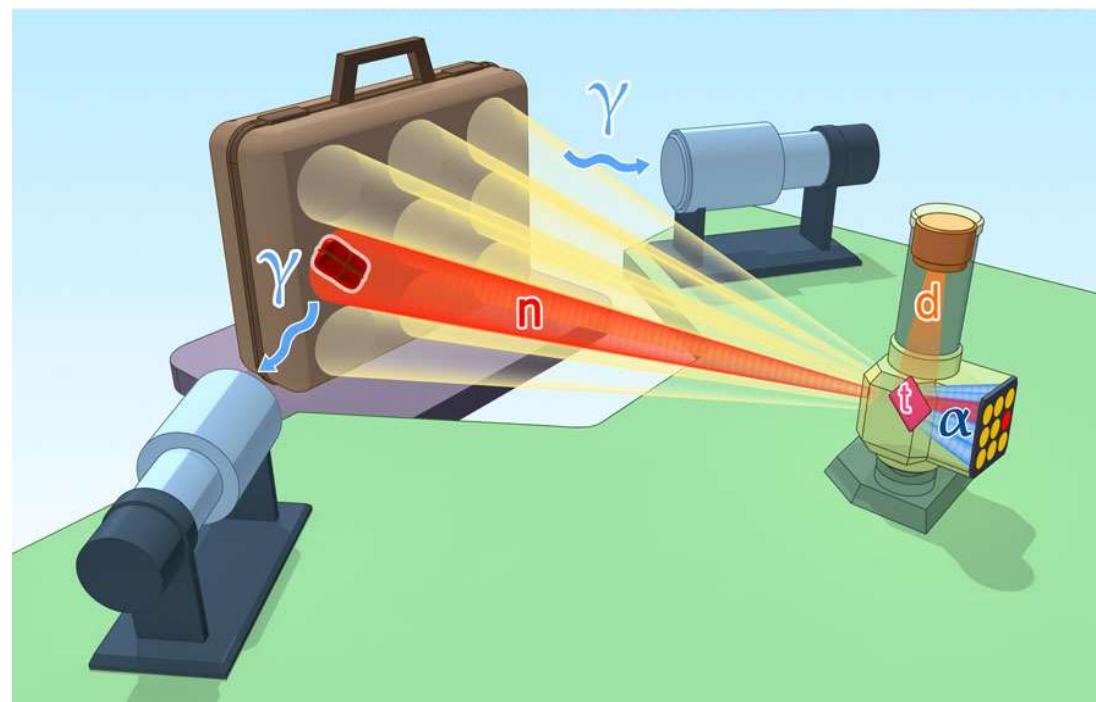


$$W_d + W_Q = W_\alpha + W_n$$

$$p_\alpha^2 = p_n^2 + p_d^2 - 2 p_n p_d \cos \theta_{n-d}$$

$$p_n^2 = p_\alpha^2 + p_d^2 - 2 p_\alpha p_d \theta_{\alpha-d}$$

For  $\theta_{\alpha-d} = 90^\circ$

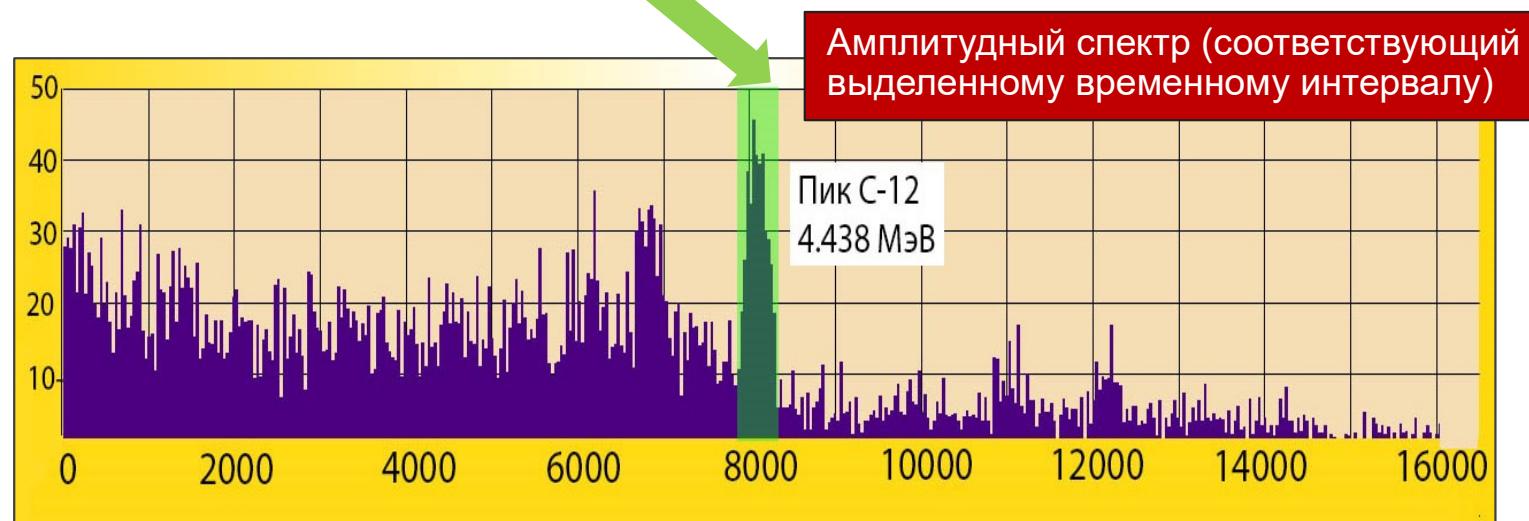
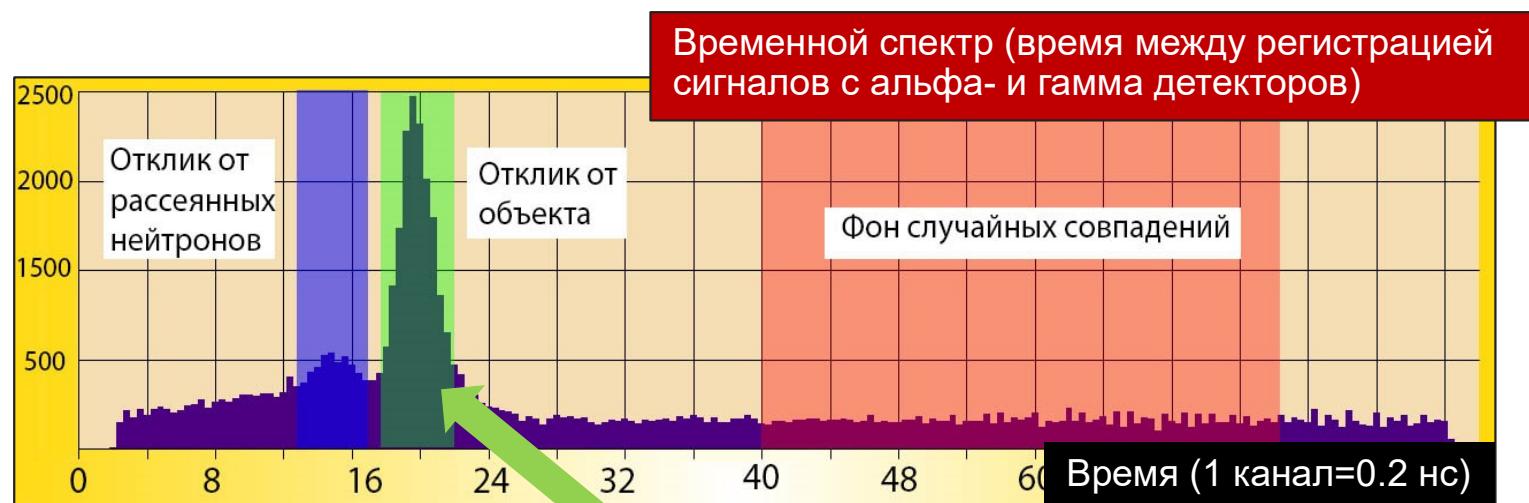


$$W_n \approx \frac{6W_d + 4W_Q}{5}$$

$$W_\alpha \approx \frac{W_Q - 5W_d}{5}$$

$$\theta_{n-d} \approx \sqrt{\frac{5W_d}{3W_d + 2W_Q}}$$

## Амплитудно-временной спектр альфа-гамма совпадений



## Особенности устройств с меченными нейтронами

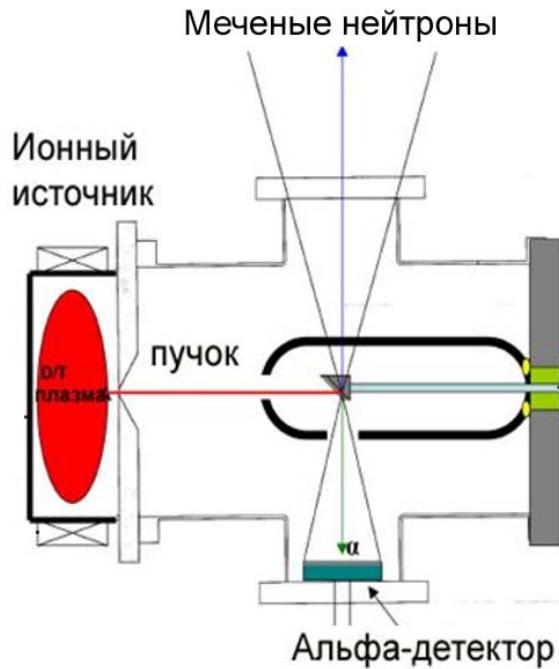
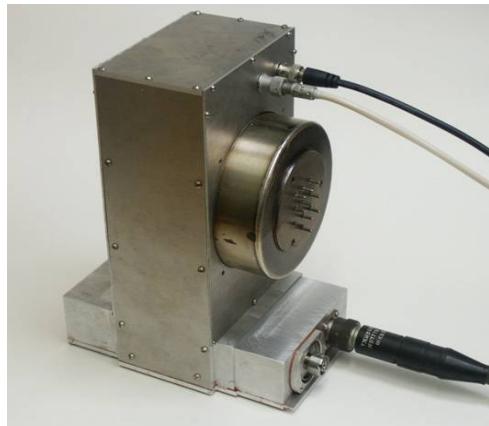


- Измерение с помощью встроенного а-детектора нейтронного потока с абсолютной погрешностью менее 5% и относительной менее 1% в широком диапазоне потока нейтронного генератора.
- Измерение угла вылета 14 МэВ нейтронов с погрешностью до 0,02 рад и пространственных координат места взаимодействия меченых нейтронов с ядрами вещества с погрешностью 5-10 см.
- Высокое отношение эффект/фон за счет пространственно-временной дискриминация событий, обусловленных взаимодействием с веществом «немеченых» нейтронов и вторичного излучения.
- Возможность калибровки гамма-детекторов непосредственно в экспериментах с помощью специальных объектов-калибраторов при прохождении в которых меченых нейтронов испускаются гамма-линии, которые легко интерпретируются на спектре ММН (альфа-гамма совпадений), а также с помощью эталонных радиоизотопов по спектру без совпадений с минимально значимым присутствием пиков от этих радиоизотопов на спектре ММН.

# Генераторы меченых нейтронов ФГП ВНИИА



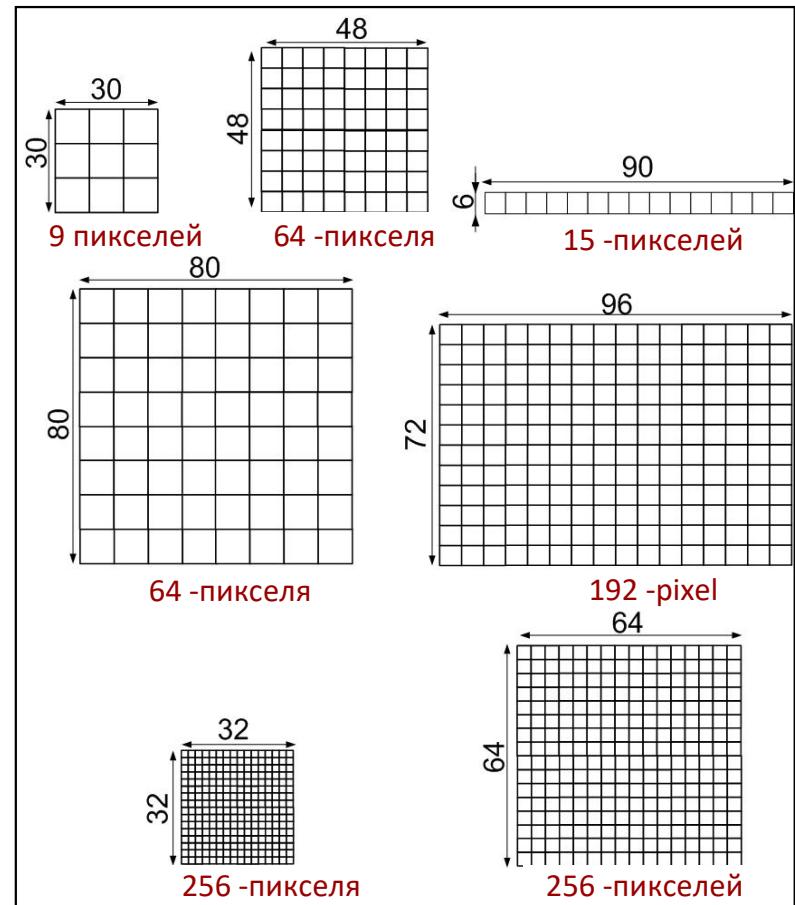
Генератор ИНГ-27 с  
9-пиксельным  $\alpha$ -детектором



Генератор ИНГ-27 с  
192-пиксельным  $\alpha$ -детектором



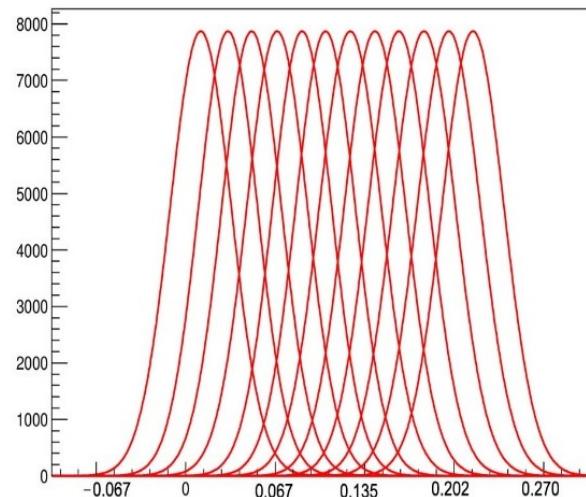
Используемые конфигурации  
альфа-детекторов



## Угловое распределение «пучков» меченых нейтронов

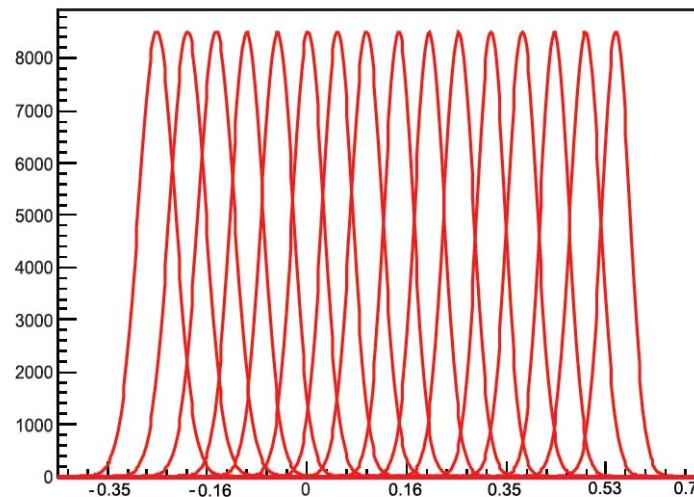
256-пиксельный нейтронный генератор

Пиксель 2 мм, L=100 мм



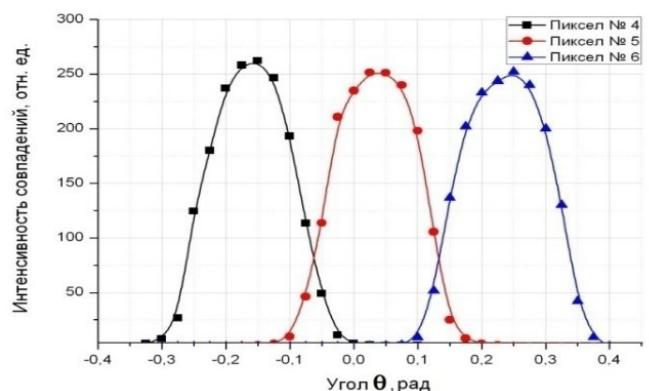
256-пиксельный нейтронный генератор

Пиксель 4 мм, L=67 мм



9-пиксельный нейтронный генератор

Пиксель 9 мм, расстояние между пикселями 11 мм, L=70 мм



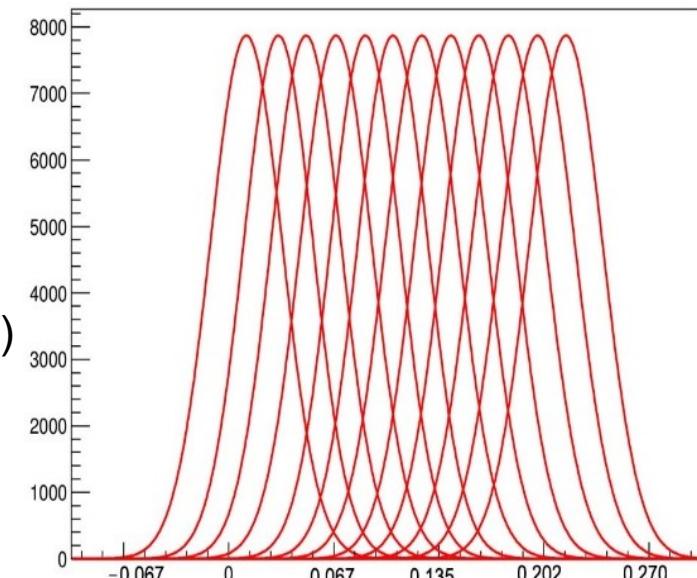
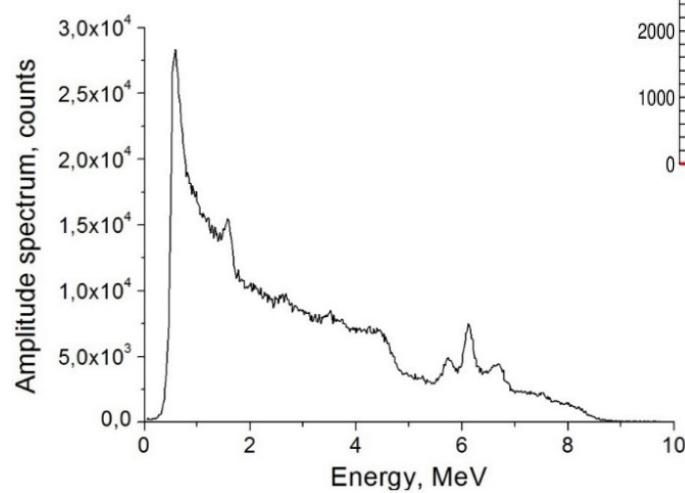
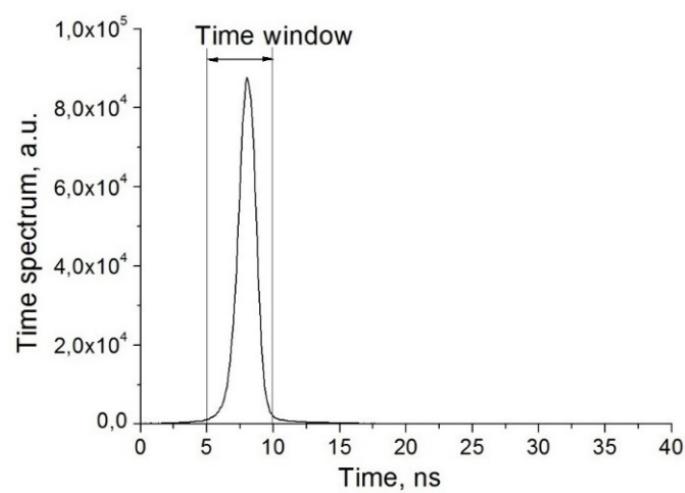
Ю.Н. Копач, М.Г. Сапожников, Применение метода меченых нейтронов для фундаментальных и прикладных исследований // Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2024, т.55, С. 103-177.

Боголюбов Е.П., Климов А.И., Каретников М.Д. и др. Угловые корреляции при регистрации альфа- гамма совпадений в наносекундном методе меченых нейтронов. // ПТЭ, № 4, 2009, с. 54.

# Измерение нейтронного отклика гамма-детектора методом меченых нейтронов

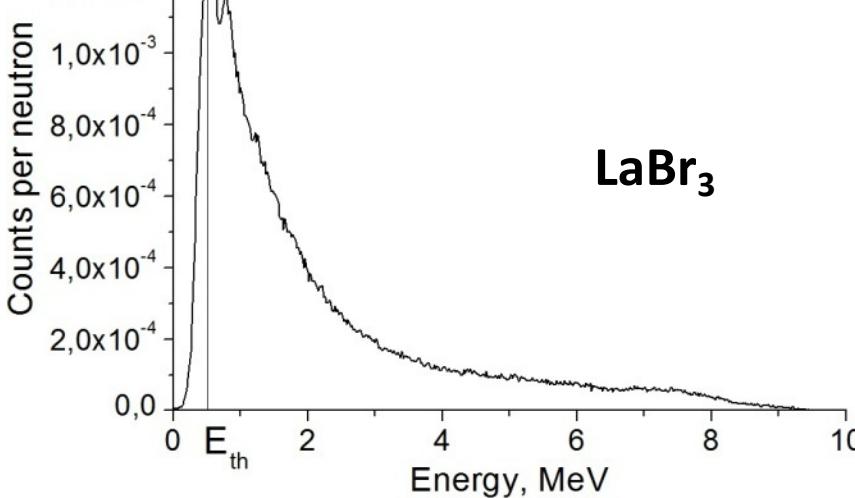
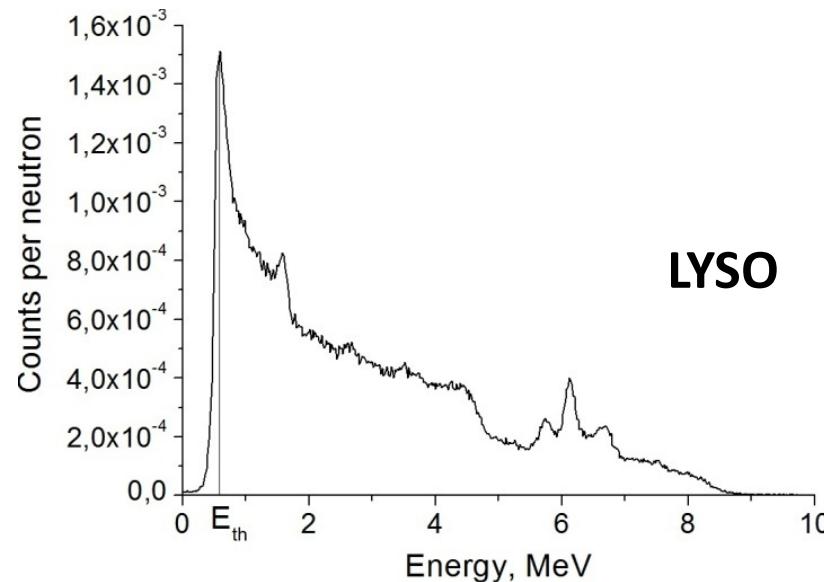
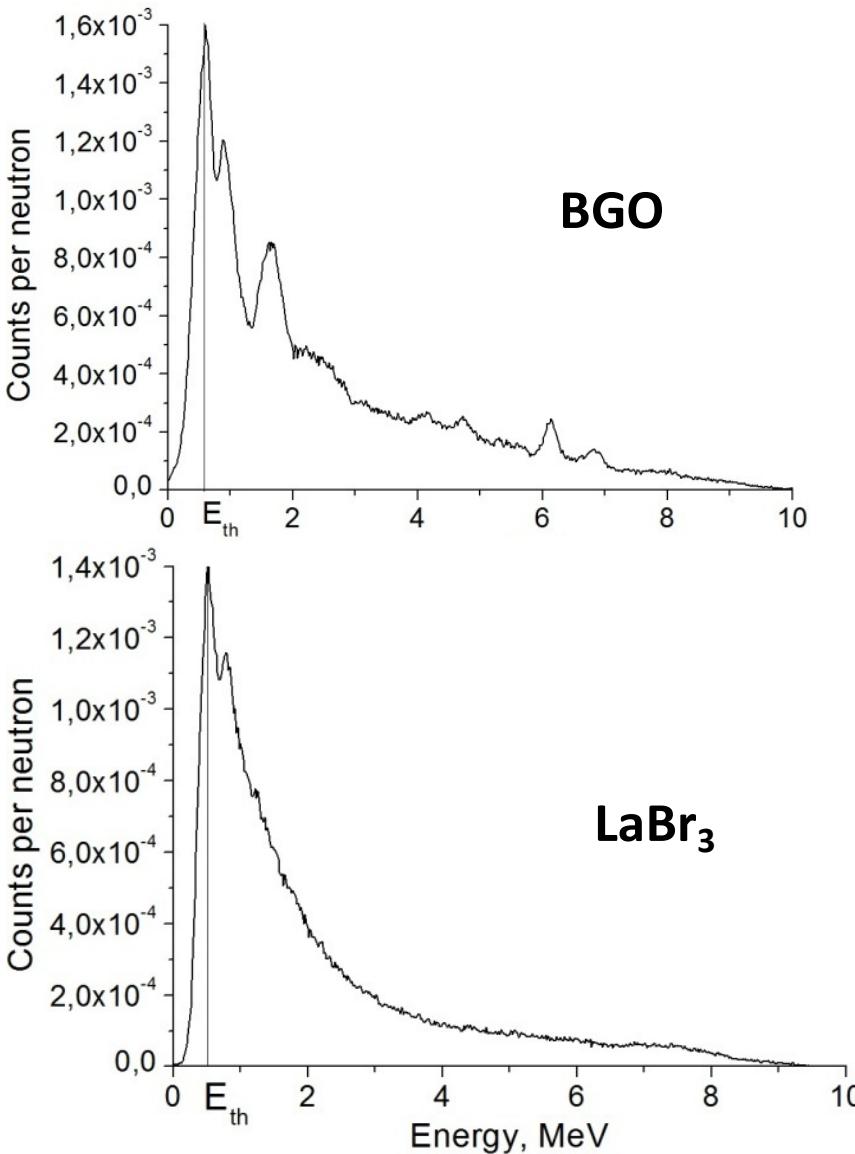


Узкий поток меченых нейтронов  $\varnothing 4.5$  мм (1 пиксель,  $L=120$  мм)  
Широкий поток меченых нейтронов  $\varnothing 100$  мм (256 пикселей,  $L=500$  мм)



Временной и амплитудный спектр альфа-гамма совпадений

## Энергетические спектры гамма-детектора, нормализованные на 1 нейтрон



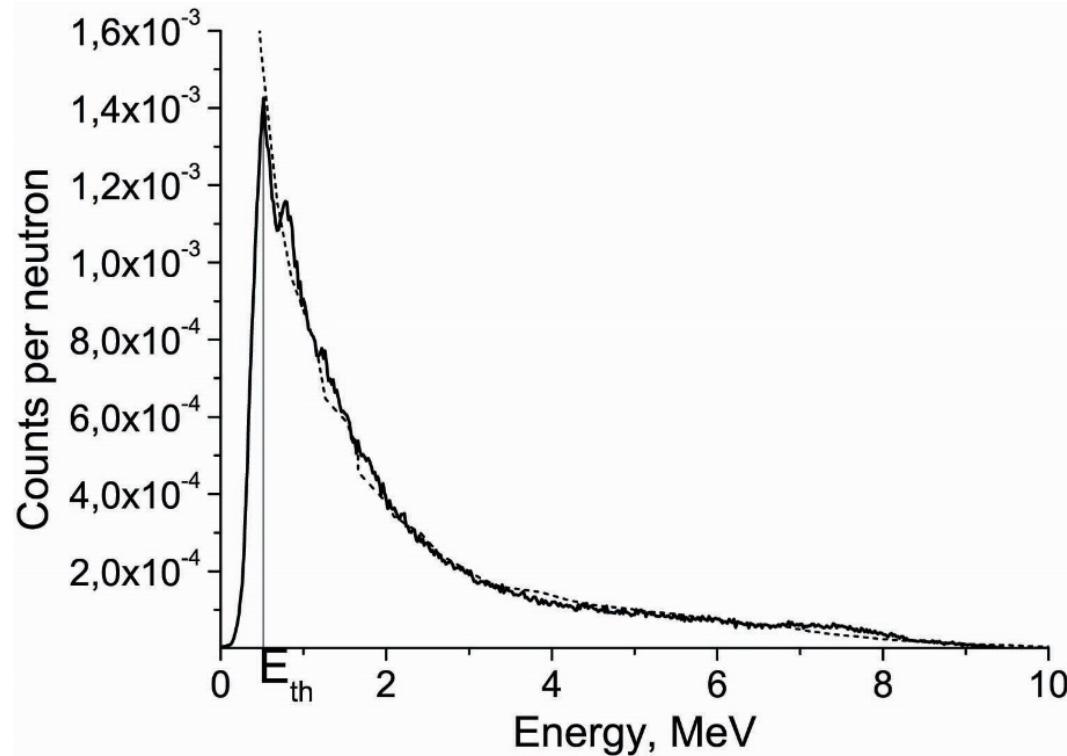
Эффективность детектирования 14-МэВ нейтрона (порог 0.6 МэВ):

**BGO - 0.50**

**LYSO - 0.56**

**LaBr<sub>3</sub> - 0.40**

# Сравнение измеренного отклика $\text{LaBr}_3$ методом меченых нейтронов и времяпролетным методом



Сплошная линия- метод меченых нейтронов

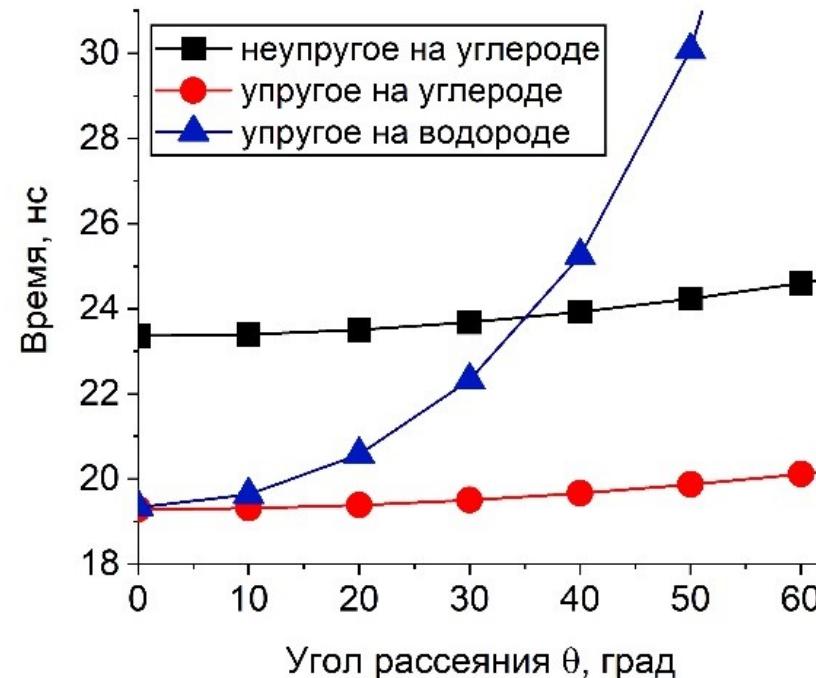
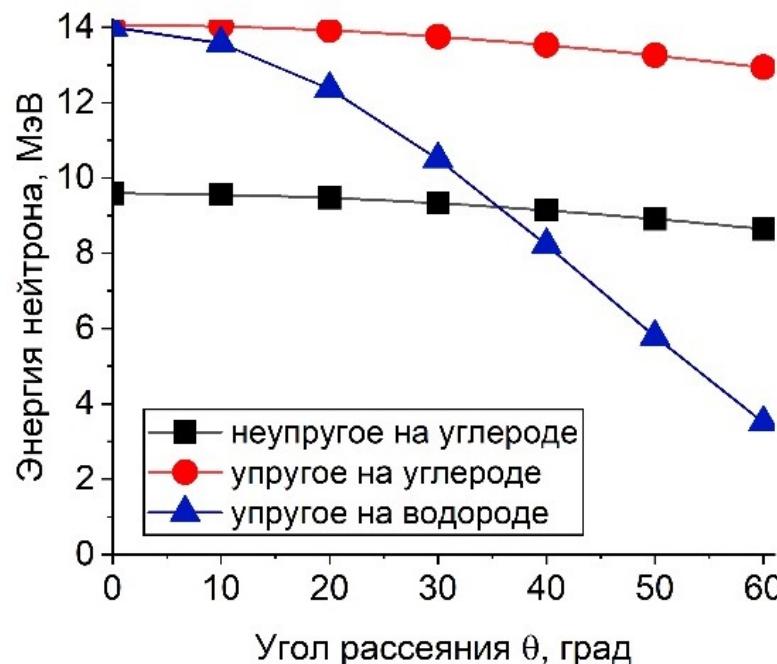
Штриховая линия- времяпролетный метод\*

\*A.Ebran, O.Roig, V.Méot et al. Neutron efficiency of  $\text{LaBr}_3:Ce$  detector, NIM A768 (2014))

## Измерение отклика гамма-детектора при прохождении рассеянных нейтронов (с энергией меньше 14 МэВ) методом меченых нейтронов

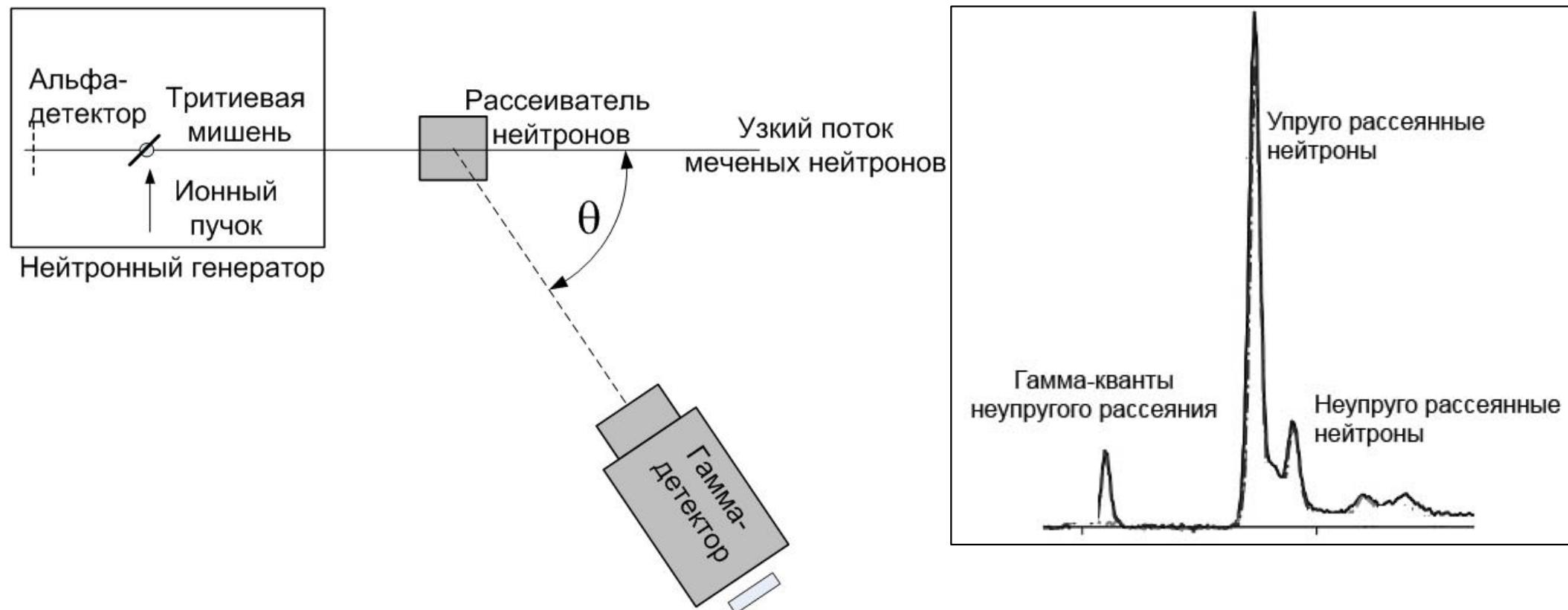
При однократном акте рассеяния энергия нейтрона зависит от угла рассеяния  $\Theta$  как

$E_n = \left( \frac{a}{2} \cos \theta + \frac{1}{2} \sqrt{a^2 \cos^2 \theta + 4b} \right)^2$ , где  $a = \frac{2}{M+1} \sqrt{E}$ ,  $b = \frac{M-1}{M+1} E - \frac{M}{M+1} U$ ,  $M$ - отношение массы ядра и нейтрона,  $U$ -энергия возбуждения ( $U>0$  при неупругом рассеянии и  $U=0$  при упругом).

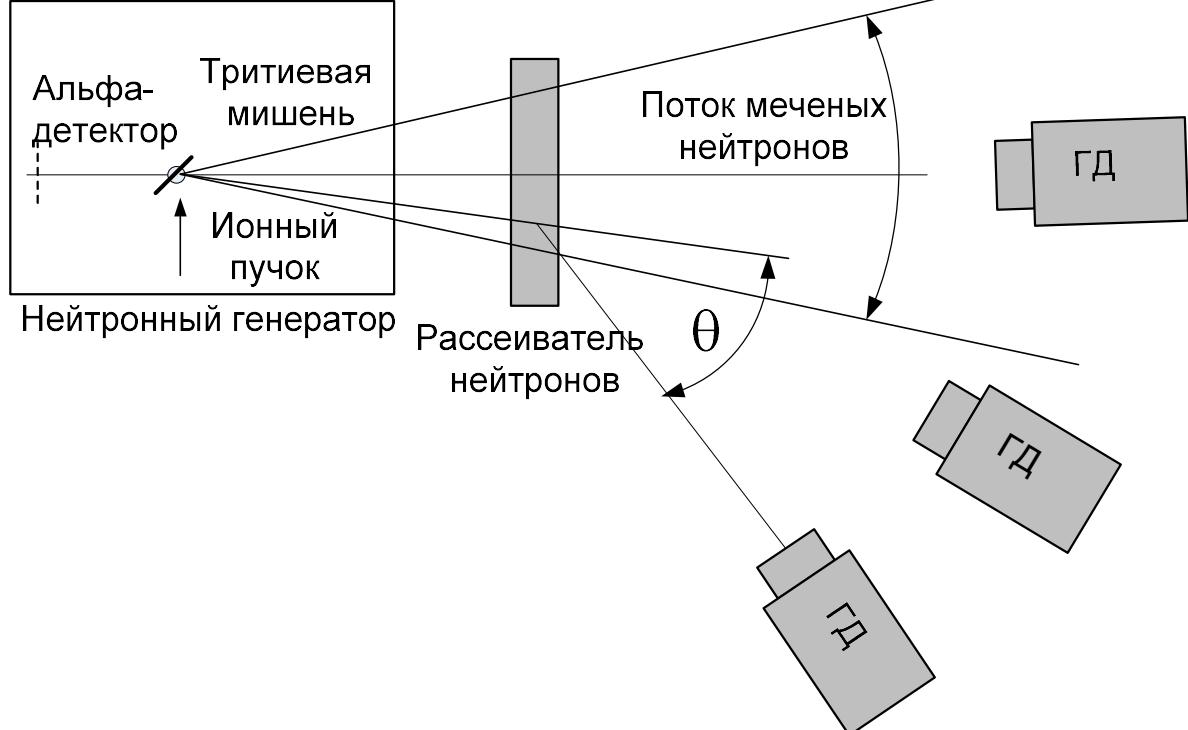


Зависимость энергии нейтронов и времени прохождения рассеянными нейтронами расстояния 1 м после взаимодействия при рассеянии на ядрах углерода и водорода от угла рассеяния  $\theta$

# Измерение отклика от рассеиваемых нейтронов в узкой геометрии



## Измерение отклика от рассеиваемых нейтронов в «широкой» геометрии



Пример успешной реализации  
«широкой» геометрии-установка  
TANGRA (ОИЯИ) с нейтронным  
генератором ИНГ-27 (ВНИИА)

*P.S. Prusachenko et al.*

*Characterization of an EJ-200 plastic  
scintillator array for experiments  
with 14-MeV tagged neutrons using  
the carbon and polyethylene  
samples // Nucl. Instruments and  
Methods. Vol. A 1072, 2025, P. 1-9.*

## Заключение



Нейтронный отклик гамма-детектора может быть получен расчетным путем, однако необходимо его верифицировать экспериментально, поскольку реальный световой выход зависит от качества материала и технологии изготовления

Метод меченых нейтронов позволяет получить практически «чистый» поток 14 МэВ нейтронов в узкой (облучается часть детектора) и широкой геометрии (детектор облучается однородным потоком нейтронов), причем измерение в узкой и широкой геометриях могут проводиться одновременно.

Измеренные в настоящей работе спектры отклика гамма-детектора и значения эффективности регистрации нейтронов находятся в согласии с экспериментальными данными других авторов.

Метод меченых нейтронов позволяет проводить измерение отклика гамма-детекторов для энергий нейтронов менее 14 МэВ при рассеивании меченых нейтронов на разных мишенях.

Метод меченых нейтронов может быть рекомендован для измерения нейтронного выхода для других типов ядерных детекторов (полупроводниковых, алмазных), а также калибровки детекторов с нейтрон-гамма разделением.

**Спасибо за внимание!**

