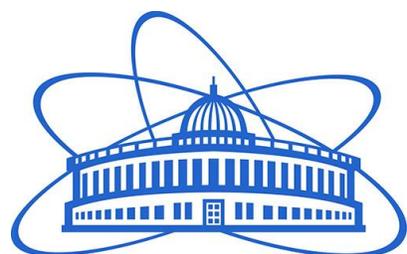


Исследование свойств гамма-излучения, сопутствующего ядерным реакциям с быстрыми нейтронами

Н.А. Федоров
ЛНФ ОИЯИ

По результатам гранта РФФ № 23-12-00239

na.fedorov@physics.msu.ru



JOINT INSTITUTE
FOR NUCLEAR RESEARCH



Содержание

1. Введение и мотивация
2. Постановка экспериментов
3. Обработка данных и расчет поправок на геометрию эксперимента
4. Достигнутые результаты
5. Перспективы и возможные направления дальнейших работ
6. Заключение

Краткое содержание доклада



Ну... Зато грант закрыли



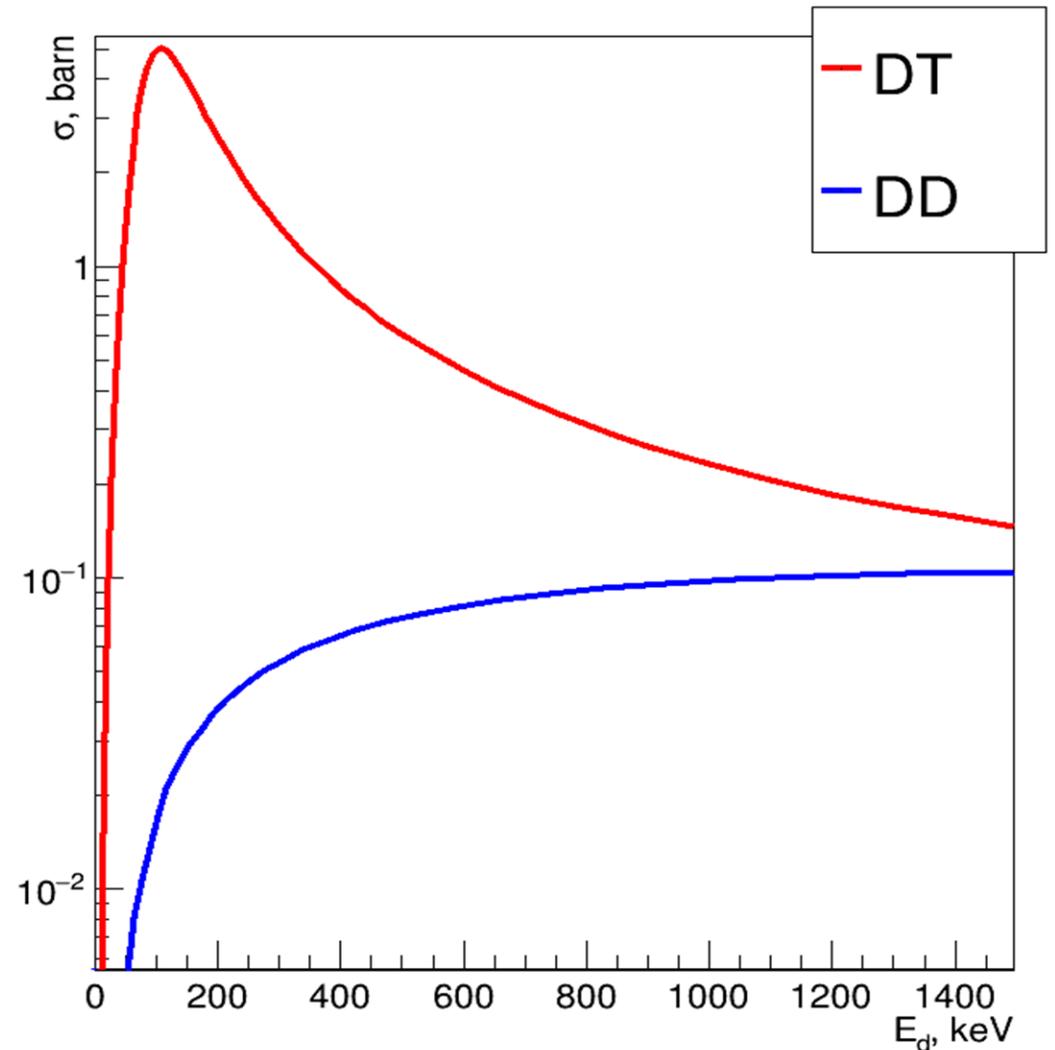
Введение и мотивация

Реакции слияния изотопов водорода

- Ядерные реакции, которые достаточно просто осуществить



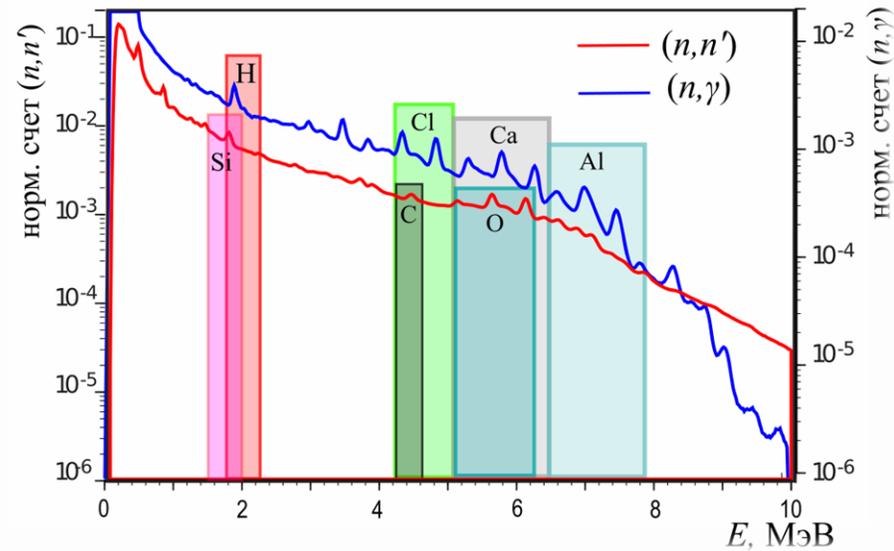
- Предложены для генерации нейтронов М. Олифантом и Э. Резерфордом (1934)



Применение (реакций ${}^A_Z(n, X){}^{A'}_{Z'}*$)

- Нейтронный и нейтрон-гамма каротаж

Импульсный D-T генератор нейтронов



γ -детектор

SLB LithoScanner (<https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/reservoir-characterization/surface-and-downhole-logging/wireline-openhole-logging/litho-scanner-spectroscopy>)

- Активационный анализ (${}^{16}\text{O}(n,p){}^{16}\text{N}$ и другие легкие ядра)

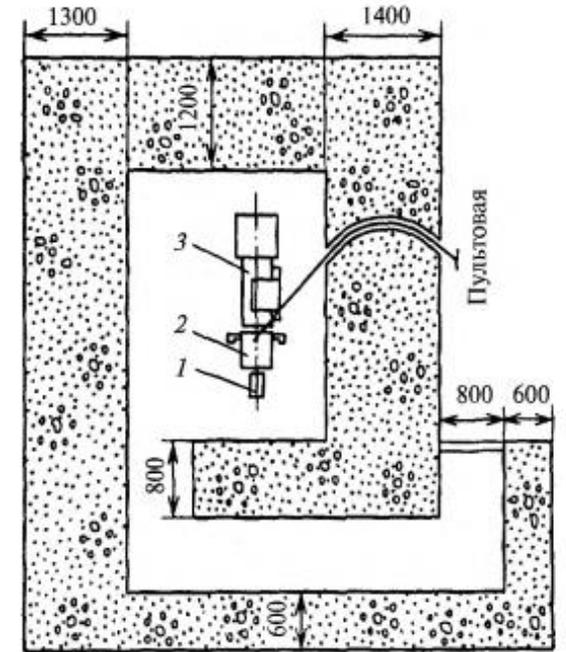


Рис. 9.1. Схема размещения генератора нейтронов в типовом защитном бетонном блоке:

1 — монитор нейтронного потока; 2 — позиция облучения; 3 — генератор нейтронов НГИ

Из книги «Генераторы быстрых нейтронов». Кирьянов Г.И., М. 2016

Метод меченых нейтронов (ММН)

В реакции ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ нейтрону сопутствует α -частица – можно поставить в нейтронную трубку α -ПЧД и “метить” нейтроны

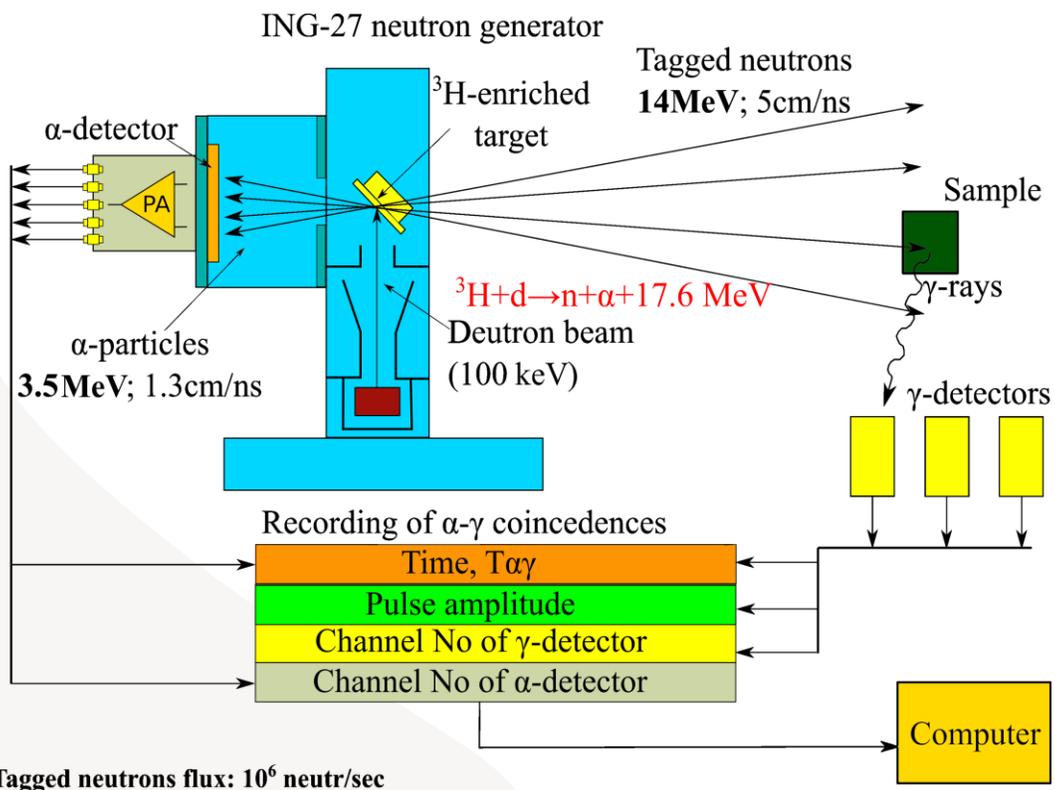


Схема ММН

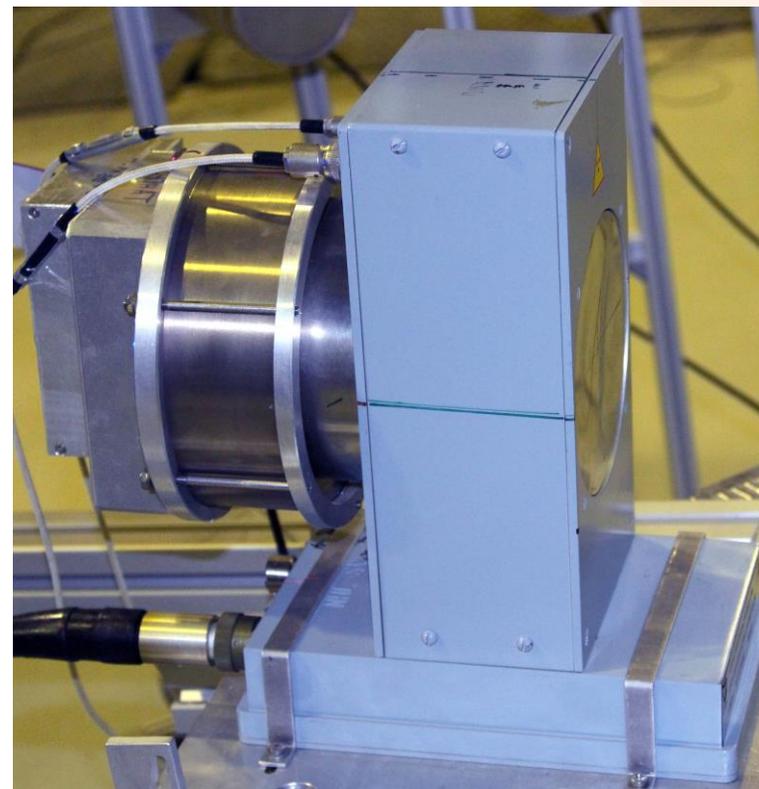


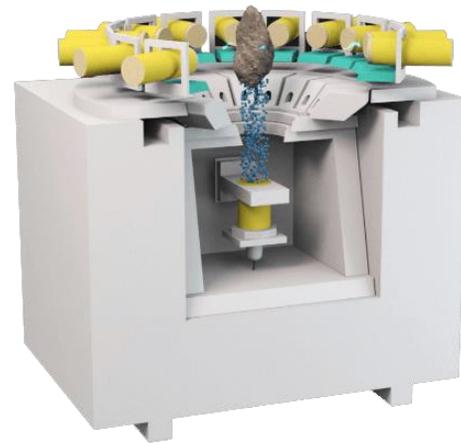
Фото ИНГ-27

Возможные применения ММН (?)

Почти все предлагаемые применения основываются на элементном анализе по характеристическим γ -квантам, испускаемым продуктами реакций с быстрыми нейтронами: (n, n') , (n, p) , (n, α) , $(n, 2n)$...

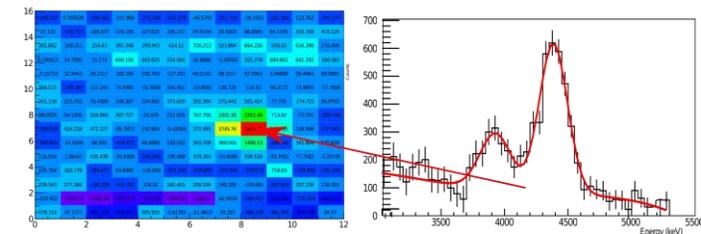
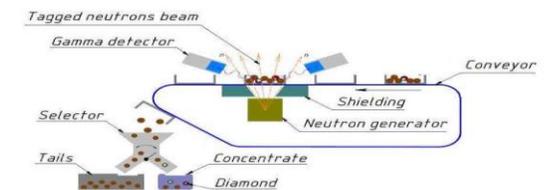


Fig. 1. The EURITRACK tagged neutron inspection system.



Поиск опасных веществ в багаже

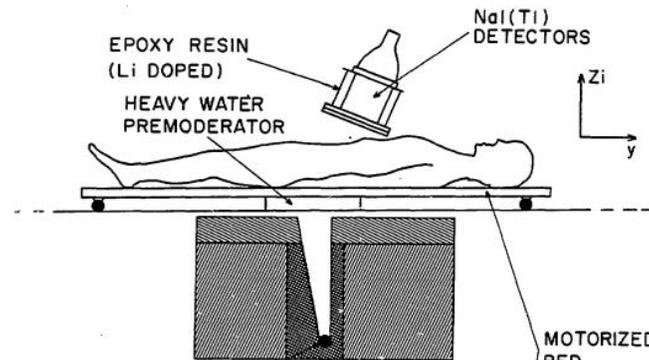
ДВИН, ООО «Диамант»



Поиск алмазов (ООО «Диамант»)

Анализ проб горных пород

АГП-С, ООО «Диамант»



Медицинская диагностика

Картинка из Cohn, S. H., et al. BNL-32255; BNL., USA, 1981.

Аналогичная картинка была в статье в ЭЧАЯ (не прошла рецензию)

Досмотр транспорта (Perot, B. et al., NIM B 261 (2007) 295)

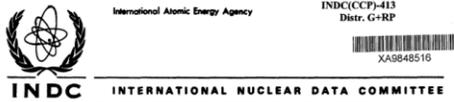


Анализатор почвы (ООО «Диамант», ОИЯИ)

Проблемы

Почти все приборы на предыдущем слайде – концепты или прототипы. Почему?

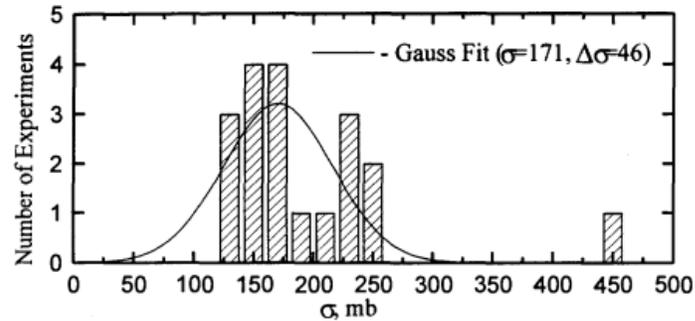
- С данными по сечениям излучения γ -квантов не все хорошо



STATUS OF EXPERIMENTAL AND EVALUATED
DISCRETE γ -RAY PRODUCTION AT $E_n=14.5$ MeV
Final Report of Research Contract 7809/RB,
performed under the CRP on Measurement, Calculation
and Evaluation of Photon Production Data

S. P. Simakov¹, A. Pavlik², H. Vonach³, S. Hlavat³

¹Institute of Physics and Power Engineering, Obninsk, Russia
²Institut für Radiumforschung und Kernphysik, University of Vienna, Austria
³Institute of Physics SAS, Bratislava, Slovakia



Расхождение в 2 раза!

E_γ	Reaction	Transition	E,	Angle,	Sample	Detect.	σ ,	Author	Publ	Correction			Corrected σ
4439	$^{12}\text{C}(n,n)^{12}\text{C}$	$4439(2^+) \rightarrow 0(0^+), p$	14.1	30-150	$\varnothing 30 \times \varnothing 26 \times 70, +/+$	Ge	180 ± 7	Murata	1988	?	1.0	-14.8	165 ± 7
			14.2	45-130	$\varnothing 44 \times 6, \varnothing 31 \times \varnothing 25 \times 32, +/+$	Nal(Tl)	228 ± 30	Drake	1978	1.0	1.0	-11.1	217 ± 30
			14.2	55	C: $\varnothing 30 \times 40, +/+$	Ge(Li)	156 ± 28	Hino	1976	1.0	1.0	-11.1	145 ± 28
			14	0-180	$\varnothing 60 \times \varnothing 20, +/-$	Nal(Tl)	255 ± 26	Bezotosny	1976	1.0	1.0	-18.5	237 ± 26
			14.2	125	C: $\varnothing 483 \times \varnothing 279 \times 25, +/+$	Ge(Li)	168 ± 20	Rogers	1975	1.0	1.0	-11.1	157 ± 20
			14.2	45-125	No Information, +/+	Nal(Tl)	219 ± 29	Arthur	1975	1.0	1.0	-11.1	208 ± 29
			14.1	90	C: $\varnothing 50 \times 30, +/+$	Ge(Li)	121 ± 20	Clayeux	1969	1.0	1.07	-14.8	115 ± 21
			14.2	0-180	Shell ??, +/+	Nalpair	163 ± 30	Maslov	1968	1.0	1.0	-11.1	152 ± 30
			14	No Inf	C: $\varnothing 60 \times 30, +/+$	Nal(Tl)	133 ± 17	Bezotosny	1966	1.0	?	-18.5	115 ± 17
			14.1	30-160	C: $\varnothing ?? \times 20, +/+$	Nal(Tl)	232 ± 18	Stewart	1964	1.0	1.0	-14.8	217 ± 18
			=14	30-150	C: $\varnothing 165 \times \varnothing 115 \times 25, +/+$	Nal	249 ± 28	Benveniste	1960	1.0	1.0	-18.5	230 ± 28

- ММН сравнительно дорог:

- ИНГ-27 живет ~ 1000 часов. Потом его надо менять
- Максимальная интенсивность меченых нейтронов: $10^6/\text{с}$

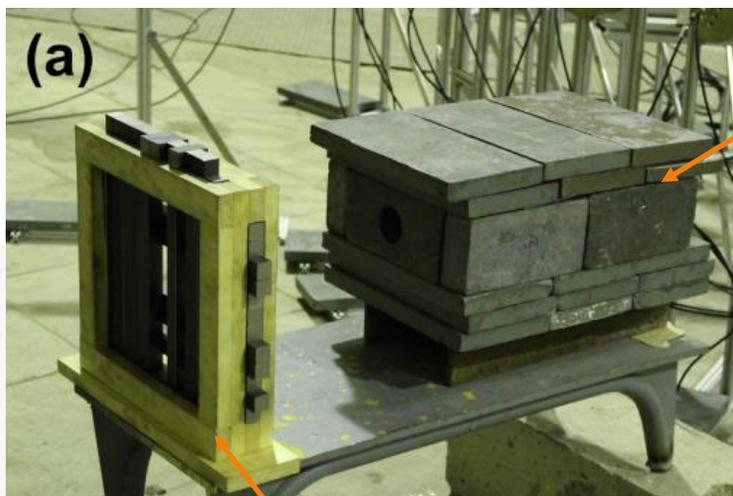
Можно применить там, где стоимость не настолько значима...

И мы подали заявку на грант!

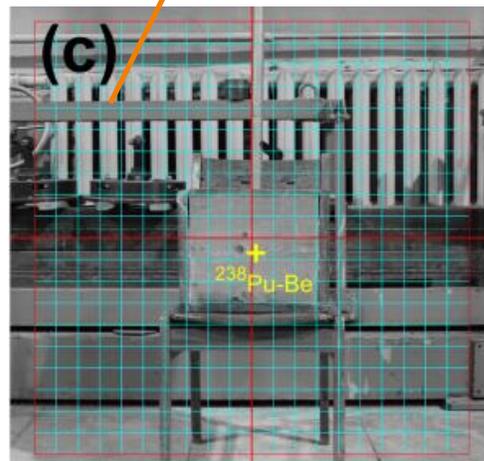
«Позиционно-чувствительный элементный анализ» - когда нужно узнать, что внутри какого-нибудь объекта, который:

- Дорогой, и его нежелательно пилить
- Неживой

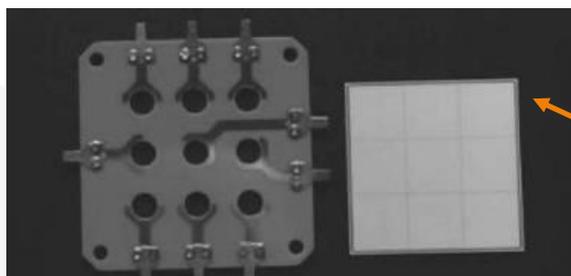
$$\begin{cases} a_{11}f_1 + a_{12}f_2 + \dots + a_{1N}f_N = g_1 \\ a_{21}f_1 + a_{22}f_2 + \dots + a_{2N}f_N = g_2 \\ \dots \\ a_{M1}f_1 + a_{M2}f_2 + \dots + a_{MN}f_N = g_M \end{cases}$$



γ-детектор в защите

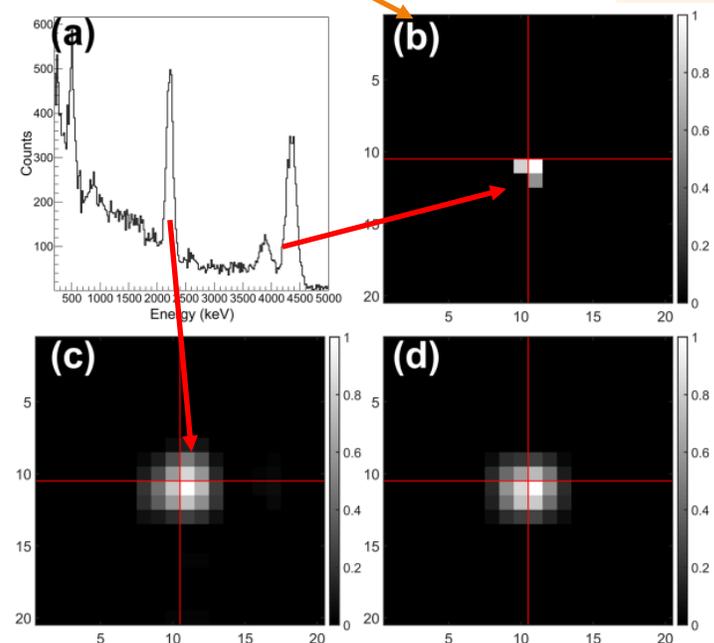


Pu-Be нейтронный источник (в парафине)



α-детектор ИНГ-27
Ну похож ведь!

Перестраиваемый коллиматор



Пространственное распределение излучателей

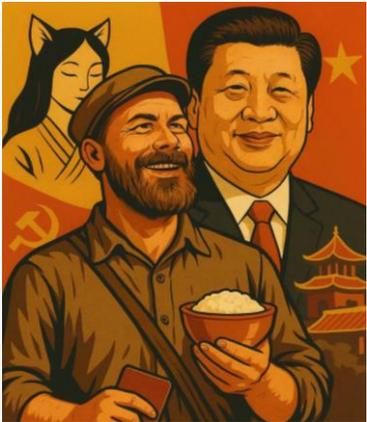
И мы подали заявку на грант!

«Позиционно-чувствительный элементный анализ» - когда нужно узнать, что внутри какого-нибудь объекта, который:

- Дорогой, и его нежелательно пилить
- Неживой

Задачи:

1. Выполнить измерения $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ для излучения γ -квантов продуктами ядерных реакций для всех элементов, до которых сможем дотянуться. **Наука!**
2. Разработать методику позиционно-чувствительного элементного анализа (с пространственным разрешением **лучше**, чем позволяет α -детектор)



Ожидание: грант РФ-NSFC

Косметические
изменения

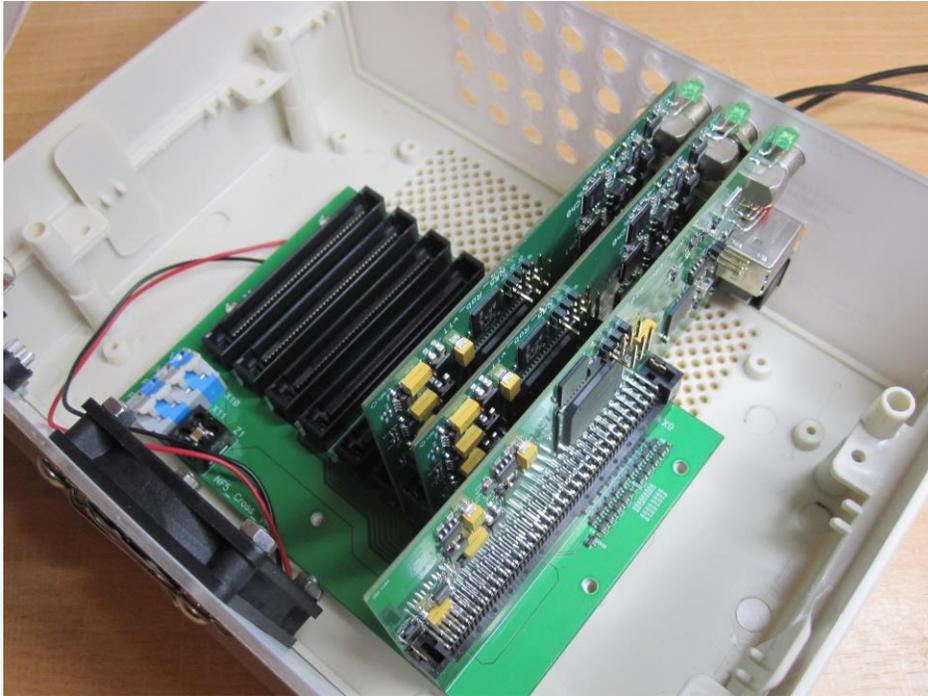


Реальность: грант РФ

«для отдельных научных групп»

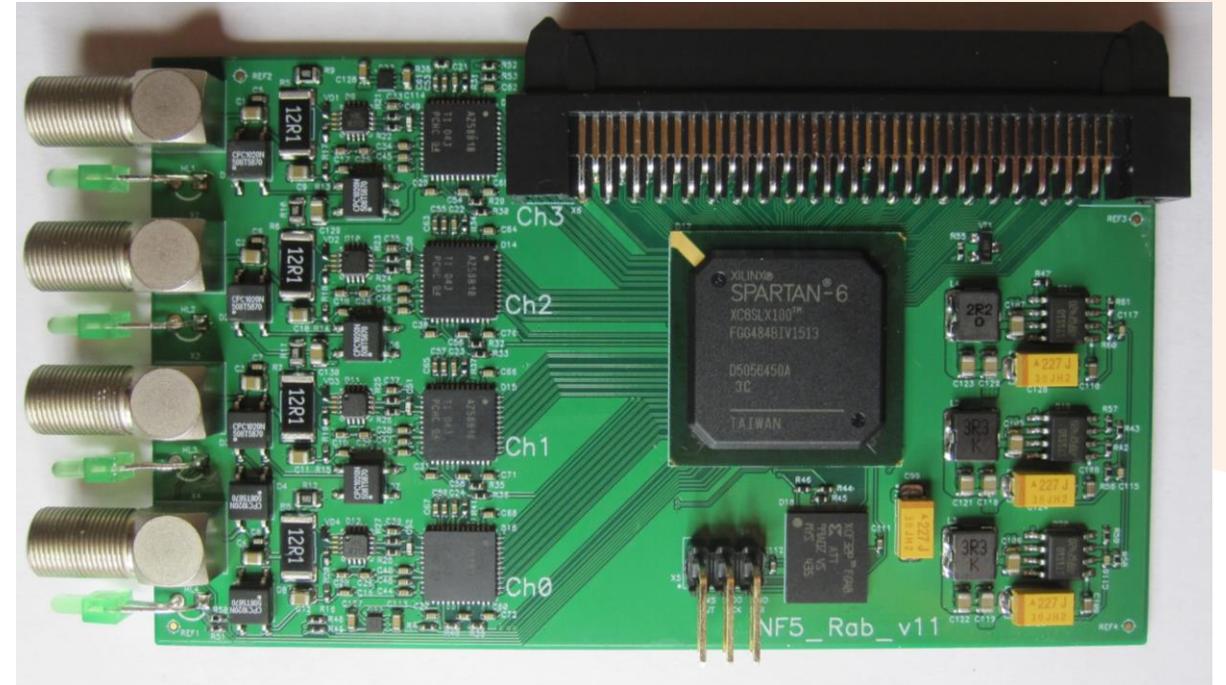
Постановка эксперимента

Электроника



Оцифровщики «ЦРС»

- Разработка ОИЯИ
- 100-250 MS/s, 12-16 бит
- Интерфейс USB 3.0
- До 128 каналов



Возможности:

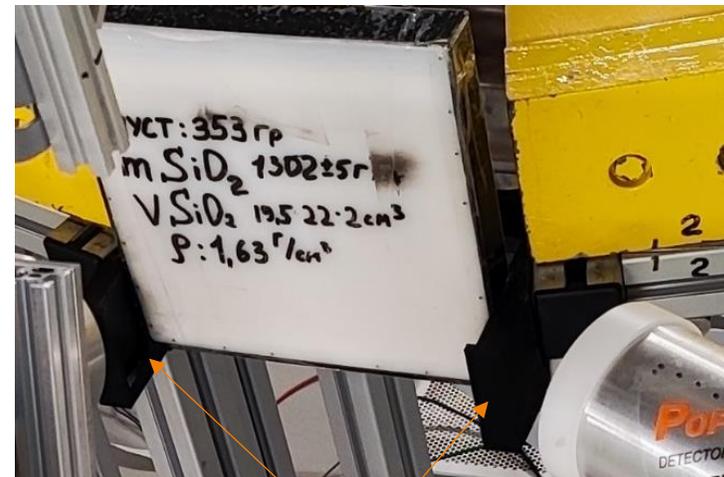
- Передача и запись осциллограмм на ПК (эфф ~150 Мбит/с)
- Обработка сигналов средствами ПЛИС (DSP)
- Максимальная загрузка на канал с DSP: $\sim 10^6/N$, N-число задействованных каналов

Образцы



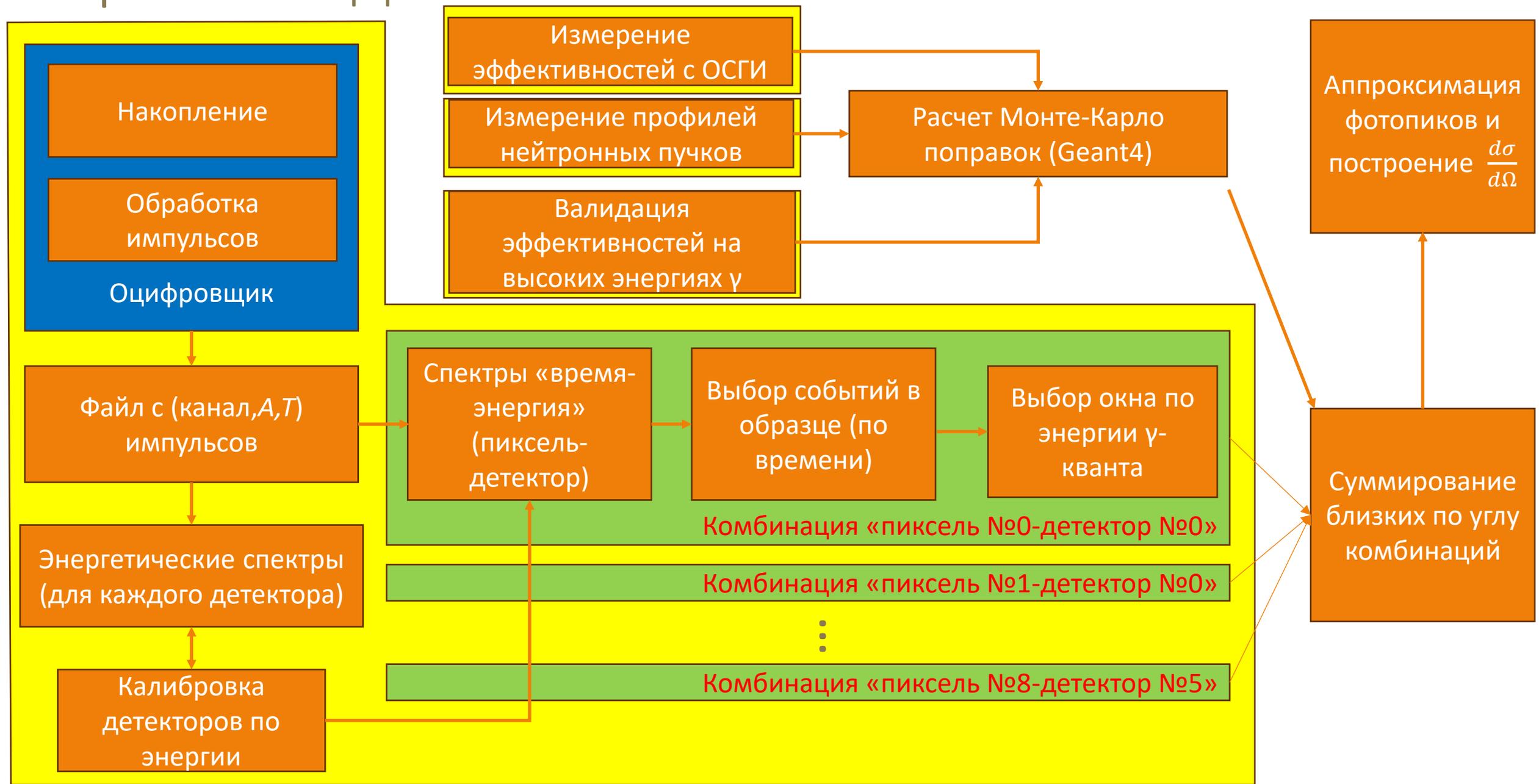
Стандартизация!

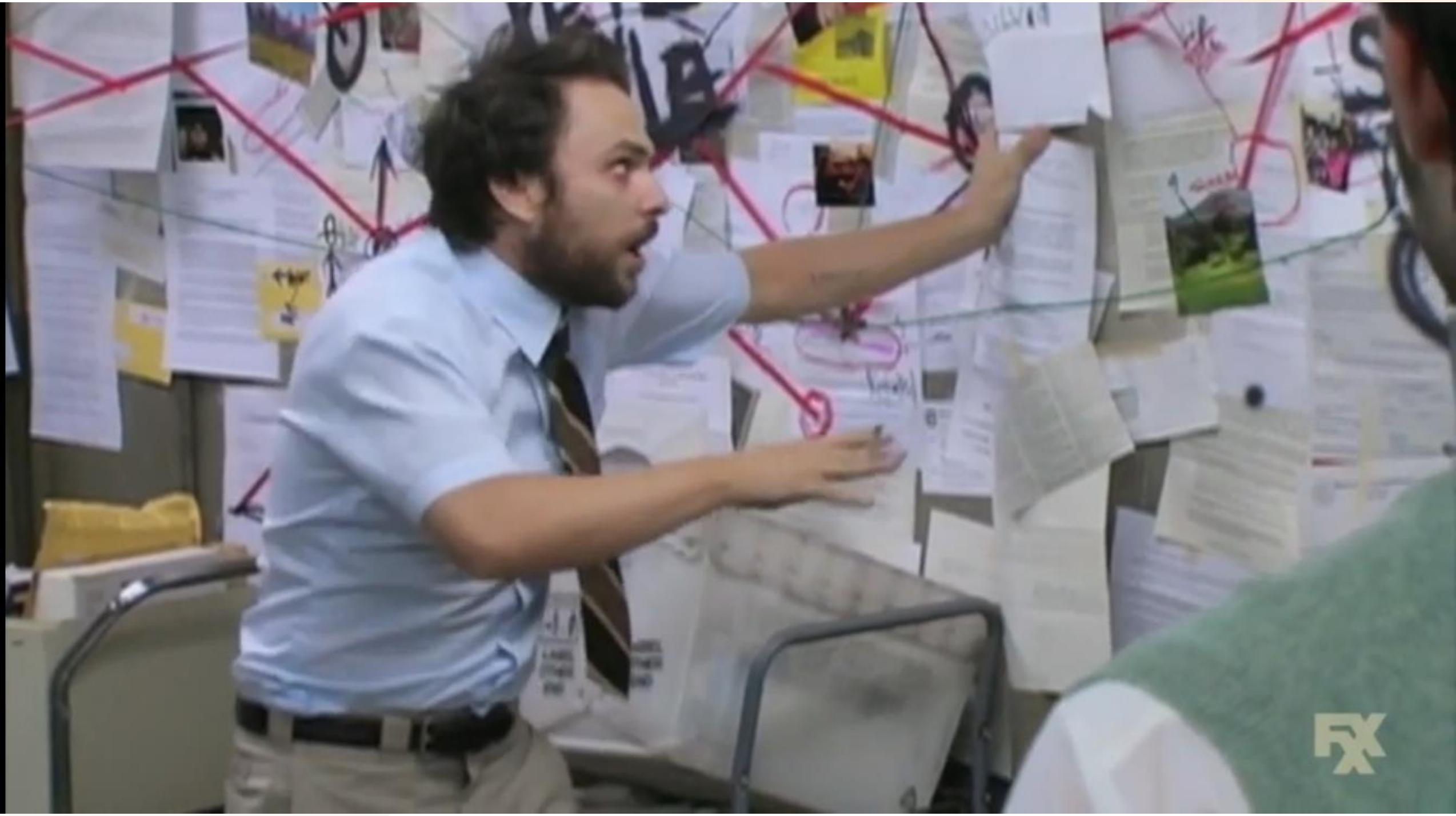
- Материалы – PETG и полиэтилен
- Внутри – порошки исследуемых веществ
- Размеры (внутри) – 20*20*Х см³ (чуть меньше поля меченых пучков)
- Толщина определяется свойствами образца



Универсальное крепление

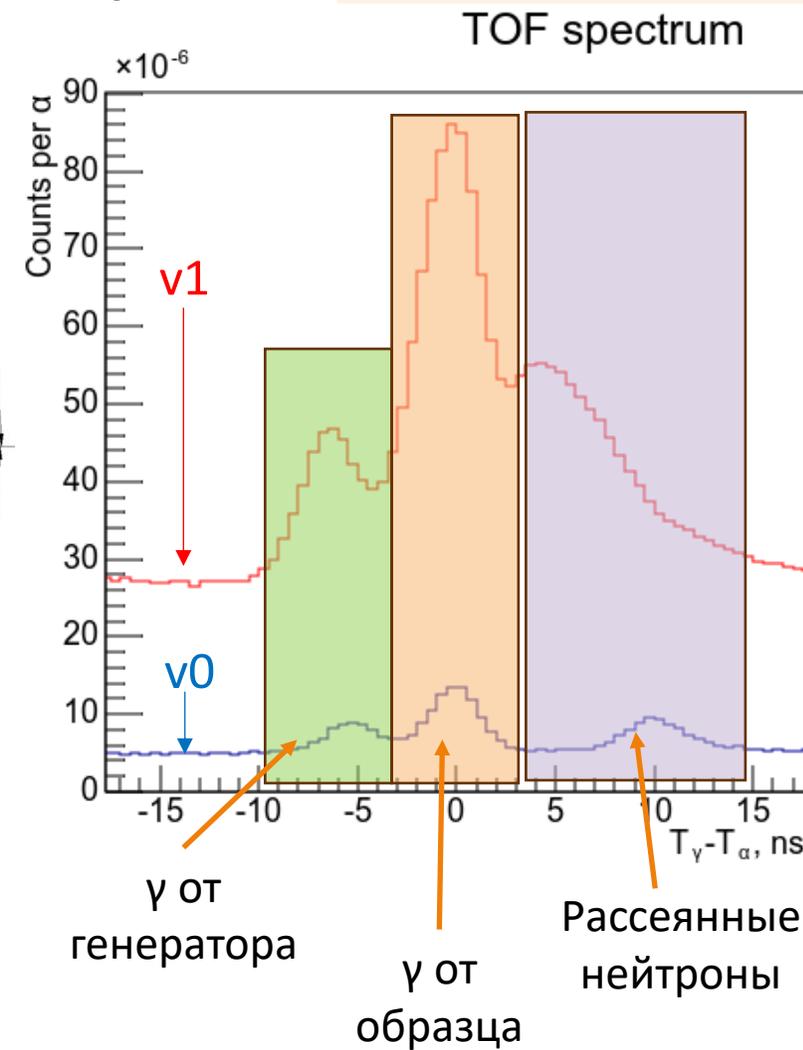
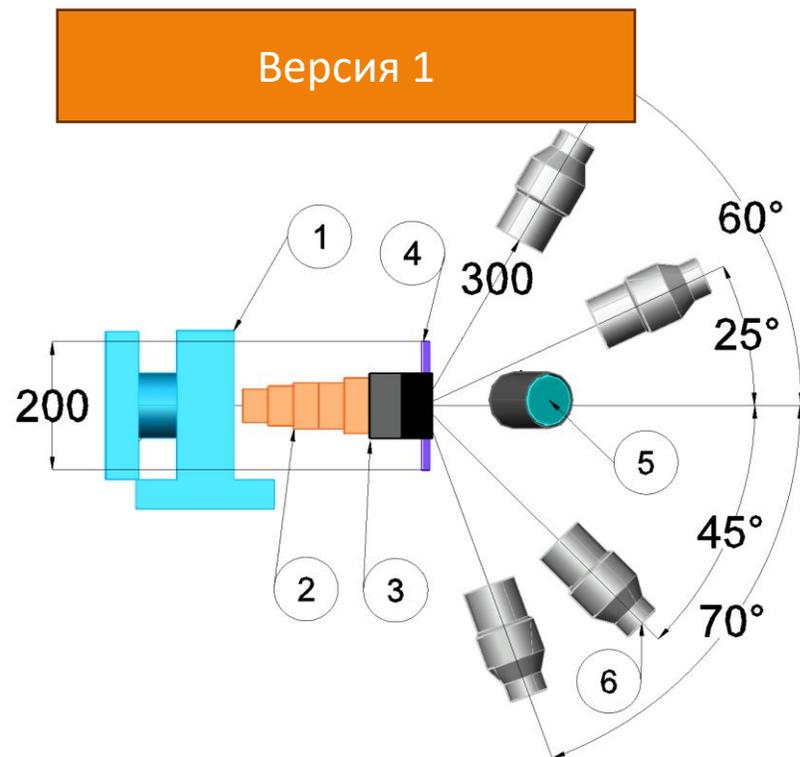
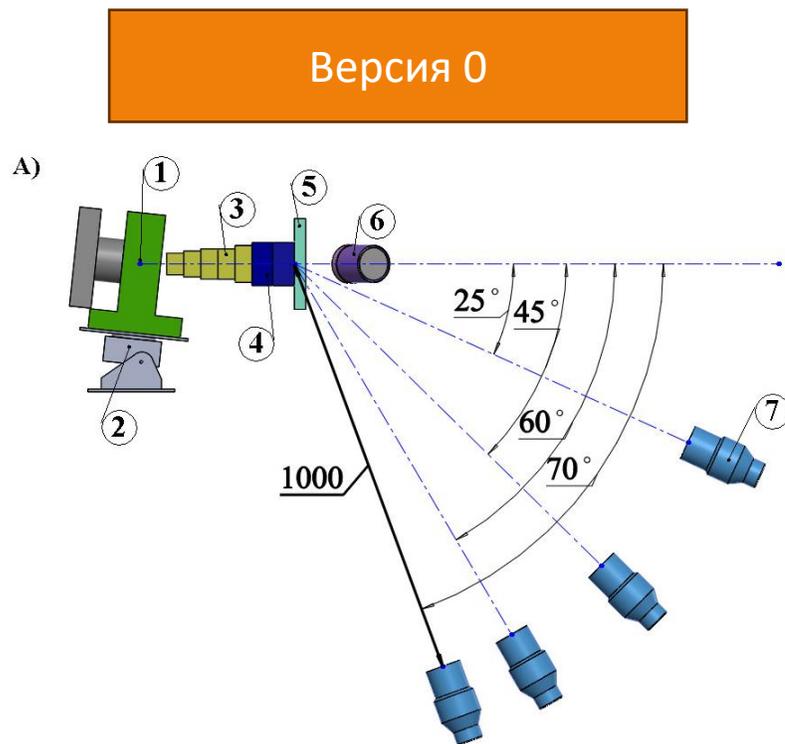
Обработка данных





*Постановка эксперимента:
НЮАНСЫ*

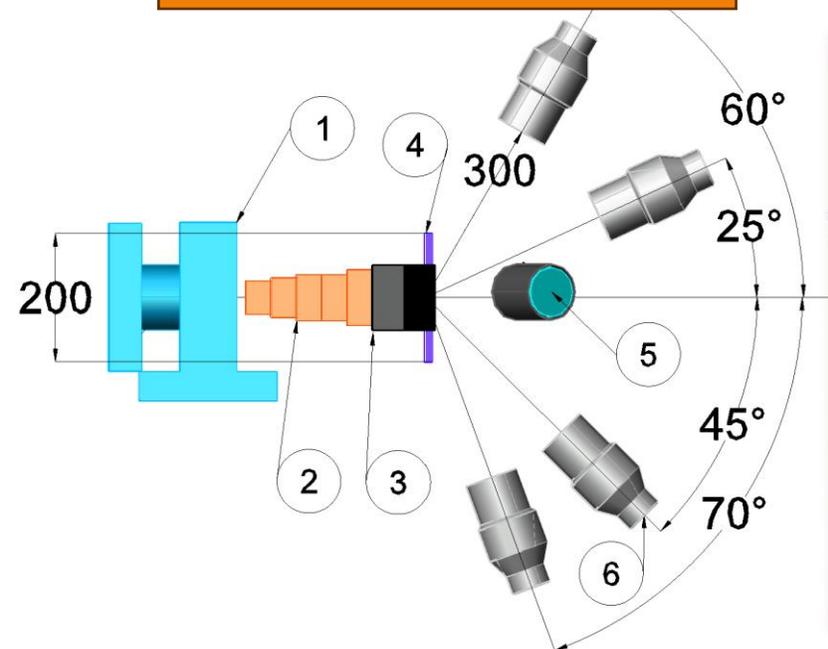
Нюанс №1: Экспериментальная установка



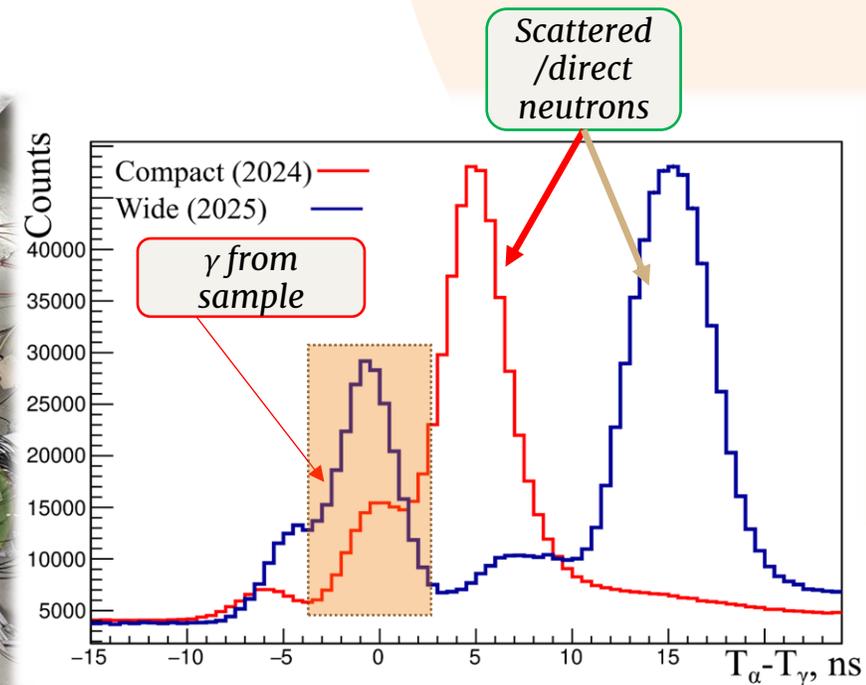
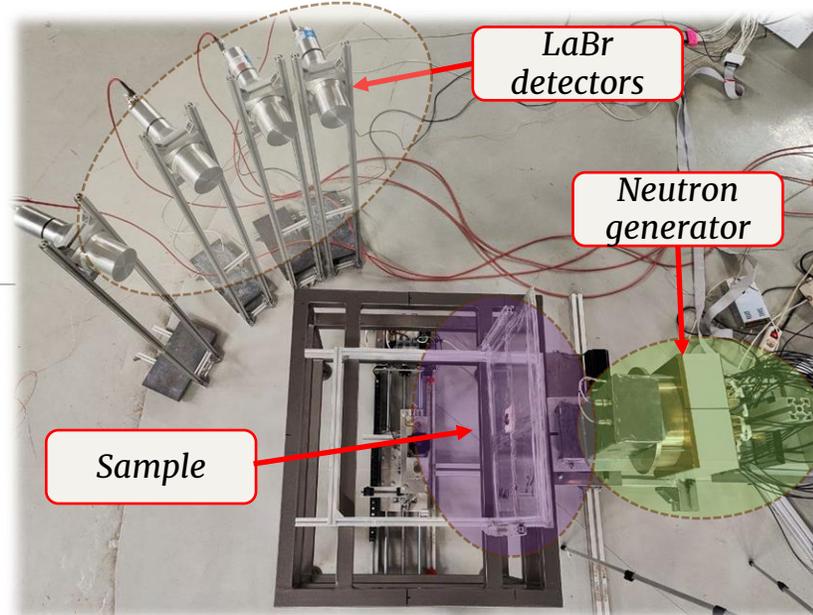
- Выиграли по скорости счета в ~ 9 раз (сэкономили ресурс ИНГ-27)
- Проиграли по фонам
- [Словили перегрузку детекторов](#)
- Измерили: Li, Be, B, C, N, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sn (26 элементов)

Нюанс №1: Экспериментальная установка

Версия 1

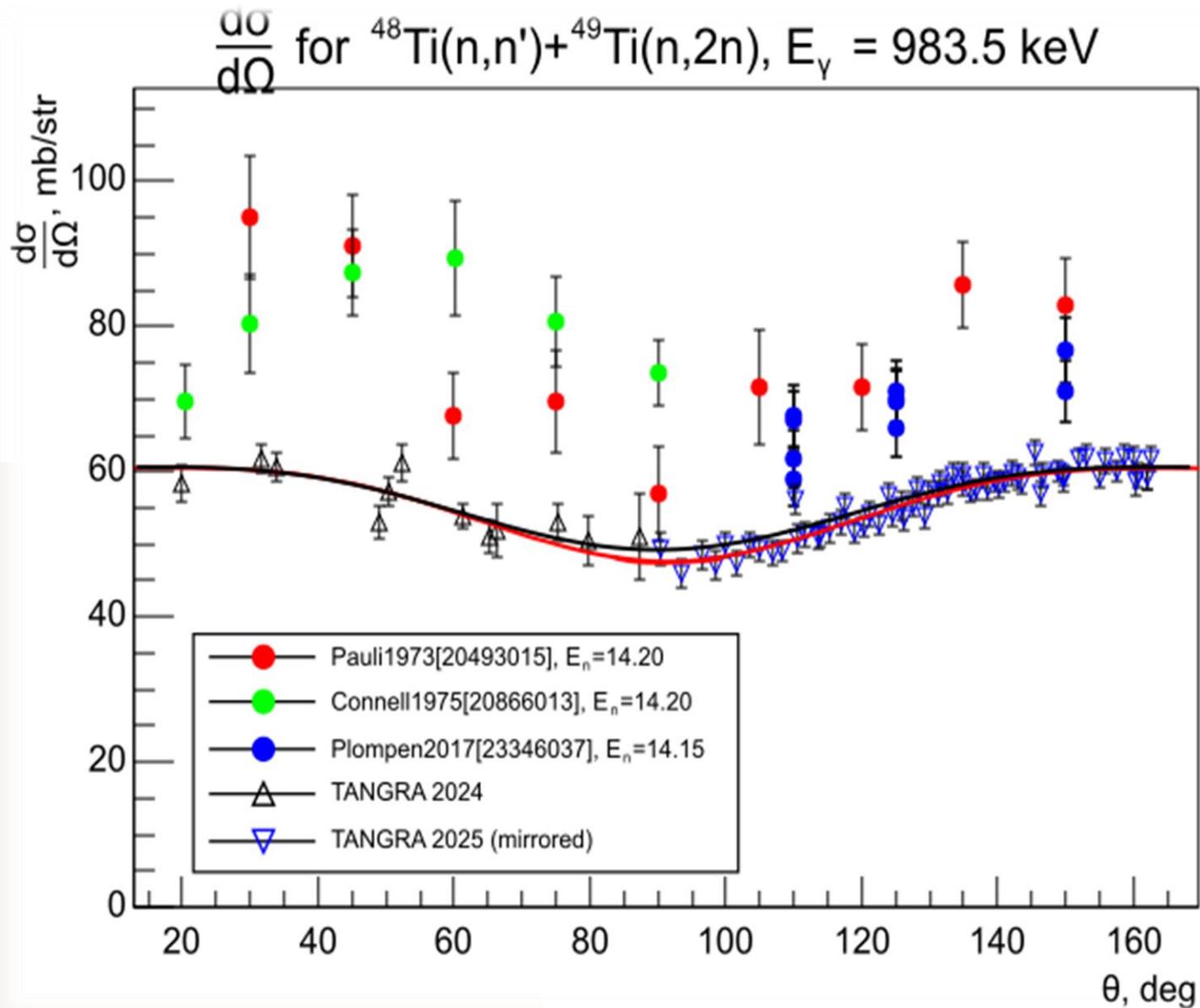


Версия 1.1



- «Верифицировали» C, Al, Si, Ca, Ti, Cr, Fe

Нюанс №1: Экспериментальная установка

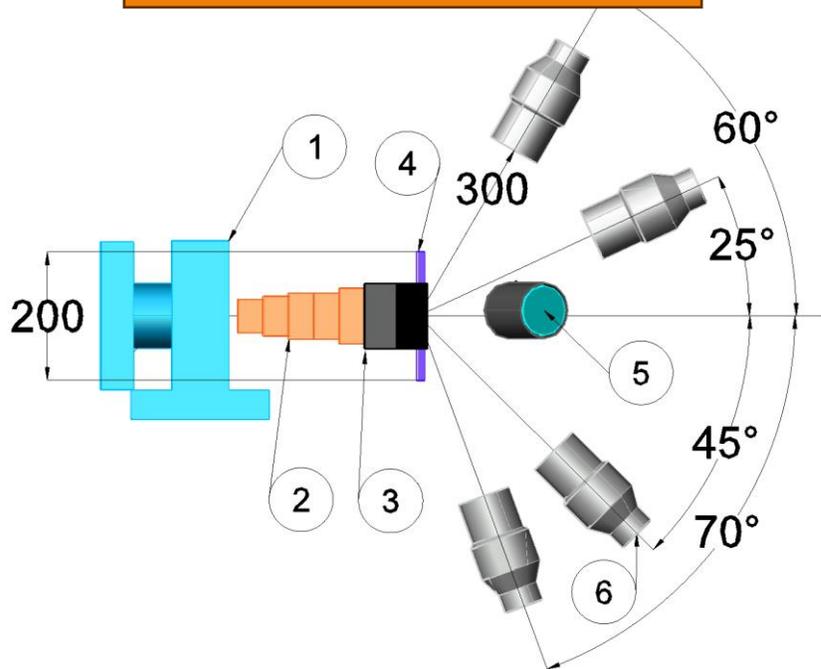


E_γ , keV	Reaction	Reference	σ , mb	a_2	a_4
983,5 keV	$^{48}\text{Ti}(n,n')$ $^{49}\text{Ti}(n,2n)$	Pauli 1973	940 (30)	0,31(8)	-0,1(1)
		Connell 1975	1020 (30)	-0,02(5)	-0.26(9)
		Plompen 2017	842 (15)	0,16(4)	-0,08(7)
		TANGRA 2024	690 (10)	0,16(3)	-0,05(4)
		TANGRA 2025	685 (3)	0,18(1)	-0.06(1)

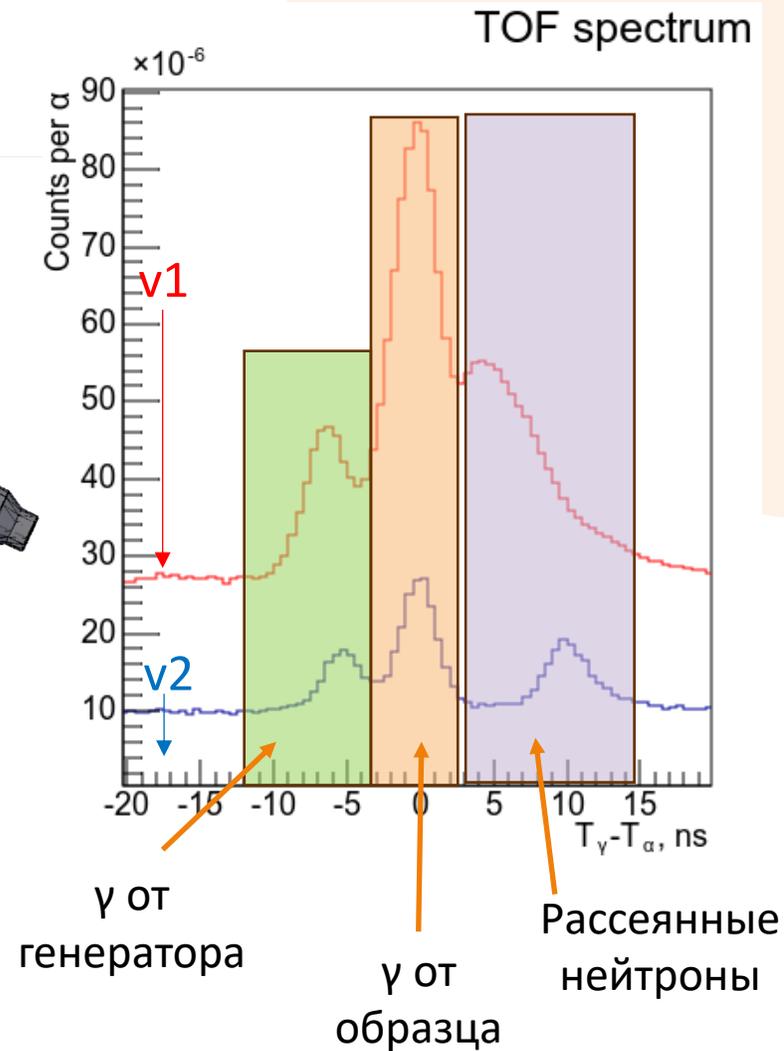
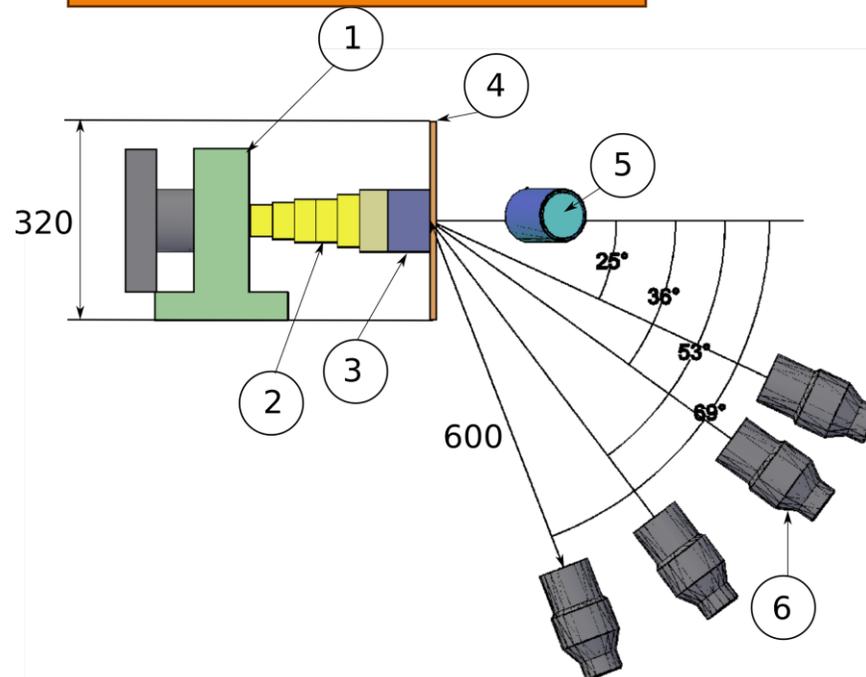
- «Предварительные» данные, доложенные на INPC-2025 (приведены только стат. ошибки)

Нюанс №1: Экспериментальная установка

Версия 1



Версия 2

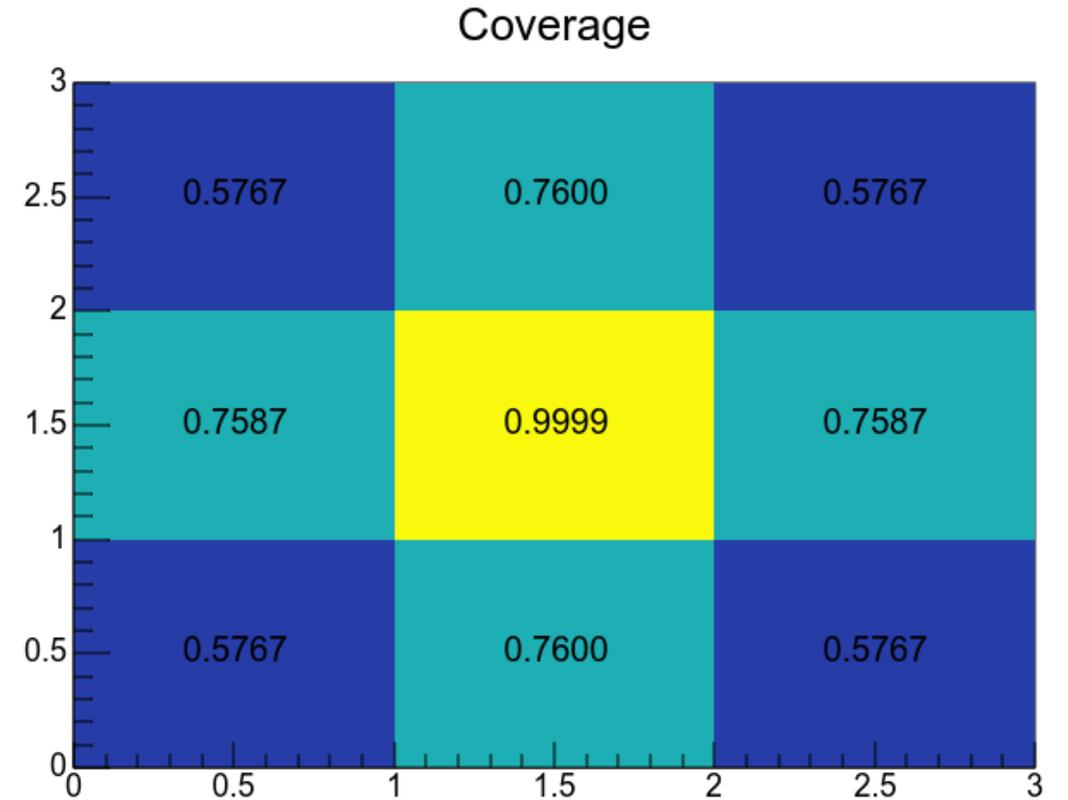


- Проиграли по скорости счета в ~ 4 раза
- Фон приемлемый, нет значимого пересечения с событиями от нейтронов
- Детекторы в норме
- Измерили: Ga, Ge, As, Se, Br, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pd, Ag, Cd, In, Sb, Te, I, Ba, Ta, La, Ce, Nd, Hf, W, Hg, Pb, Bi, U (28 элементов)

Нюанс №2: Нейтронные пучки



Образец на установке

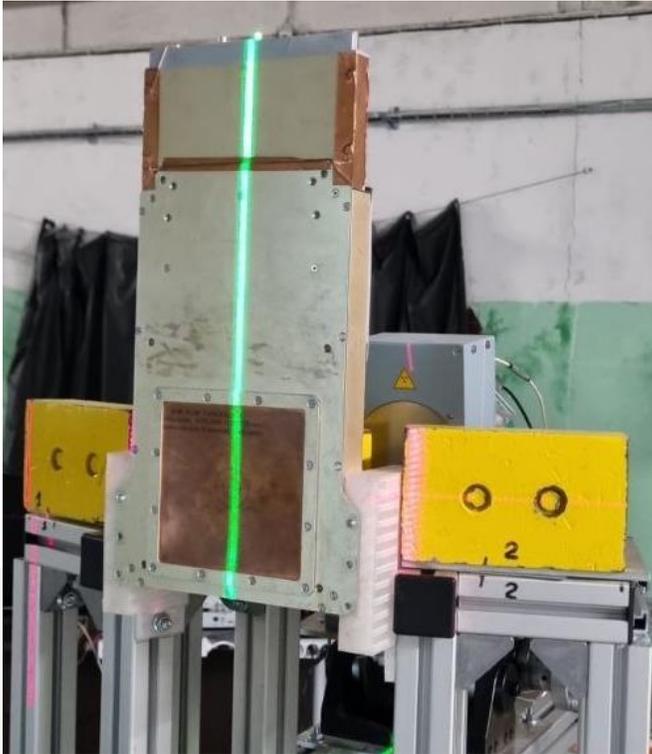


Доля нейтронов, достигающих образца, для каждого пикселя

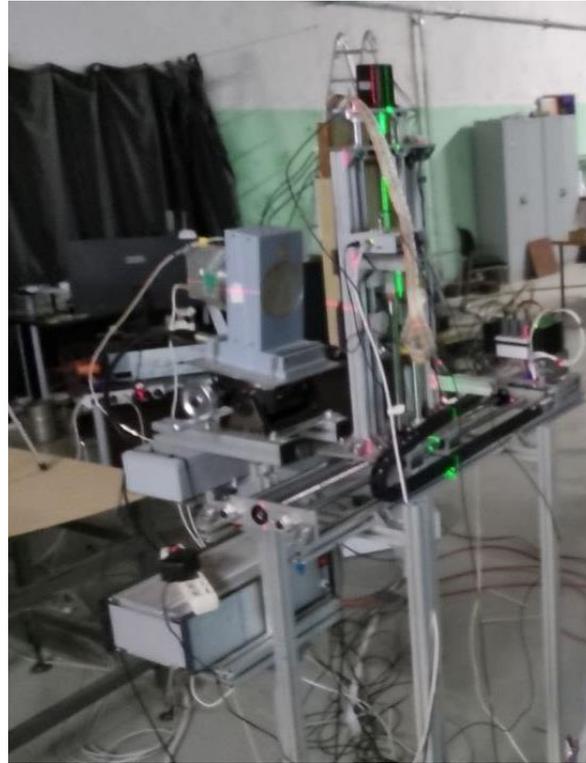
(по осям - № пикселя по X и Y)

А как оно на самом деле?

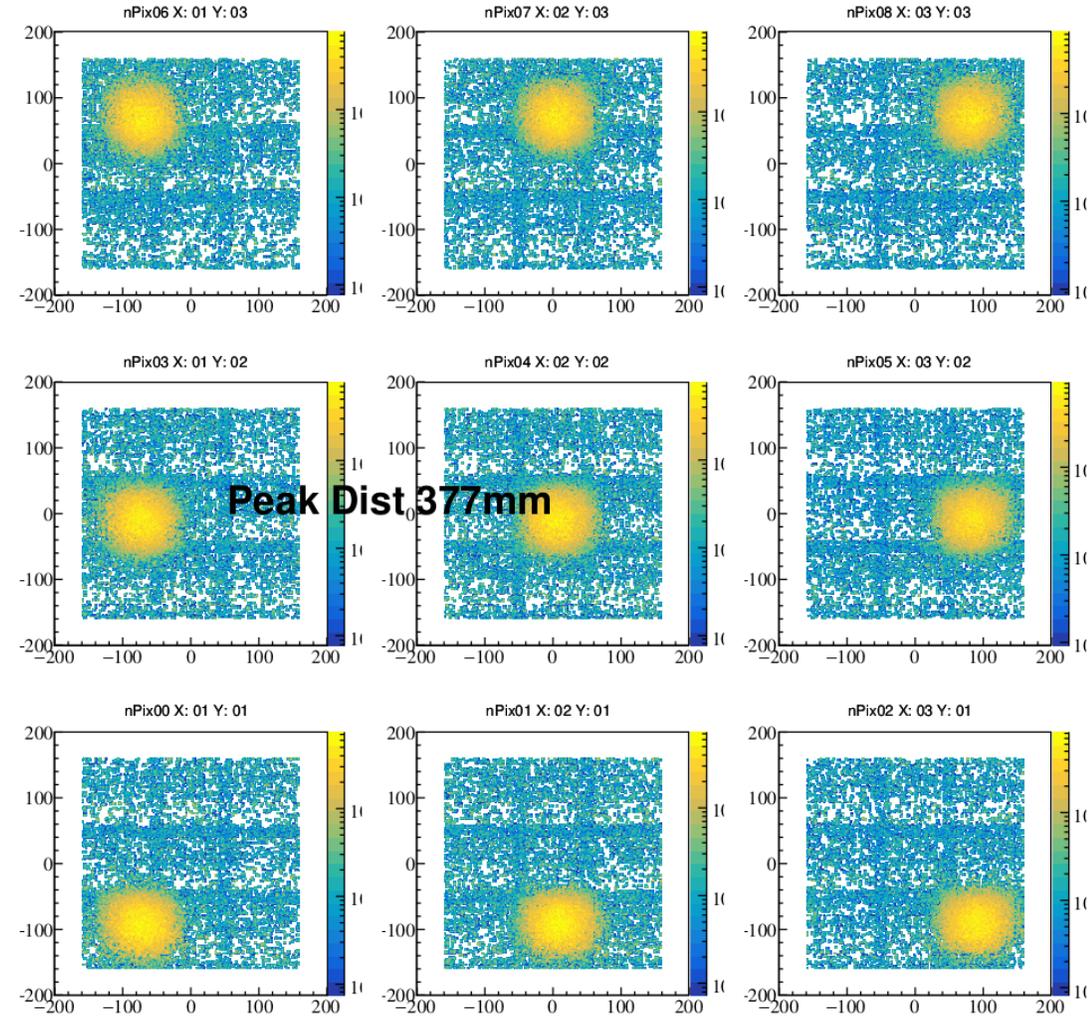
Нюанс №2: Нейтронные пучки



ПЧД-профилومتر на месте образца



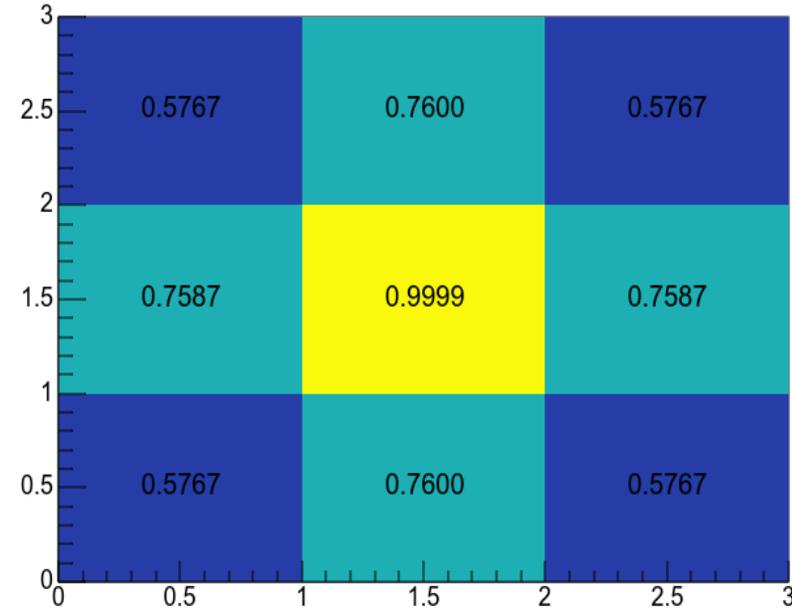
ПЧД-профилومتر на манипуляторе



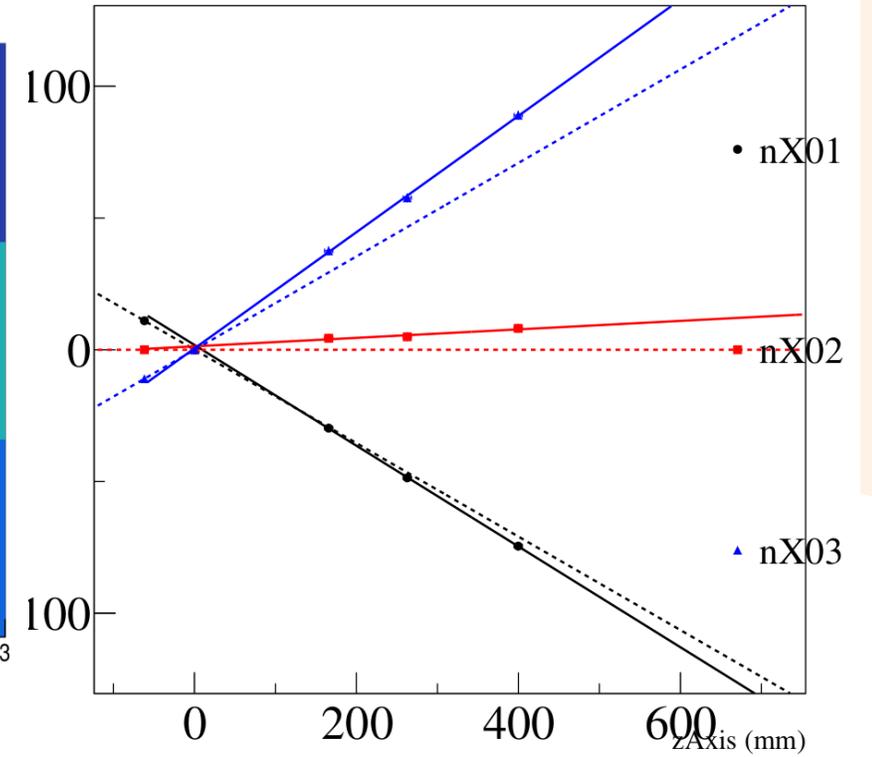
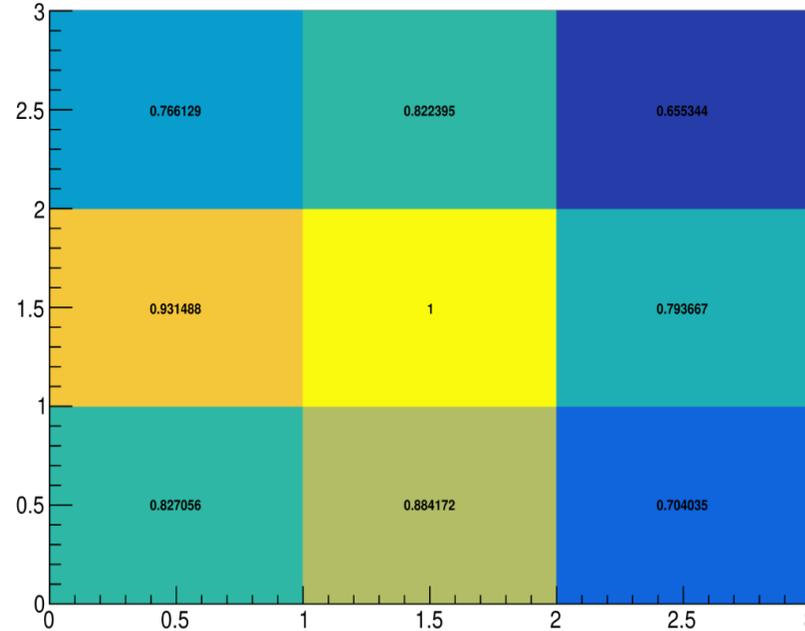
Профили пучков на расстоянии 37,7 см (т.е. на образце)

Нюанс №2: Нейтронные пучки

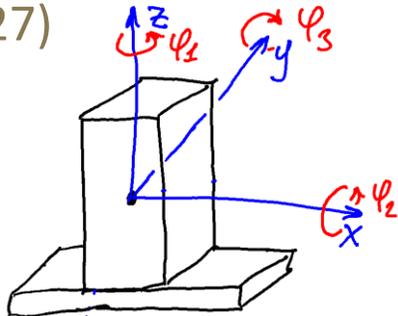
Coverage



Coverage



Покрытие образца нейтронами
(Монте-Карло по
документации ИНГ-27)



Оно же по экспериментальным
профилям пучков

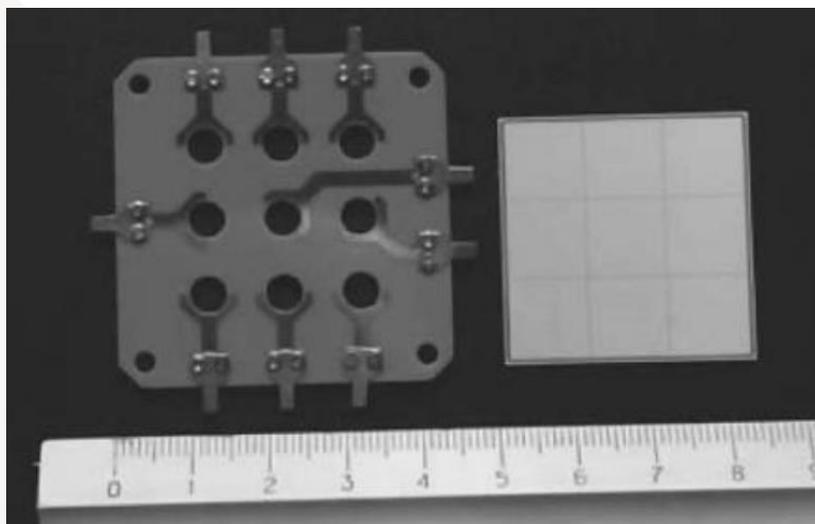
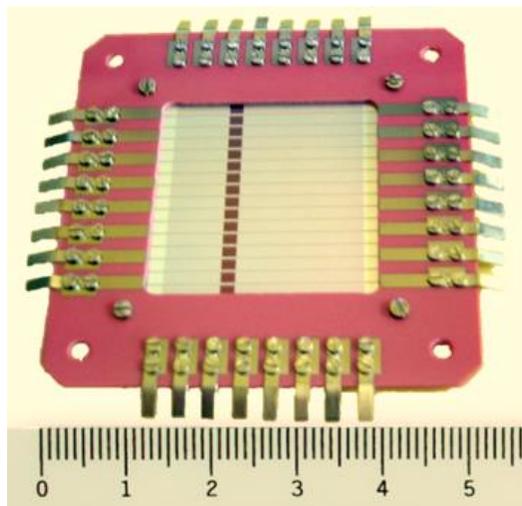
Траектории пучков (пунктир –
модель, линия – эксперимент)

Покрутим генератор?

Там же плоский альфа-детектор с пикселями!

Нюанс №2: Нейтронные пучки

Ожидание



Реальность



С официального сайта ВНИИА: <https://www.vniia.ru/production/neitronnie-generatory/elementniy-analiz/neutronnye-generatory-dlya-elementnogo-analiza-veshchestv-i-materialov.php>

Об этом мы узнали после окончания гранта...

Нюанс №2: Нейтронные пучки. Решение

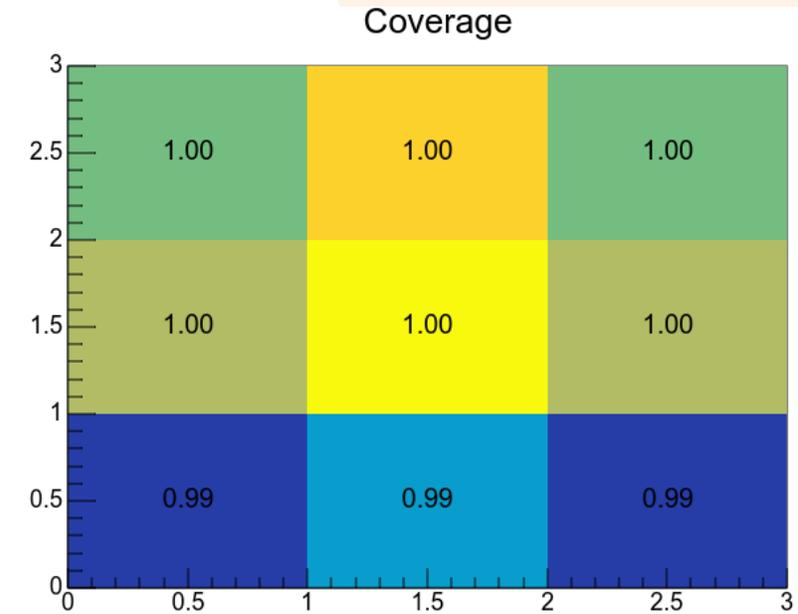


22 см

Было



Стало

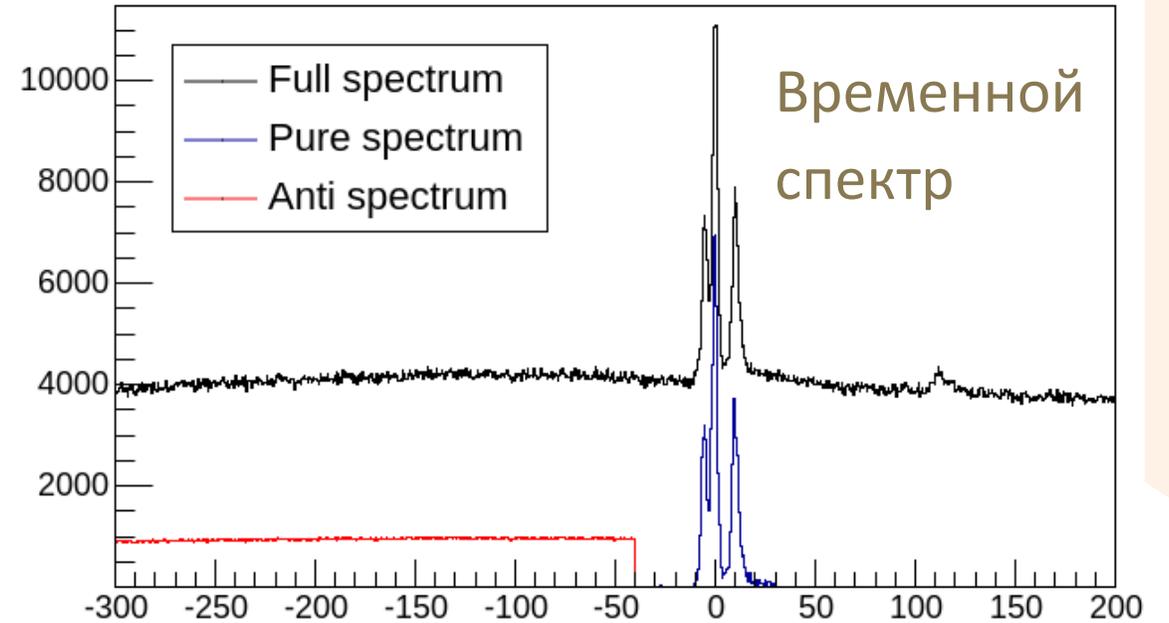
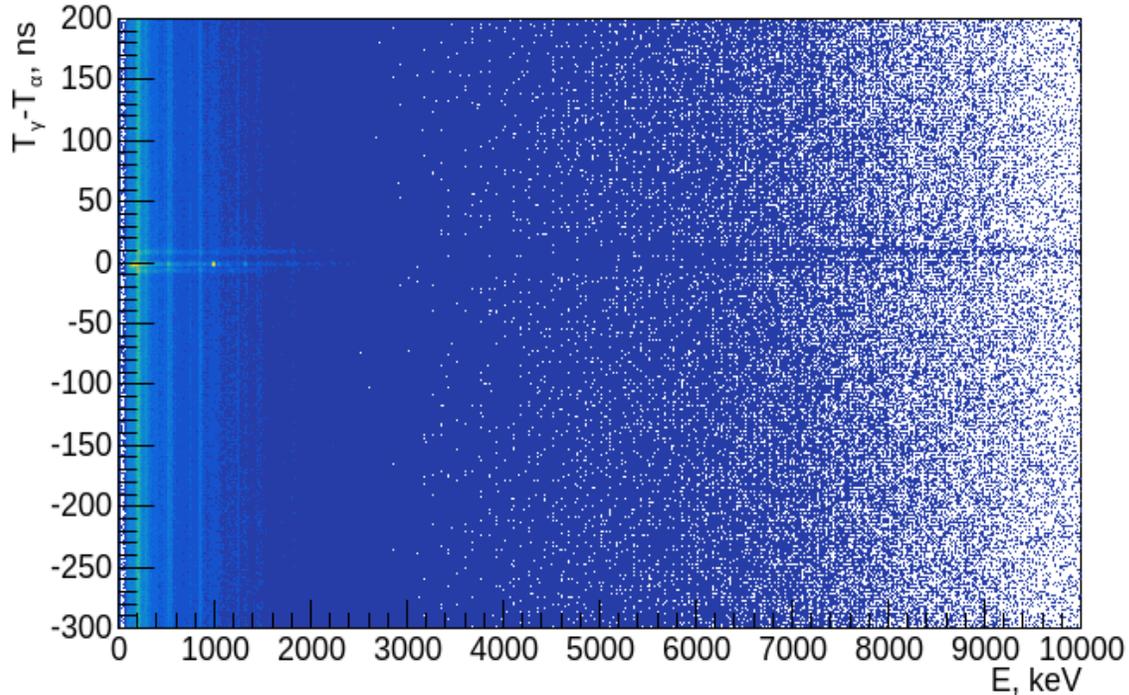


Покрытие
«починилось»

Обработка данных

Отбор событий по времени

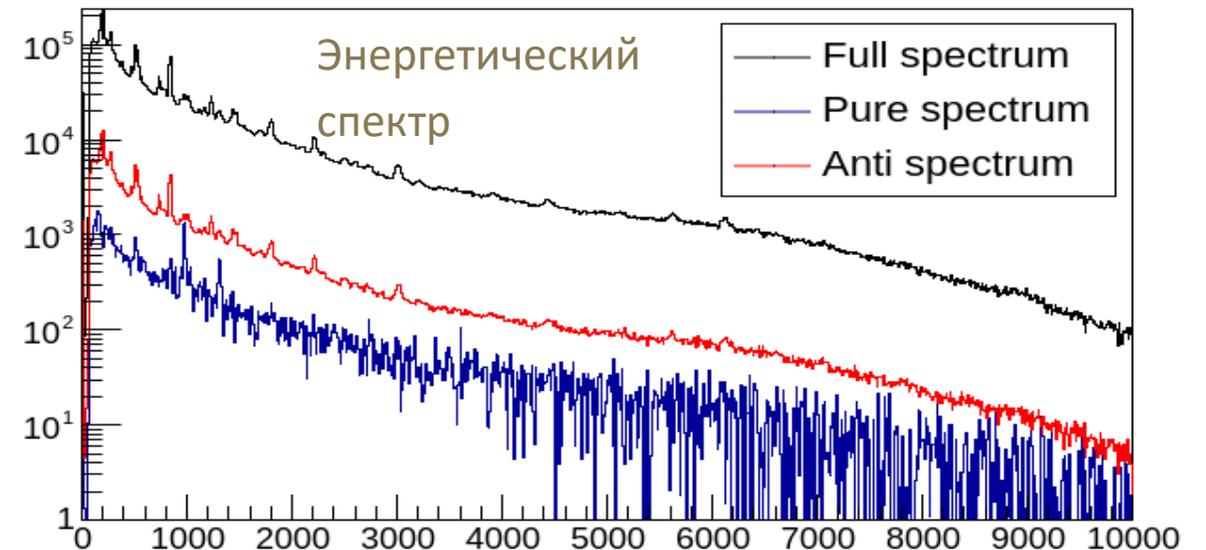
Time-Energy spectrum



Мы анализируем двумерные энерго-временные спектры (вверху).

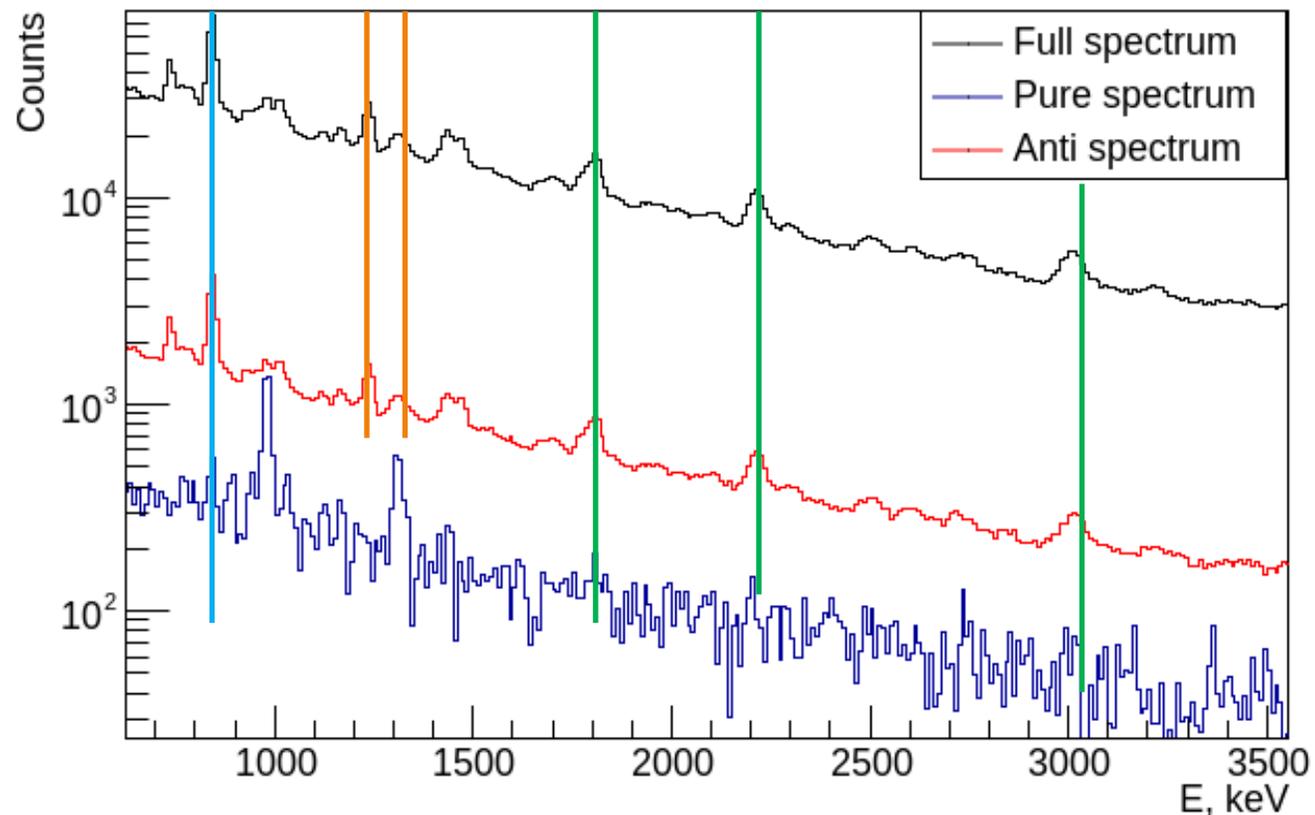
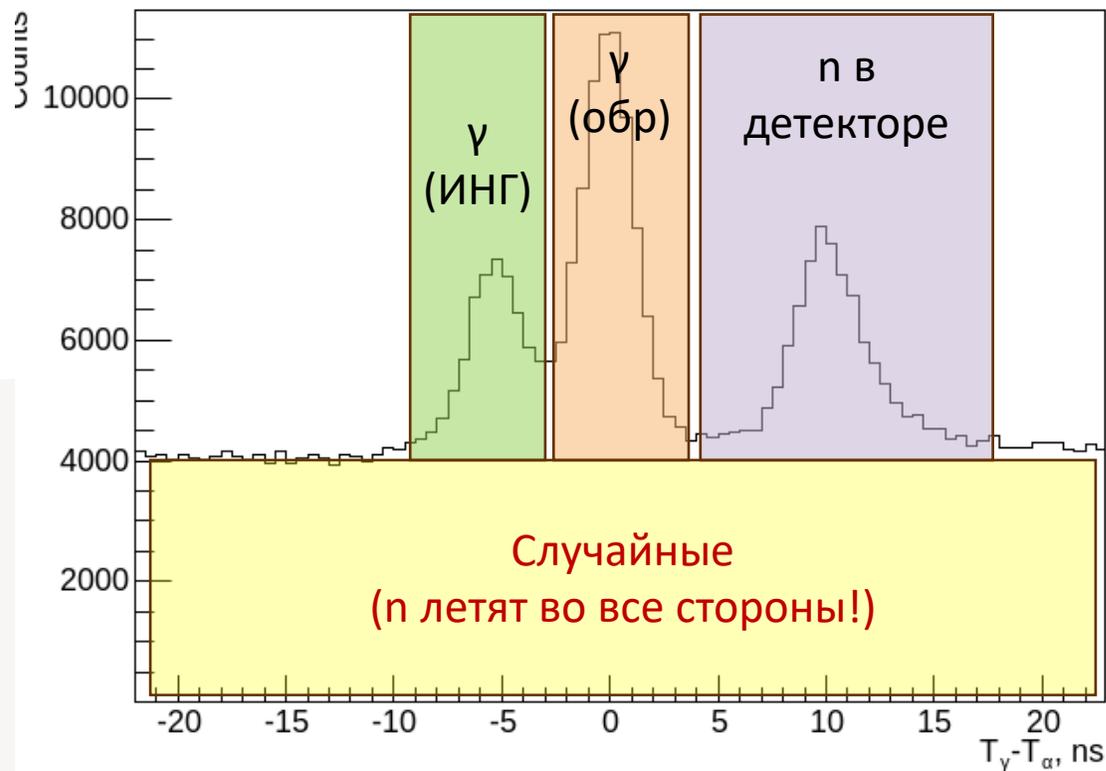
Этапы анализа:

1. Вычитание случайных совпадений
2. Выделение событий от образца по времени



Отбор событий по времени – учет случайных

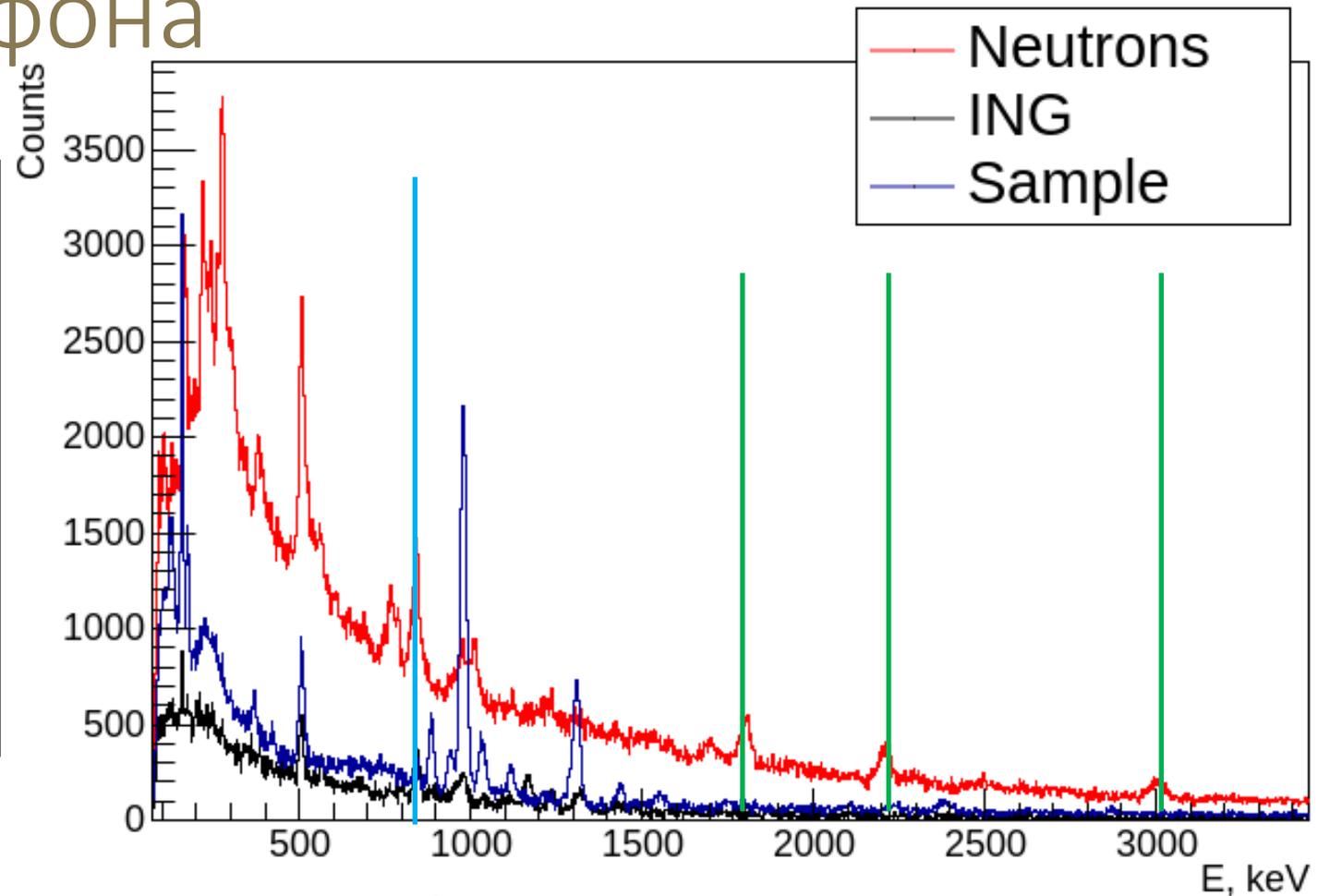
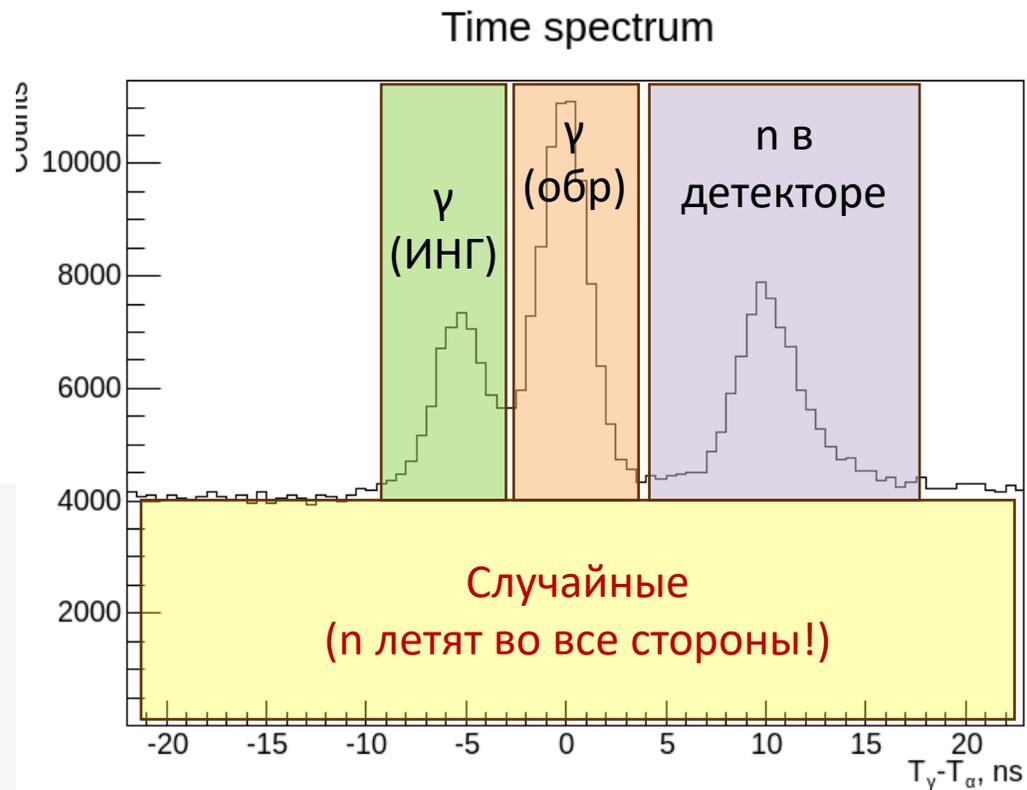
Time spectrum



Эффект от вычитания фона случайных:

Зеленый – Al, оранжевый – Fe, голубой – Al+Fe

Отбор событий по времени – разделение коррелированного фона



Разделение событий по времени:

Зеленый – Al, голубой – Al+Fe

*сумма по всем пикселям, в одной статистике слишком мала, поэтому площади спектров не соответствуют интегралам компонент временного спектра

Что дальше?

У нас есть энергетические спектры γ -квантов из образца для каждой комбинации «пиксель-детектор». Однако:

1. **Статистики не хватает** для аппроксимации фотопиков. **И измерять подольше нельзя.**
2. Для увеличения статистики мы сделали образцы огромными. Теперь надо разбираться с **поглощением γ -квантов** и **многократным рассеянием n .**

Решение:

1. Комбинации «пиксель-детектор» нужно суммировать (а как?).
2. Поглощение γ -квантов и многократное рассеяние n можно учесть Монте-Карло поправками.

Считаем сечение?

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{N_p \cos\xi}{4\pi N_\alpha n_{at} k} 10^{27} \left[\frac{\text{mbarns}}{\text{sr}} \right]$$

Площадь γ -пика

Угол падения пучка на образец

Количество меченых нейтронов

Поверхностная плотность атомов ($\rho/M \cdot I \cdot N_A$)

Полное сечение

$$\sigma = 2\pi \int_{-1}^1 \frac{d\sigma}{d\Omega}(\cos\theta) d\cos\theta$$

$$k = \int_0^{x_0} \varepsilon(x) k_{ms}(x) k_{satt}(x) k_{iatt}(x) dx$$

Толщина образца

Поправка на многократное рассеяние

Поглощение γ -излучения

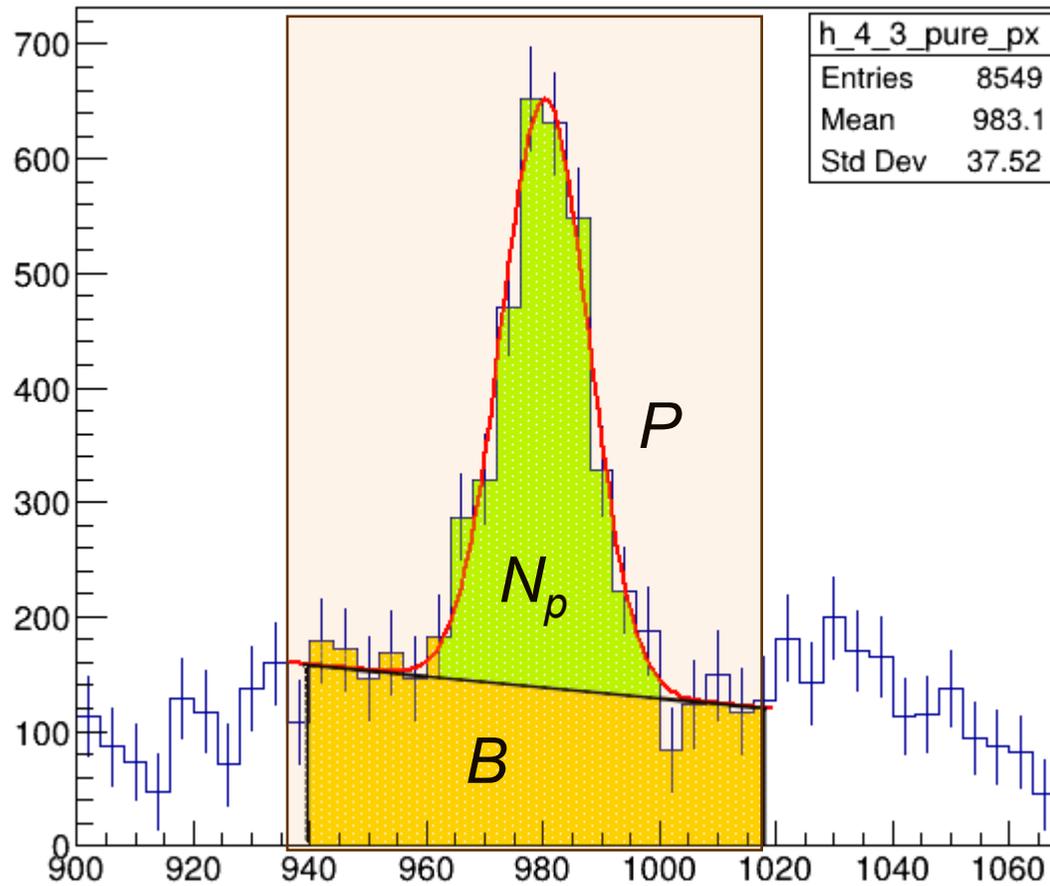
Ослабление потока начальных нейтронов

Полная эффективность γ -детектора

У нас большие образцы. Поэтому:

- Все поправки оказываются зависимыми от координаты внутри образца
- Итоговая поправка – свертка поправок на отдельные эффекты

Суммируем...



$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{N_p \cos \xi}{4\pi N_\alpha n_{at} k} 10^{27} \left[\frac{\text{mbarns}}{\text{sr}} \right]$$

НО

$$N_p = \sum_{j=j_0}^{j_n} (P_j - B_j)$$

т.е. можно применить поправки побиново, а В учтется при аппроксимации

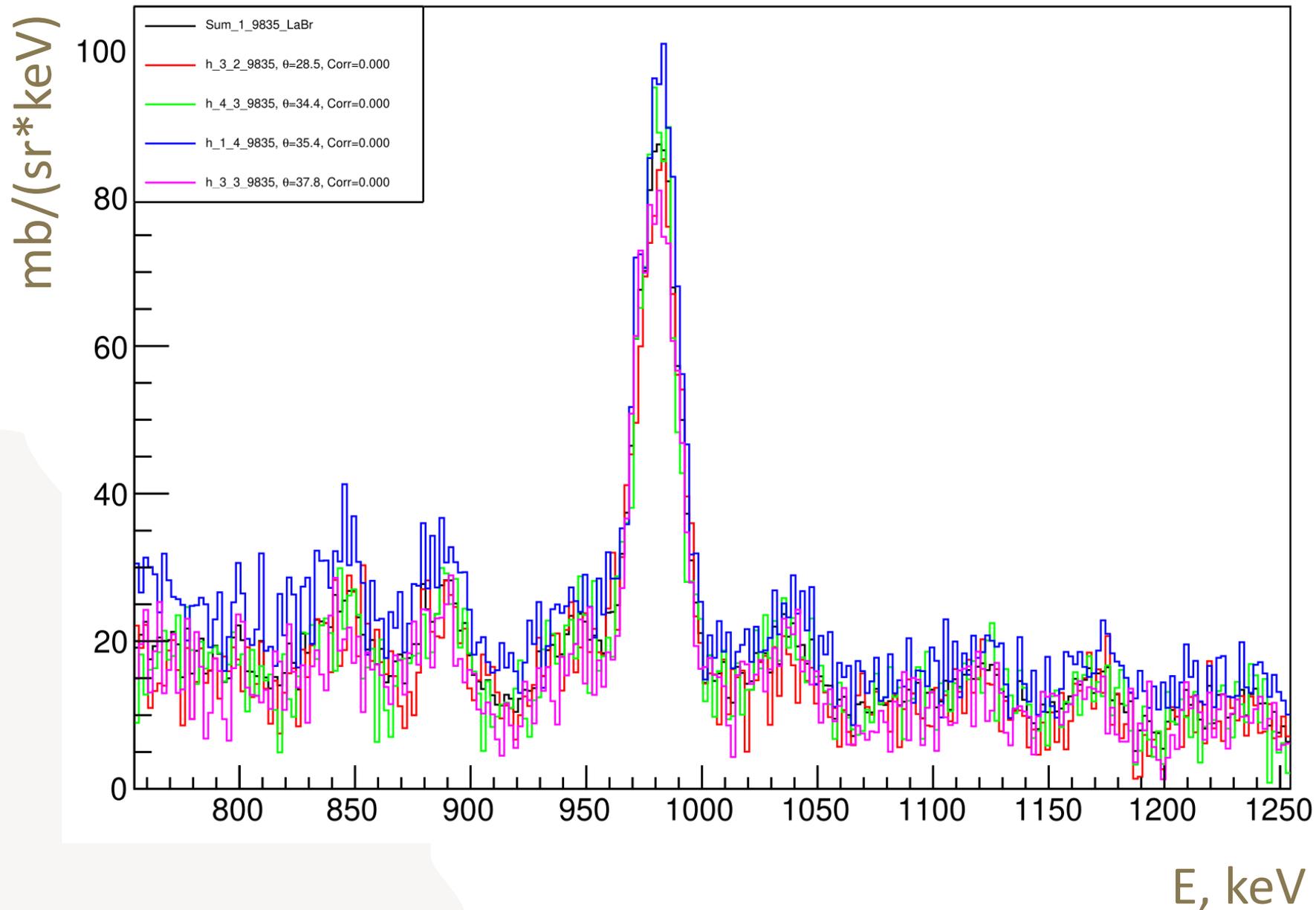
Но: k индивидуальна для γ -перехода и комбинации пиксель-детектор

$N_\alpha, \cos \xi$ – для пикселя

Решение – усредняем «отрезки» спектров, в которых помещается фотопик с

домножением на $\frac{\cos \xi^h}{4\pi N_a^h n_{at} k^h} 10^{27}$, где h – индекс соответствующий комбинации «пик-пиксель-детектор»

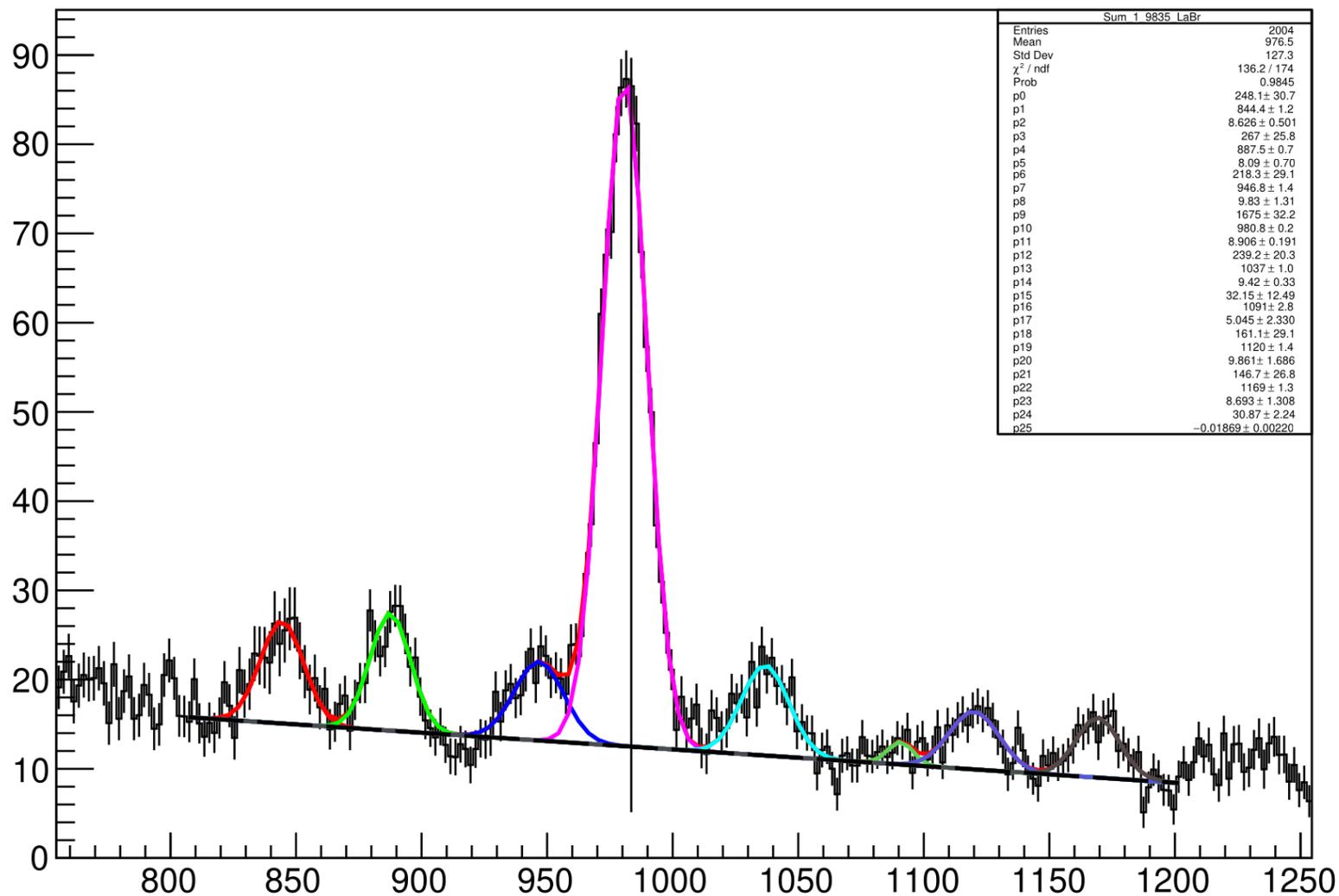
Суммируем...



Бонус: результат
аппроксимации
сразу в мб/стр

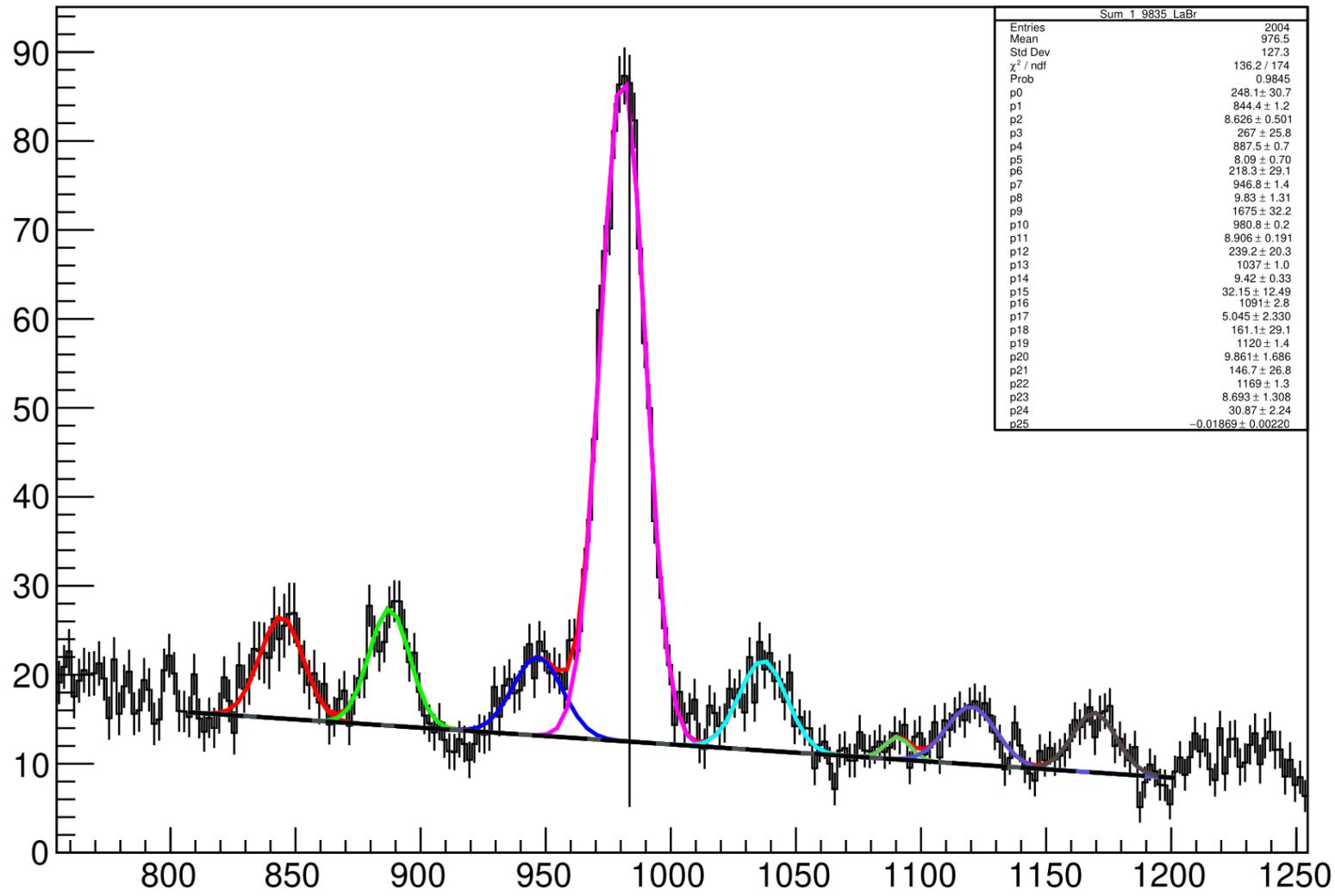
**Таких «кусков» -
сотни на один
эксперимент!**

Обработка данных



«И как все это фитировать?!»

«И как все это фитировать?!»



«Общее» начальное приближение

Оценка подложки по интервалам вне пиков

Оценка амплитуд пиков по оцененной подложке

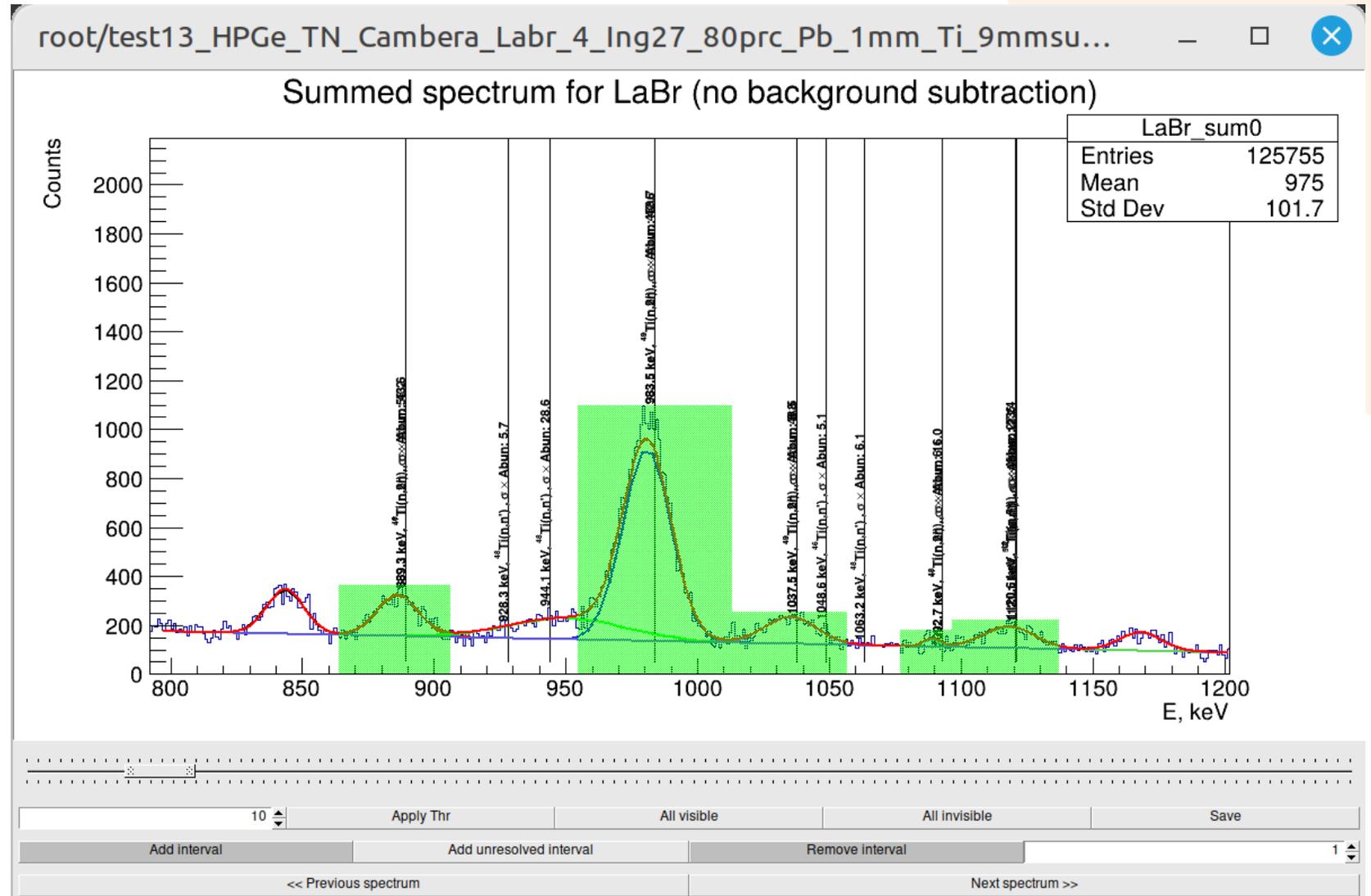
Аппроксимация

Сохранение

Естественные нейросети

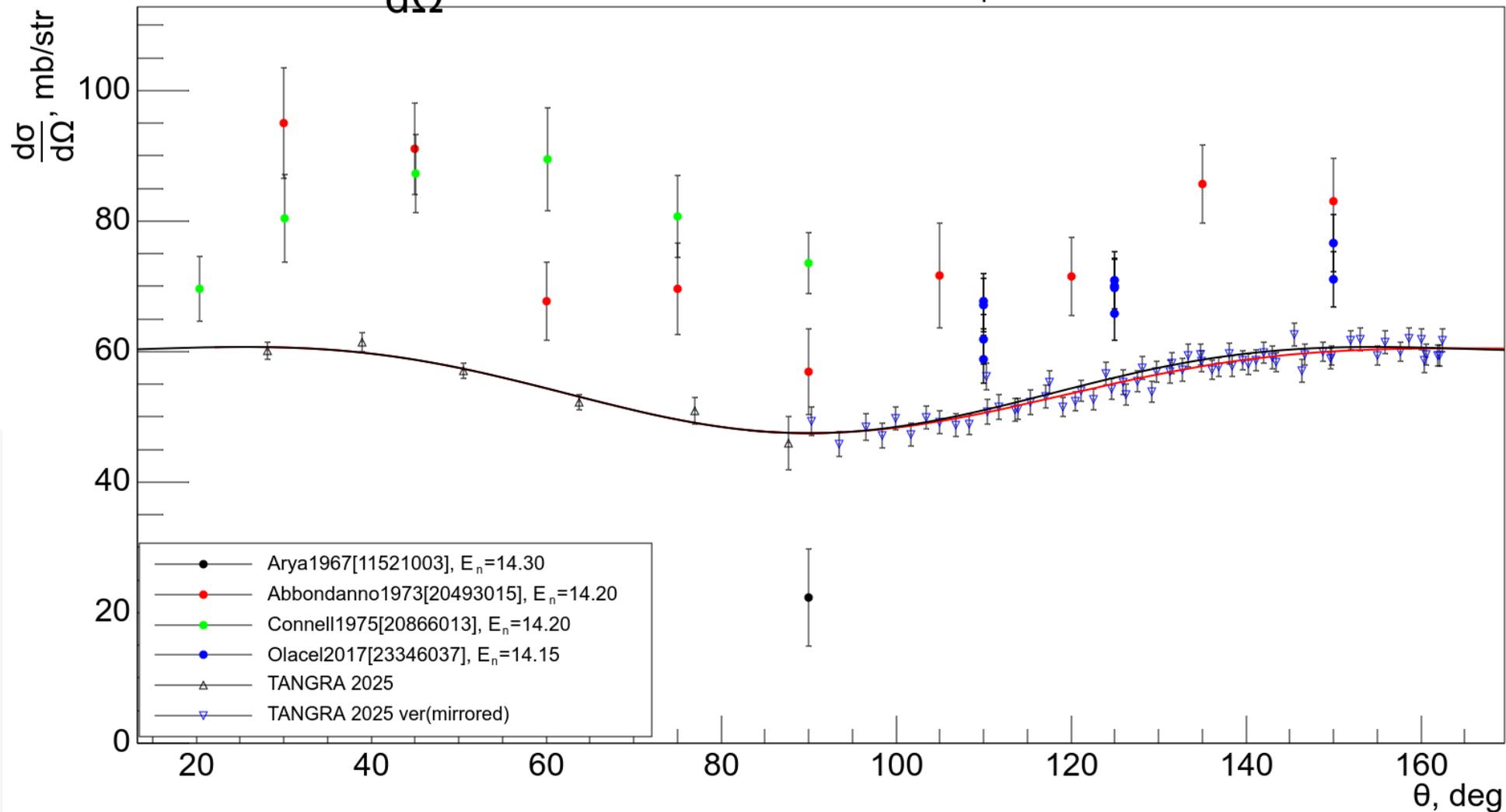
GUI-приложение для разметки спектров

- Для разметки используется суммарный спектр – максимально возможная статистика
- Пики идентифицируются по RIPL-3 с модельными оценками TALYS
- Для генерации начальных приближений: положения, ширины и относительные амплитуды пиков

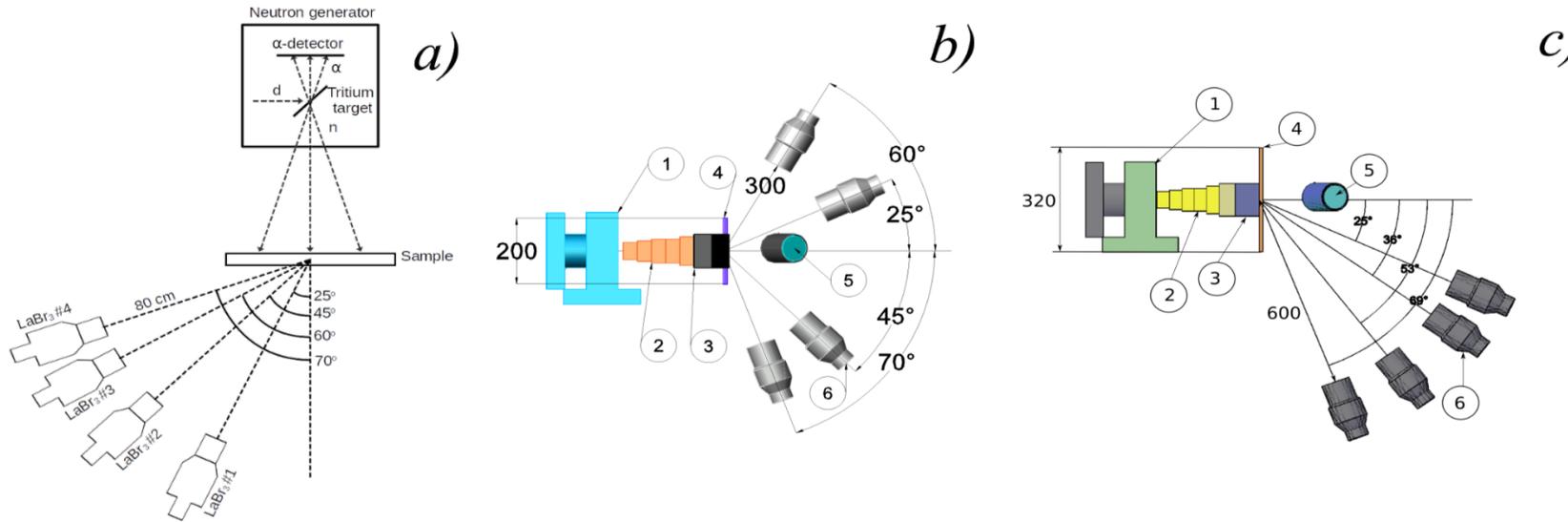


Результат

$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ for $^{48}\text{Ti}(n,n') + ^{49}\text{Ti}(n,2n)$, $E_n = 983.5$ keV



Оценка погрешностей



Source	Contribution (%)		
Configuration	<i>a)</i>	<i>b)</i>	<i>c)</i>
Efficiency	5 (0-3 MeV), 10 (>3 MeV)		
γ -ray attenuation	2		
Multiple neutron scattering	7		
Neutron beam coverage	0	5	2
α -detector crosstalk	1		
Number of nuclei	2		
Total	9.1 (0-3 MeV) 12.6 (>3 MeV)	10,4 (0-3 MeV) 13,5(>3 MeV)	9.3 (0-3 MeV) 12.7 (>3 MeV)

Достигнутые результаты

Измерено

Группа → ↓ Период	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18									
1	1 H	Данные доступны в EXFOR										34						2 He									
2	3 Li	4 Be	Измерено нами впервые										20	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne								
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar									
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr									
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe									
6	55 Cs	56 Ba											72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra											104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
Лантаноиды			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu										
Актиноиды			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr										

Ситуация с данными по $(n, \chi\gamma)$ сейчас

Данные по $(n, \chi\gamma)$ востребованы физикой и техникой, качество имеющихся скорее неудовлетворительное

Активные проекты:

- GAINS (Gamma Array for Inelastic Neutron Scattering) на GELINA (IRMM, Гиль, Бельгия) – **фотоядерный источник, HPGe спектрометр. Угловые распределения не измеряются.**
- CoGNAC (Correlated Gamma-Neutron Array for Scattering) в Национальной лаборатории Лос-Аламоса – **spallation. Большой массив детекторов для γ и нейтронов**
- GENESIS (Gamma Energy Neutron Energy Spectrometer for Inelastic Scattering) в Национальной лаборатории Лоуренса в Беркли – **реакции с дейтронами. Детекторы HPGe и EJ-309**

Ситуация с данными по (n, X_γ) сейчас

Группа→ ↓Период	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H						GAINS												2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F		10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl		18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br		36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I		54 Xe
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At		86 Rn
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts		118 Og
Лантаноиды				57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
Актиноиды				89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

- Наши данные согласуются в пределах ошибок с GAINS (там, где они доступны)

Перспективы

Возможное продолжение работ в данном направлении:

- Измерение $(n, \chi \gamma)$ при других энергиях (А.В. Андреевым разработана теория, описывающая энергетическую зависимость $\frac{d\sigma}{d\Omega}$)
- Измерение $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ для (n, n) , (n, n') , а также спектров нейтронов и сечений $(n, \chi n)$ в широком диапазоне энергий нейтронов

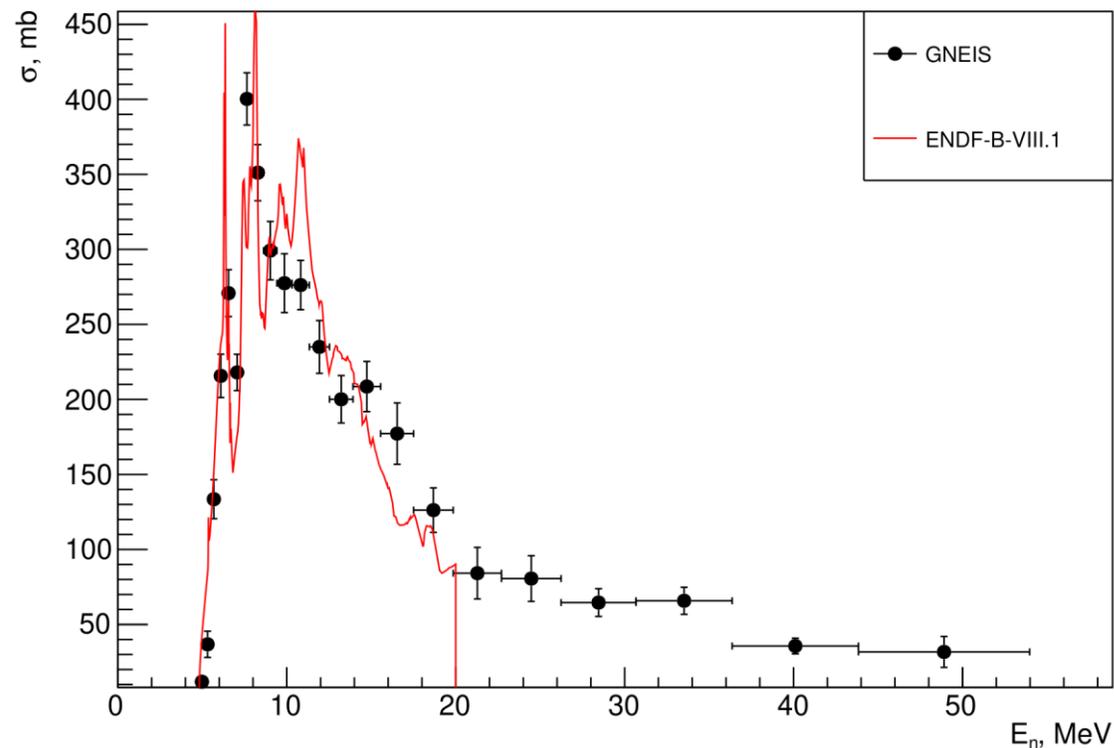
Установка – ГНЕЙС (ПИЯФ, Гатчина) – spallation источник

Эксперимент на ГНЕЙС



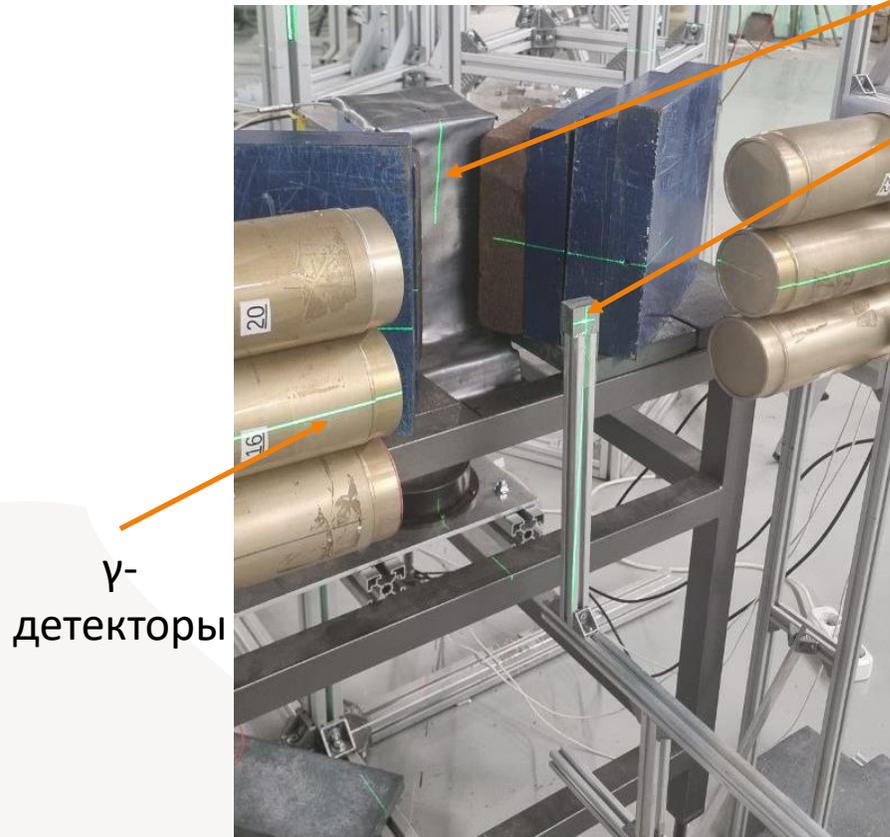
- 12 детекторов EJ-301
- 3 LaBr₃(Ce)
- Монитор – камера ²³⁵U

σ_γ for 4.4 MeV transition



- Сечение излучения линии 4,4 МэВ – (n,n'γ) на углероде
- Очень предварительно!

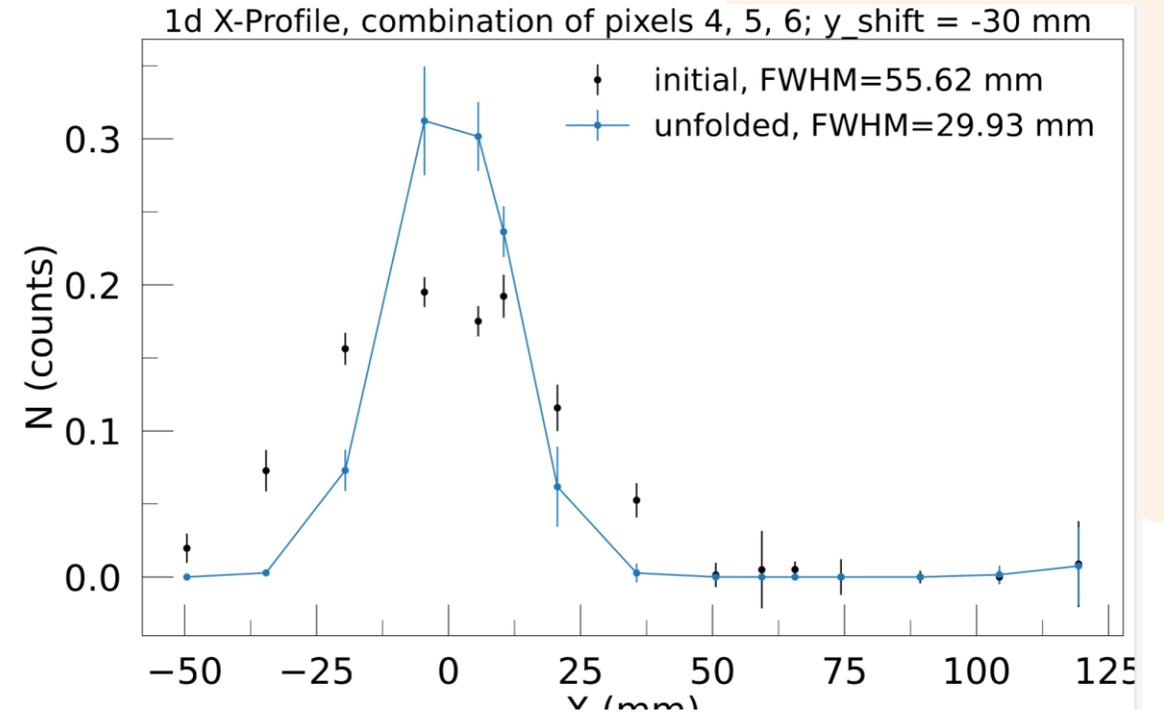
Позиционная чувствительность?



ИНГ-27

Образец
(на системе
перемещения)

γ-
детекторы



- пластины из чистого титана 25x25 мм, перемещались вокруг положения центрального пучка в квадрате размером 60x60 мм
- Для реконструкции измеренных профилей использовался алгоритм Ричардсона-Люси

Заключение

- Выполнено измерение сечений излучения γ -квантов в реакциях $(n, X\gamma)$ на 54 элементах, в т.ч. На 20 – впервые
 - Используя преимущество ММН в виде эффективного подавления фона
 - И героически преодолевая его недостатки
 - В процессе создан софт, упрощающий жизнь обработчику – TalysLib для работы с ядерными данными, ROOTFitLib – библиотека, позволяющая вручную поправлять фиты.
 - Разработали теорию для описания угловых распределений γ -квантов. Все в семинар не влезает...
- Наши результаты согласуются в пределах ошибок с наиболее актуальными доступными данными – есть надежда, что у нас правильные и новые данные
- ММН не является «волшебной таблеткой», и достаточно нишевая штука. Или нет?

Публикации

1. [Yu N. Kopatch et al., Physics of Particles and Nuclei Letters 22 \(2025\) 276](#)
2. [A. V. Andreev et al., Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 89 \(2025\) 1254.](#)
3. [D. N. Grozdanov et al., European Physical Journal A, 61\(10\):224, 2025.](#)
4. [P. Prusachenko et al., Chinese Physics C, 50 \(2026\).](#)
5. [P. S. Prusachenko et al., Atomic Data and Nuclear Data Tables 168 \(2026\) 101781.](#)
6. [P. I. Kharlamov et al., Physics of Particles and Nuclei Letters 23 \(2026\) 28.](#)
7. [База данных по сечениям излучения \$\gamma\$ -квантов](#)

СПАСИБО



Cross section calculation

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{N_p \cos \xi}{4\pi N_\alpha n_{at} k} 10^{27} \left[\frac{\text{mbarns}}{\text{sr}} \right]$$

Area of γ -peak $\rightarrow N_p \cos \xi$

Incident angle $\rightarrow \xi$

Number of tagged neutrons $\rightarrow N_\alpha$

Surface density of atoms in the sample $\rightarrow n_{at}$

Total reaction cross section

$$\sigma = 2\pi \int_{-1}^1 \frac{d\sigma}{d\Omega}(\cos\theta) d\cos\theta$$

- The features of the experimental approach are the close geometry and the quite large sample
- All corrections changed significantly depending on the target thickness
- We could not consider the various correction independently

$$k = \int_0^{x_0} \varepsilon(x) k_{ms}(x) k_{satt}(x) k_{iatt}(x) dx$$

Sample thickness $\rightarrow x_0$

Multiple inelastic scattering $\rightarrow k_{ms}(x)$

Attenuation of γ -rays $\rightarrow k_{satt}(x)$

Attenuation of incident neutron $\rightarrow k_{iatt}(x)$

The total efficiency $\rightarrow \varepsilon(x)$

Algorithm for determining the correction factor

There are two ways to calculate corrections:

- To calculate them independently in dependence on the sample thickness and take the integral
- **To simulate the total thickness-integrated correction in the GEANT4 using a separate ones as weighting factors**

Correction features:

- Multiple inelastic scattering overstates the number of emitted γ -rays
- Attenuation of incident neutrons and γ -rays understates the number of emitted γ -rays

Simulation features:

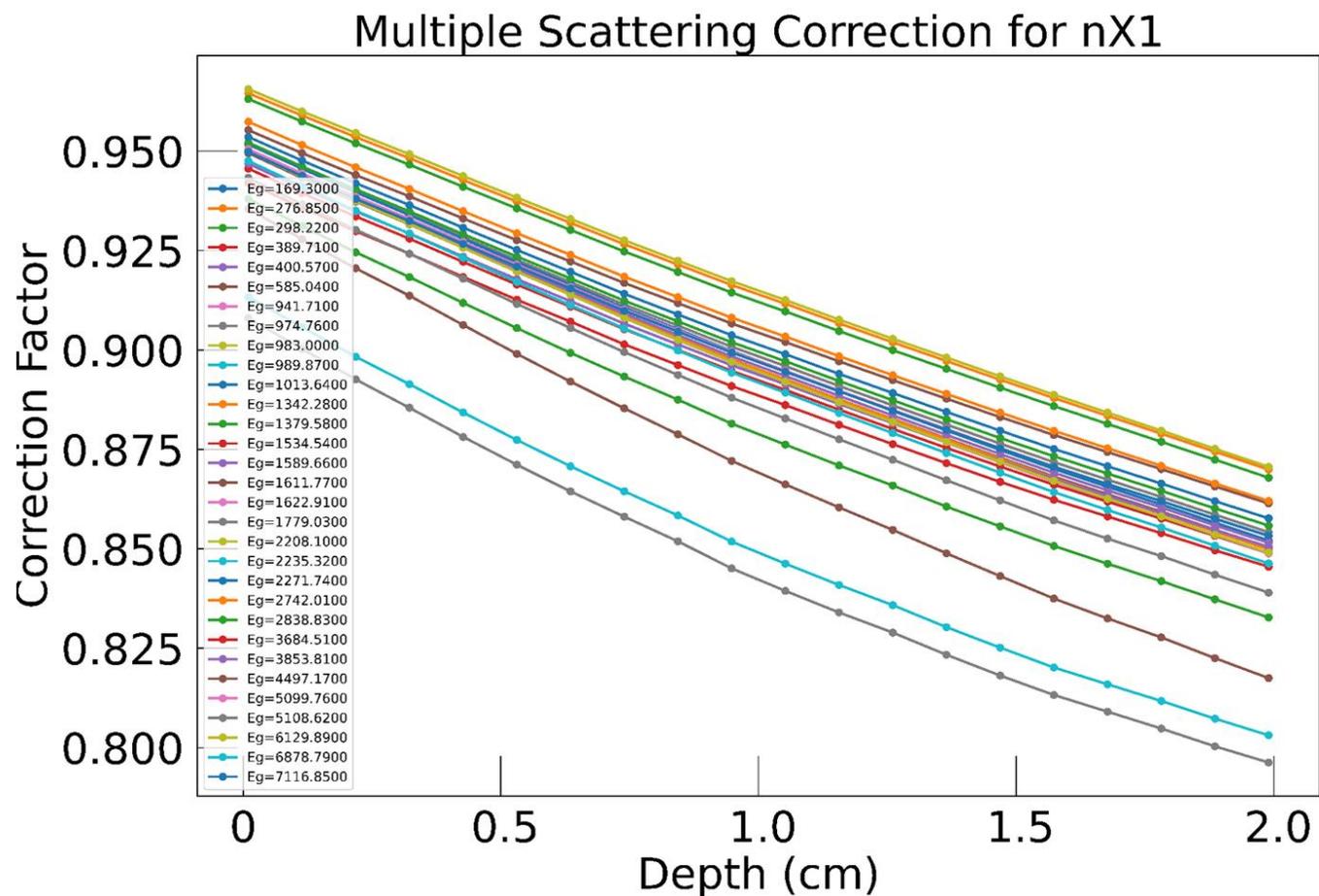
- 2 stage - neutron transport and γ -rays transport simulation
- The inelastic multiple scattering is used as a probability factor increasing the number of emitted γ -rays in comparison with its real number
- The inelastic multiple scattering correction calculates taking into account the energy dependence of emission cross section for specific γ -line taken from TALYS for each interaction point
- The correction factor resulted included thickness-integrated multiple scattering, absorption and efficiency coefficients

Simulation of the interaction point and neutron spectra depending on thickness

Calculation of the inelastic multiple scattering correction depending on the thickness

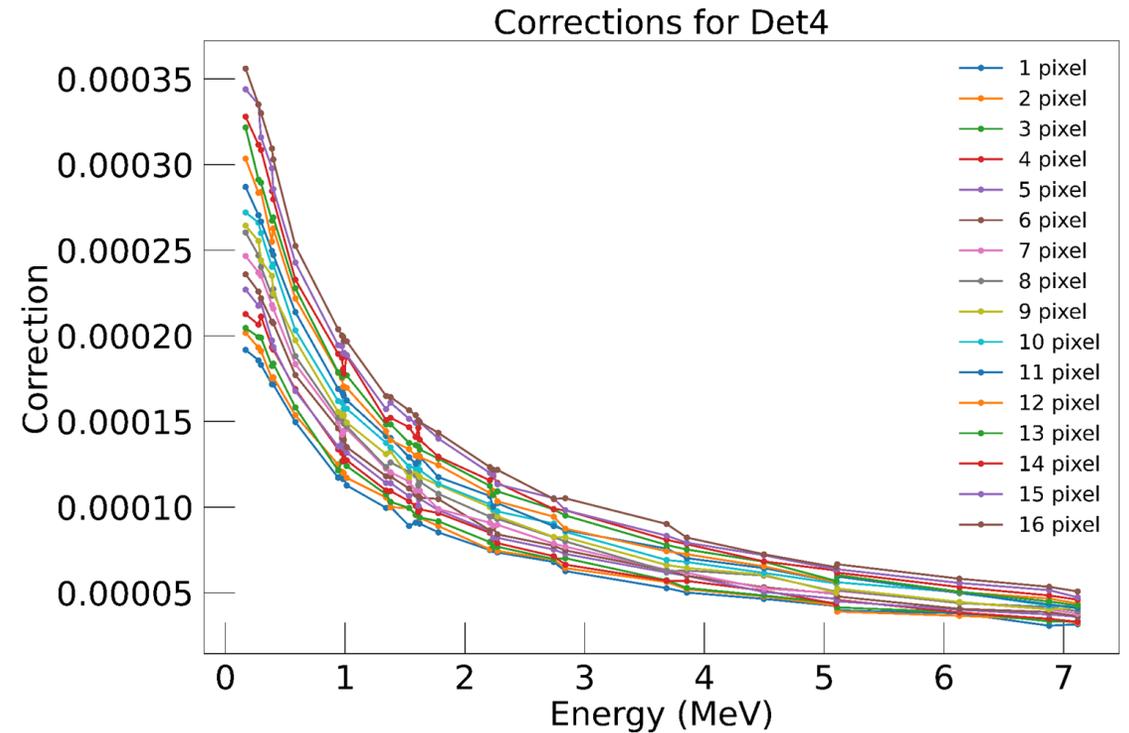
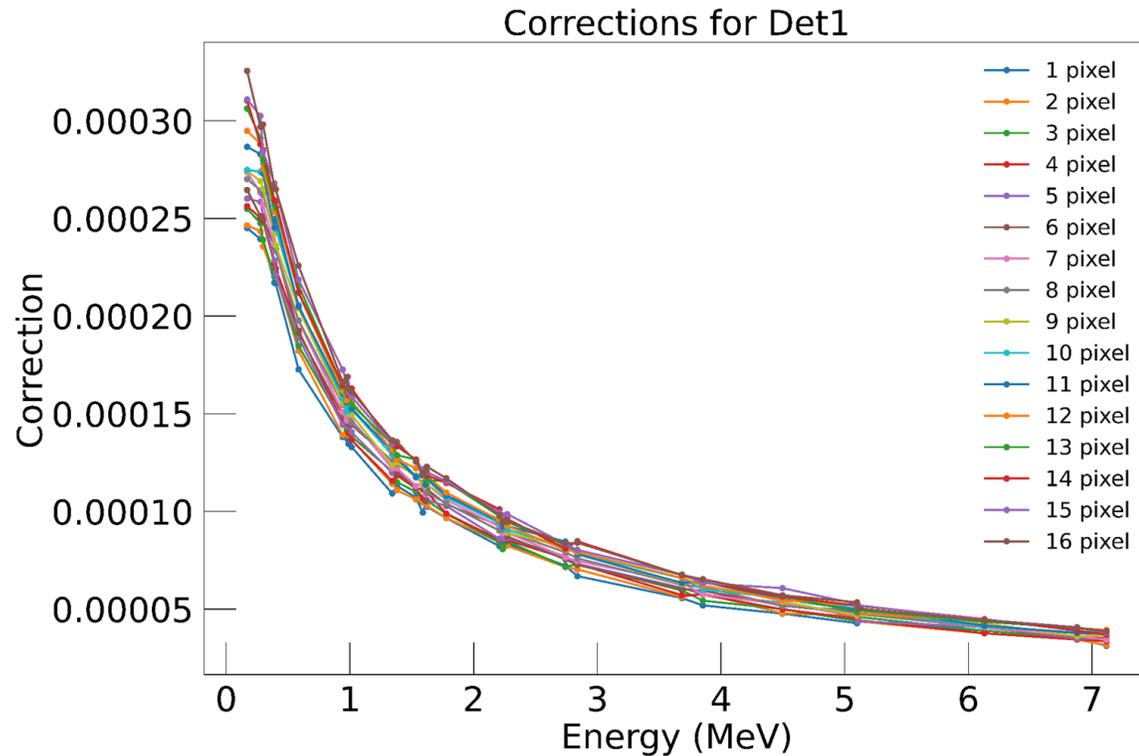
Simulation of γ -rays detection efficiency emitting them from the interaction points

Example of the multiple scattering correction



Multiple scattering correction factor depending on the sample thickness. The example corresponding to the SiO_2 sample and first vertical strip

Integrated correction factors using the example of the SiO_2 sample



The correction factors including the attenuation correction, total efficiency and multiple inelastic scattering corresponding to the various LaBr_3 detectors