



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Разработка сцинтилляционного спектрометра для детектирования реакторных антинейтрино

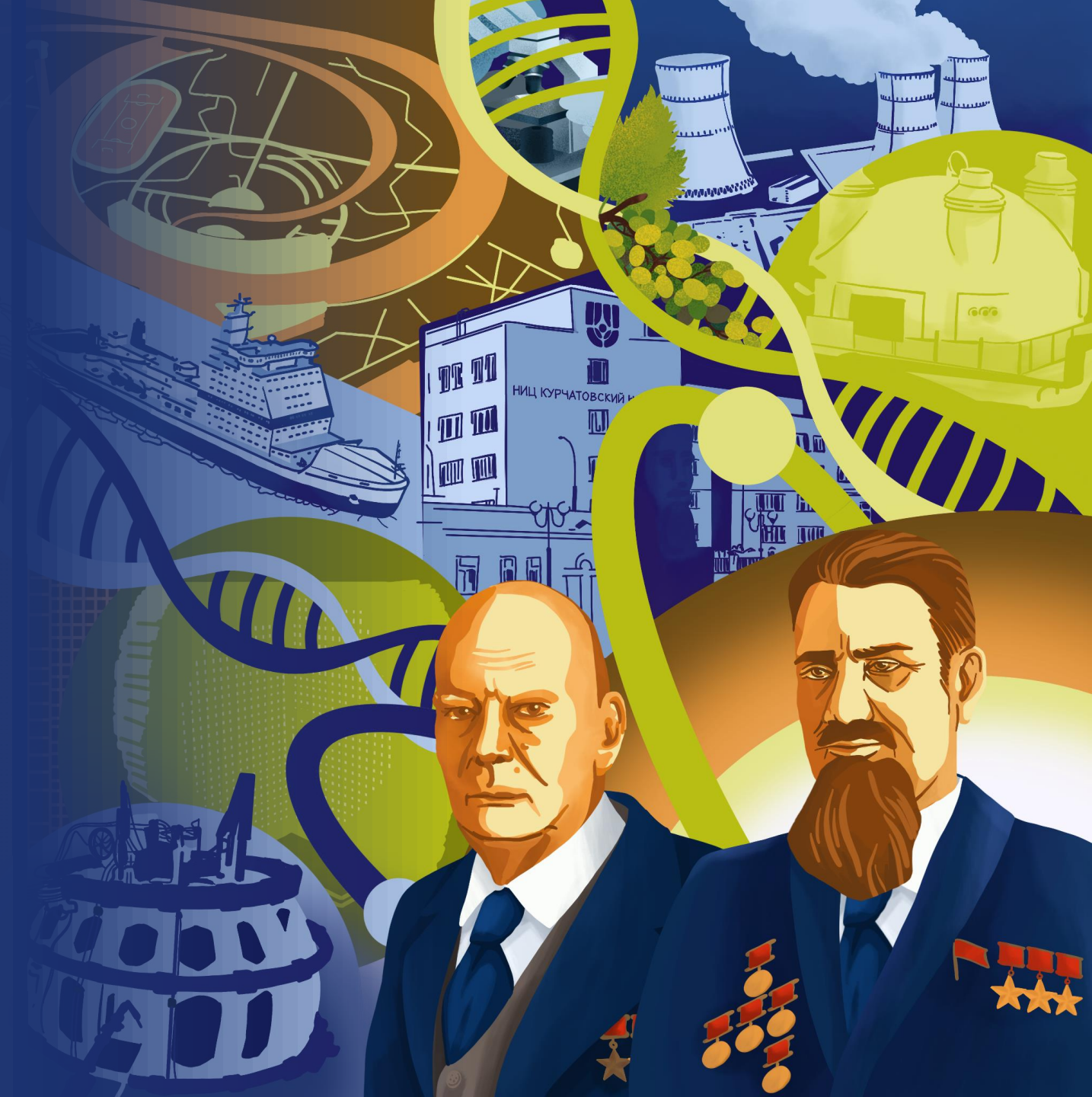
Студент: Р.Р. Биктимиров^{1,2,*}

Научный руководитель: Д.В. Попов^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

*Biktimirov_RR@nrcki.ru



- **Цель:**

Сборка блока модульного детектора реакторных антинейтрино на основе органических пластиковых сцинтилляторов и определение его спектрометрических характеристик.

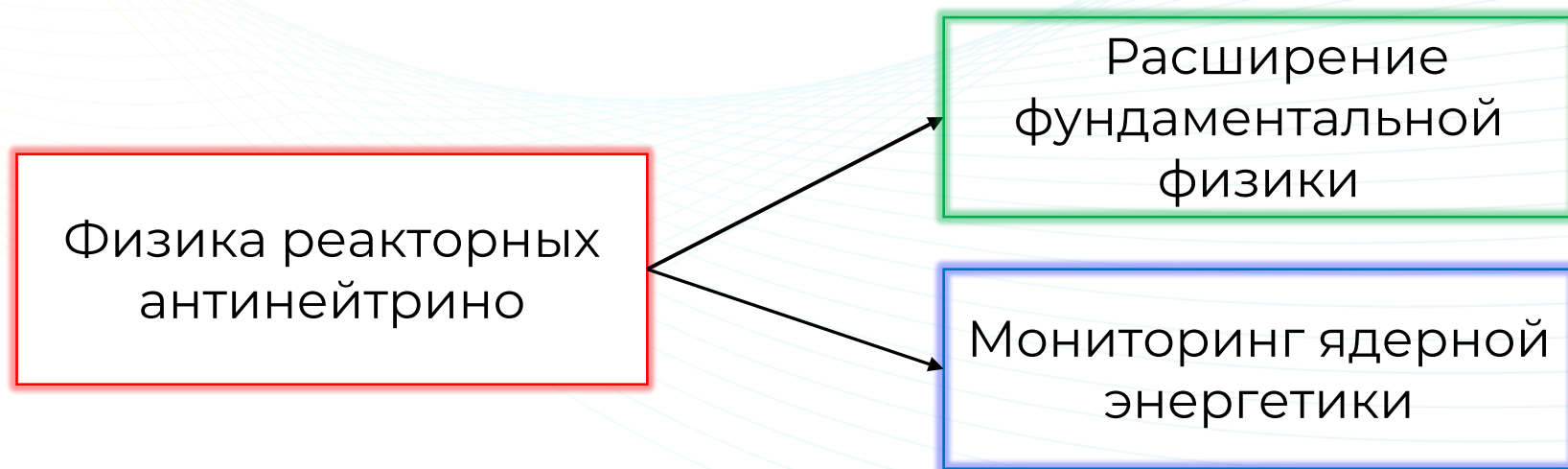
- **Задачи:**

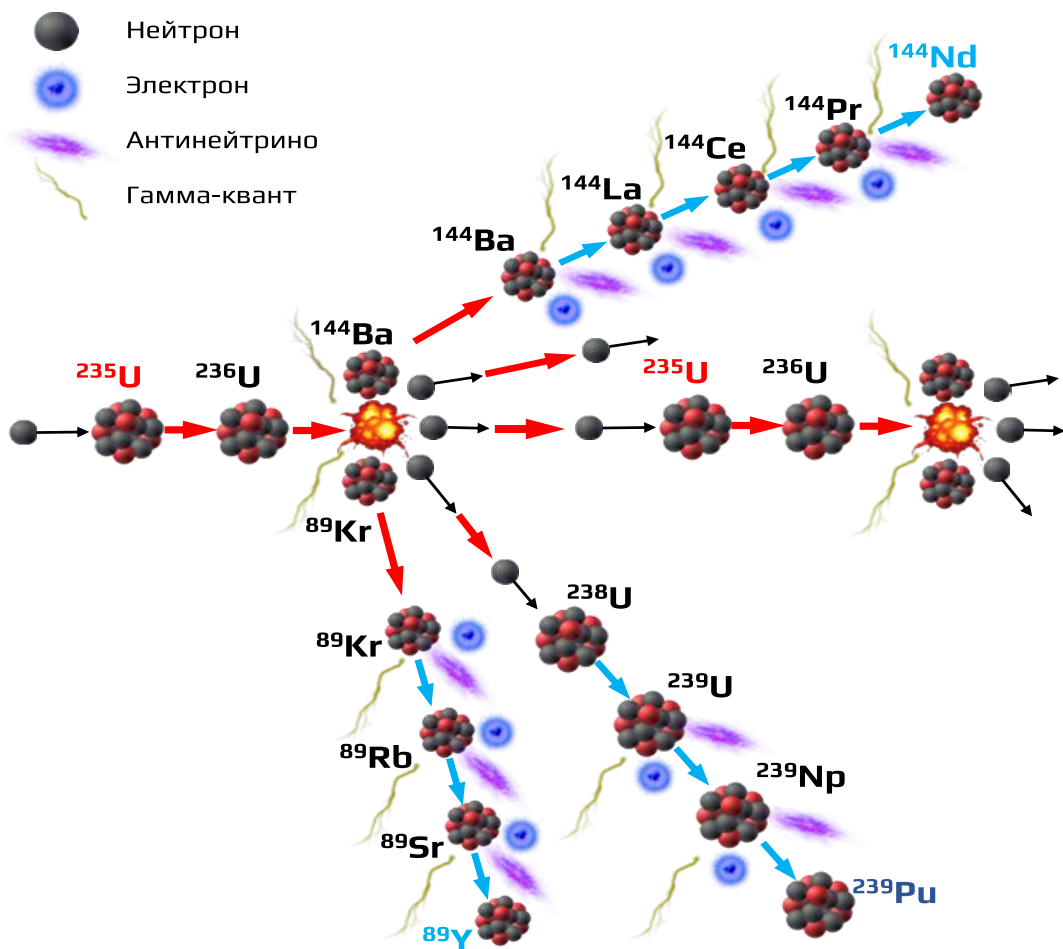
1. Подбор напряжения питания ФЭУ для выравнивания откликов спектрометров;
2. Определение основных спектрометрических характеристик в данной конфигурации;
3. Проверка применимости метода одновременного суммирования сигналов со всех модулей с точки зрения спектрометрии.



Фундаментальные исследования: исследование нейтринных осцилляций, определение иерархии масс нейтрино, поиски новой физики (реакторная антинейтринная аномалия, “bump effect”).

Прикладное приложение: проведение независимого мониторинга состояния и состава топлива ядерного реактора, определение мощности реактора и дистанционный контроль его энерговыработки.





1 деление:

- выделение энергии ~ 200 МэВ
- рождение $\sim 6 \bar{\nu}_e$

Основной вклад в рождение $\bar{\nu}_e$:

^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu

Для ядерного реактора мощностью $P = 3$ ГВт:

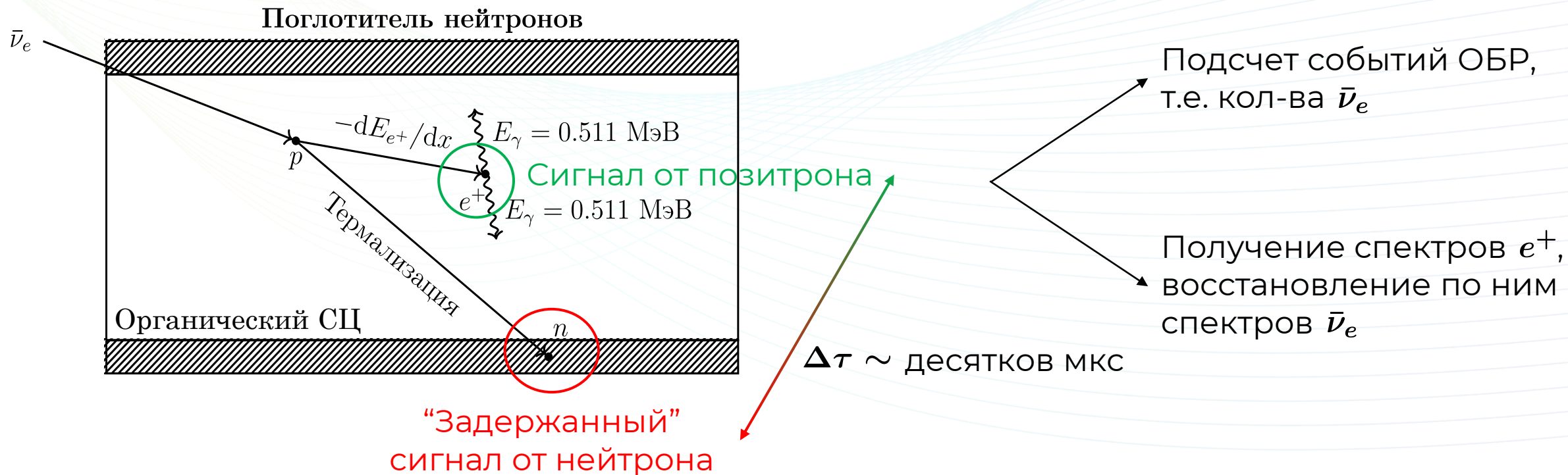
$$N_{\text{делений}} = \frac{3 \text{ ГВт}}{200 \text{ МэВ}} \approx 10^{20} [\text{с}^{-1}] \Rightarrow N_{\bar{\nu}} \approx 10^{21} [\text{с}^{-1}]$$

Ядерный реактор – самый интенсивный
искусственный источник $\bar{\nu}_e$



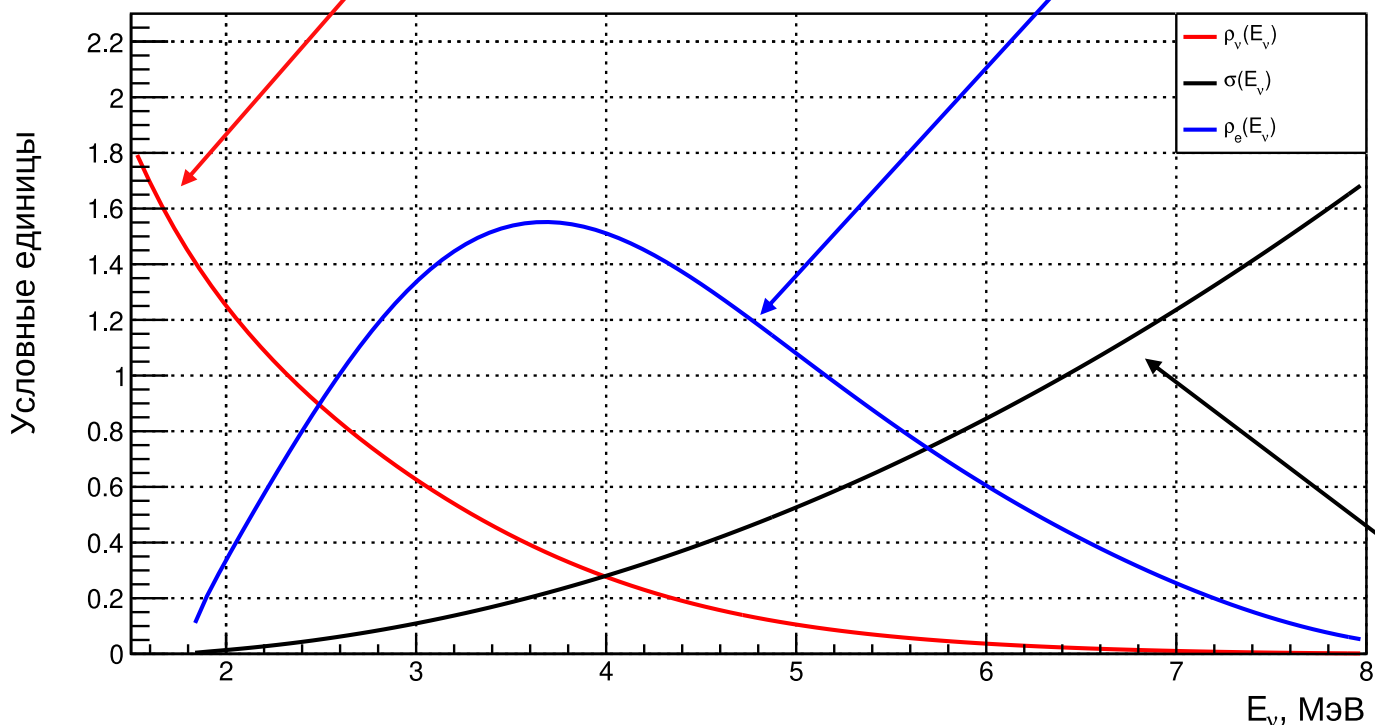
В 1956 г. Райнес и Коуэн экспериментально подтвердили существование нейтрино по реакции **обратного бета-распада (ОБР)** $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$. С 1956 г. и по настоящее время реакция ОБР широко используется в экспериментах по физике реакторных антинейтрино.

Метод задержанный совпадений ОБР:





Кумулятивный спектр антинейтрино Спектр позитронов



Диапазон энергий $\bar{\nu}_e$: от 0 до 8 МэВ

Порог энергии $\bar{\nu}_e$: $E_{\bar{\nu}_e}^{\text{пор}} \approx 1,803$ МэВ

Связь $E_{\bar{\nu}_e}$ с регистрируемой энергией $E_{\text{рег}}$:

$$E_{\bar{\nu}_e} \approx E_{\text{рег}} + 0,782 \text{ МэВ}$$

$E_{\text{рег}} = T_{e^+} + 2m_{e^+}$, где T_{e^+} – «потерянная» кинетическая энергия позитрона, m_{e^+} – масса позитрона.

Сечение ОБР: $\sigma \sim 10^{-43} \frac{\text{см}^2}{\text{деление}}$



Поглотитель нейтронов



Функциональный вид спектрометра

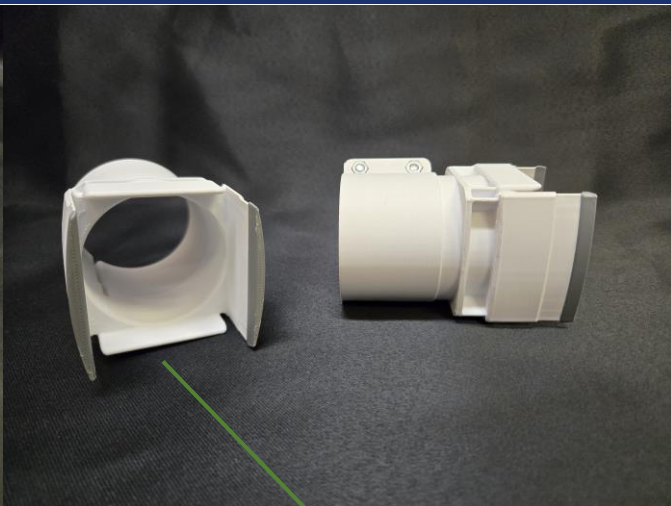
Спектрометр:

пластиковый сцинтиллятор (полистирол с добавками п-терфенил и ПОПОП) размерами (700 × 50 × 50) мм, сигнал с которого снимается вакуумными ФЭУ с эффективным диаметром фотокатода 46,5 мм.

Блок детектора: сборка из нескольких независимых спектрометров.



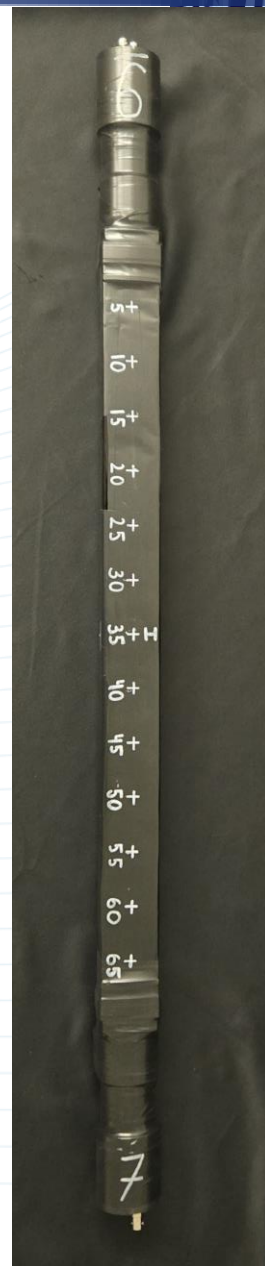
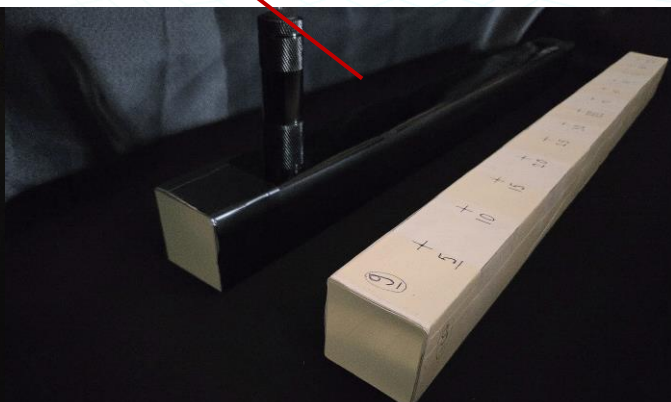
Светоизолированный ФЭУ



Крепеж для ФЭУ и сцинтиллятора

Светоизолированный
пластиковый сцинтиллятор

Светоизолированный
модуль



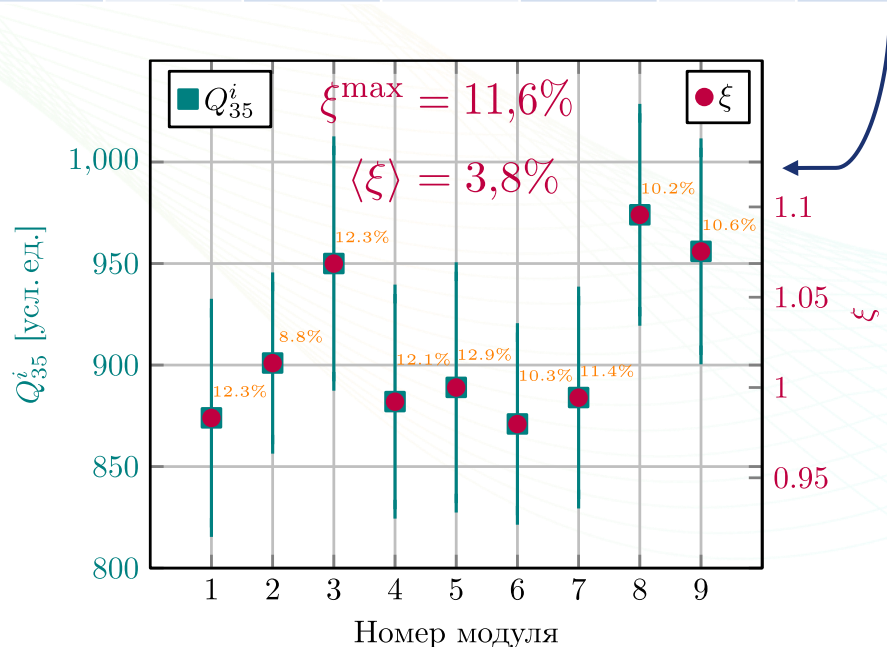


18 инд. каналов
высокого

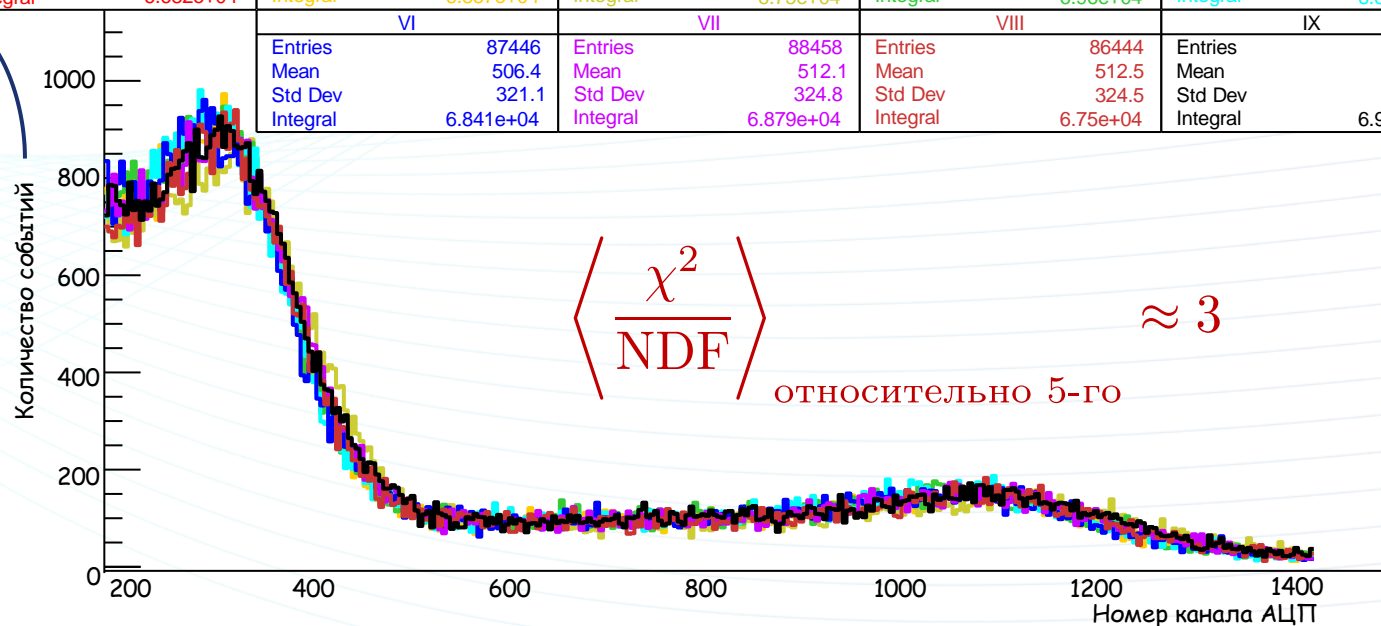


ФЭУ	U, В	R, кОм	ФЭУ	U, В	R, кОм	ФЭУ	U, В	R, кОм
7	1180	389	8	1130	703	6	1200	274
9	1215	191	10	1110	829	11	1210	220
15	1145	602	1	1210	220	5	1100	832
17	1115	796	2	1145	602	18	1100	832
4	1250	0	3	1145	602	12	1180	389
13	1115	796	14	1210	220	16	1100	832

Таблица со значениями напряжений и соответствующих сопротивлений на плате разветвителя для выравненных откликов



	I	II	III	IV	V
Entries	86527	86054	86080	88793	87766
Mean	504.2	507.9	515.6	507.3	508.4
Std Dev	317.9	322.2	328.7	321.1	321.9
Integral	6.682e+04	6.857e+04	6.75e+04	6.96e+04	6.883e+04
	VI	VII	VIII	IX	
Entries	87446	88458	86444	88580	
Mean	506.4	512.1	512.5	514.6	
Std Dev	321.1	324.8	324.5	326.8	
Integral	6.841e+04	6.879e+04	6.75e+04	6.977e+04	

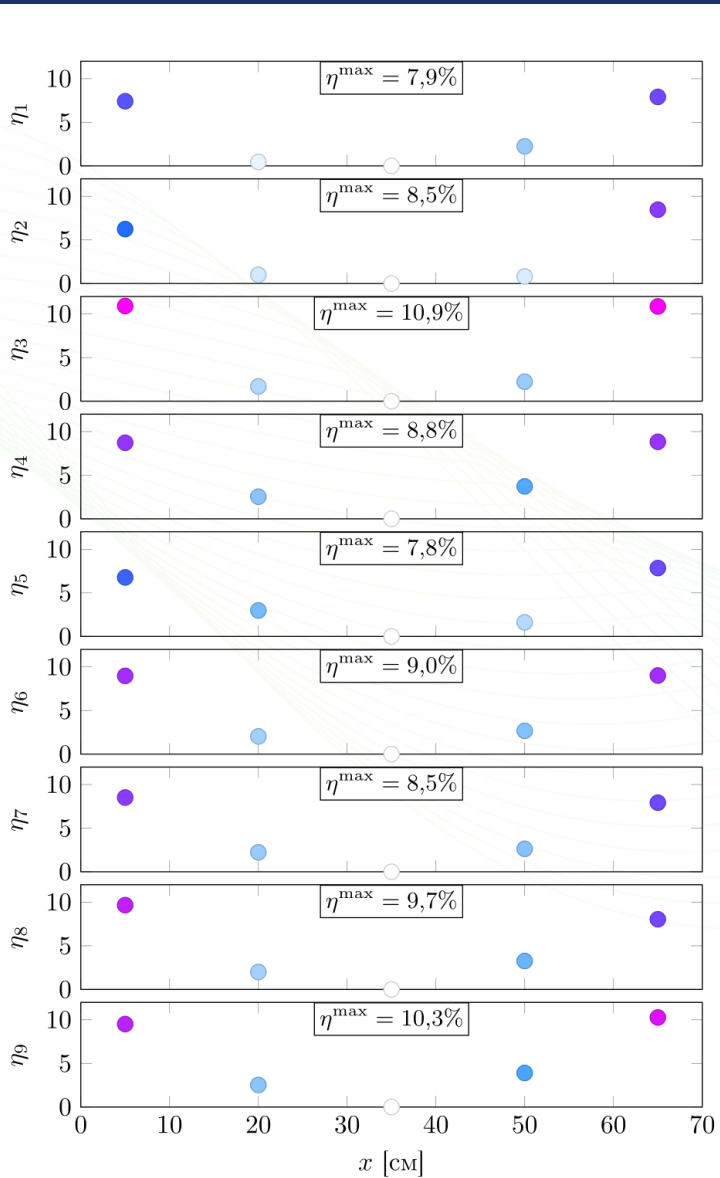


Сгонка откликов варьированием напряжения, натрий в 35 см, питание напрямую с HV, инд. сигнал

Цезий в 35 см индивидуально на каждом модуле, питание с разветвителя напряжения, инд. сигнал

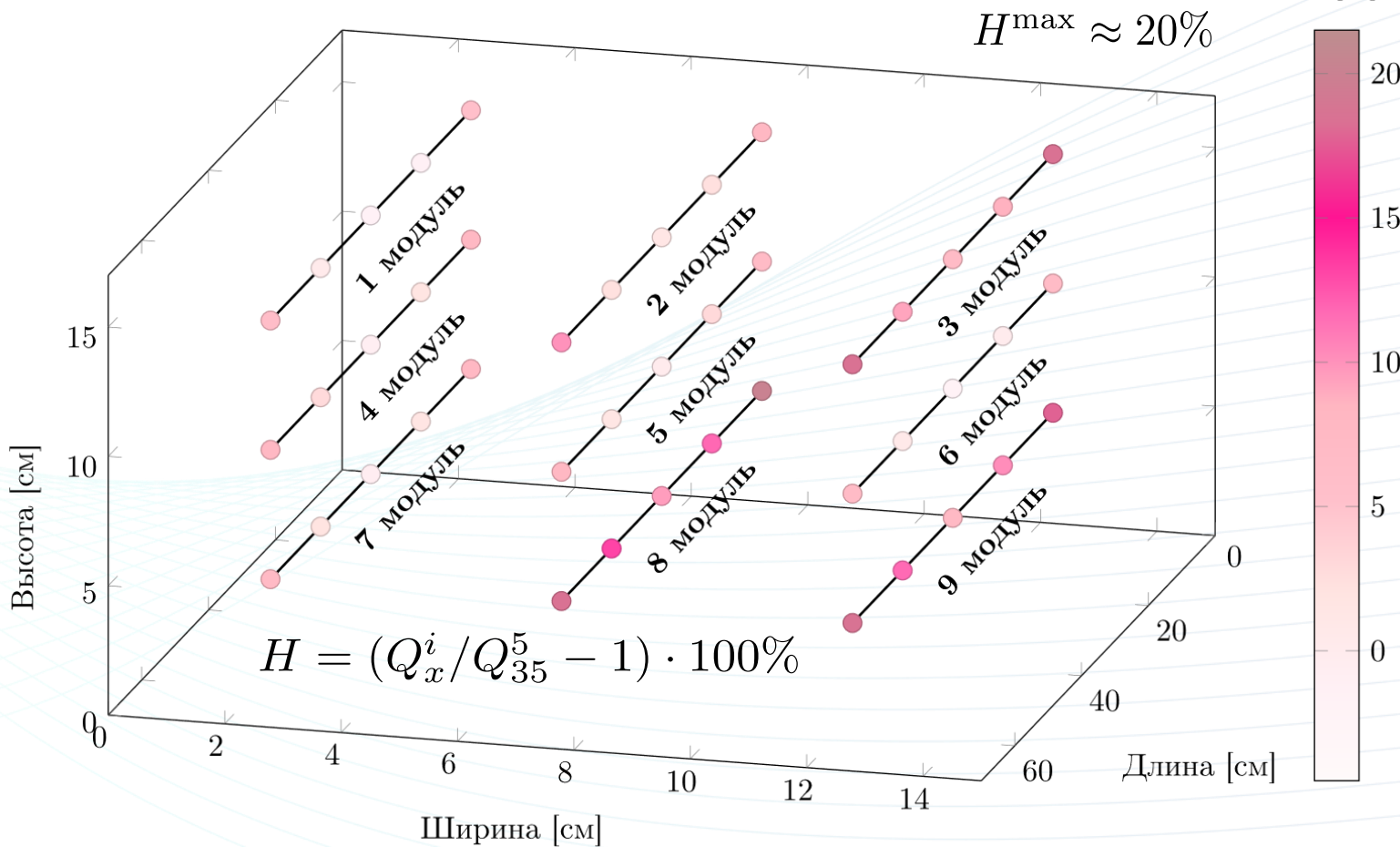
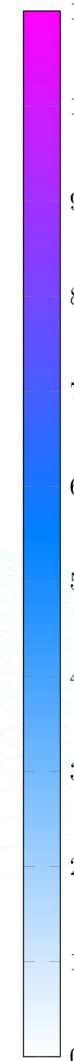
$\delta_{best} \approx 8\%$ — наилучшее разрешение по цезию на модулях, которого удавалось достигнуть без опт. контакта

Неоднородность выравненных откликов



η [%]

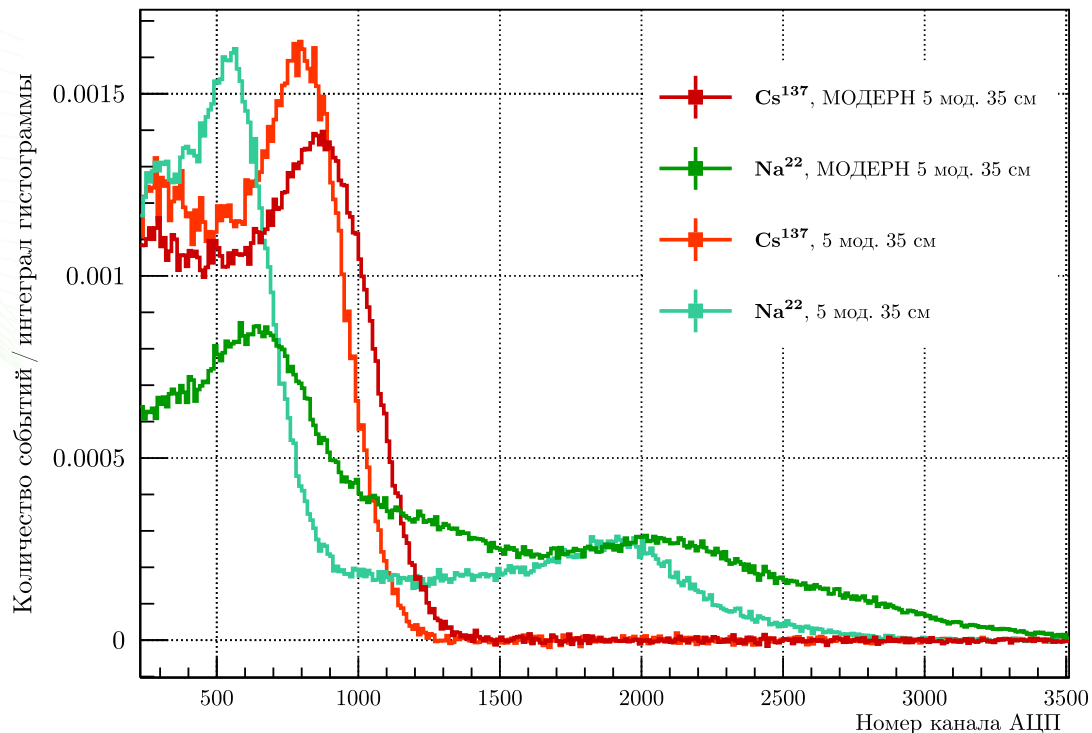
$$\eta = (Q_x^i / Q_{35}^i - 1) \cdot 100\%$$



$$H = (Q_x^i / Q_{35}^5 - 1) \cdot 100\%$$

Пространственная неоднородность блока в конфигурации 3 на 3 модуля

$\langle \eta^{\max} \rangle \approx 9\%$ — средняя неоднородность модулей

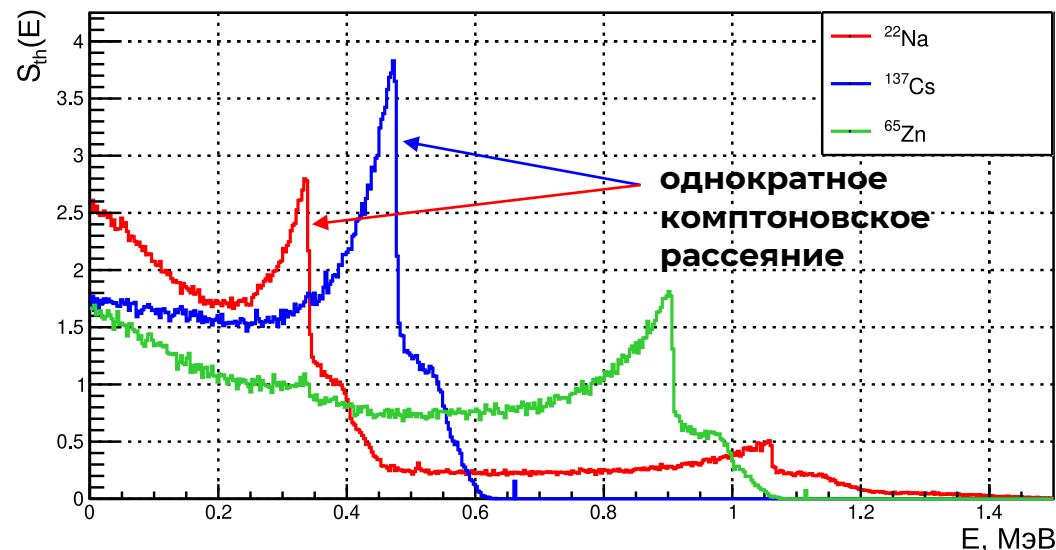


Нормированные на собственный интеграл аппаратные кривые отклика на источник цезия и натрия в центре сборки в 35 см: суммарный сигнал и сигнал только с центрального модуля

Светосила $\mathcal{L} = \frac{N_{\text{рег}}}{N_{\text{исп}}}$

$\mathcal{L}_{137\text{Cs}}$	
Центральный модуль	Вся сборка
10%	30%

Спектр по энергвыделению в одном модуле



Спектр по энергвыделению в сборке 3 на 3 модуля





Относительное разрешение модулей для энергии 1 МэВ при режиме **максимального коэффициента усиления** ФЭУ. $\langle \delta \rangle = 6,5\%$

№ модуля	1	2	3	4	5	6	7	8	9
δ (1 МэВ), %	7,5	6,1	7,1	5,8	7,2	6,9	7,4	5,2	5,7
$\Delta\delta$, %	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,4	0,5

Отклики не выравнены, сигнал с ФЭУ поступает на индивидуальный считывающий канал АЦП

Относительное разрешение модулей для энергии 1 МэВ при режиме **выравненных откликов**. $\langle \delta \rangle = 7,7\%$

№ модуля	1	2	3	4	5	6	7	8	9
δ (1 МэВ), %	8,4	6,1	8,5	8,3	8,9	7,1	7,8	7,0	7,3
$\Delta\delta$, %	0,7	0,5	0,7	0,7	0,8	0,6	0,7	0,6	0,6

Отклики выравнены, сигнал с ФЭУ поступает на индивидуальный считывающий канал АЦП

Относительное разрешение для энергии 1 МэВ в центре **при суммировании сигналов** (по результатам М-К модели)

$$\delta = 10\%$$

Скатывание в сторону ухудшения разрешения более чем в 1,5 раза



В данной работе исследован с позиции γ -спектрометрии один из основных режимов работы — режим выравненных откликов ФЭУ — сборки из 3×3 сцинтилляционных спектрометров на основе органического пластикового сцинтиллятора для детектирования реакторных антинейтрино.

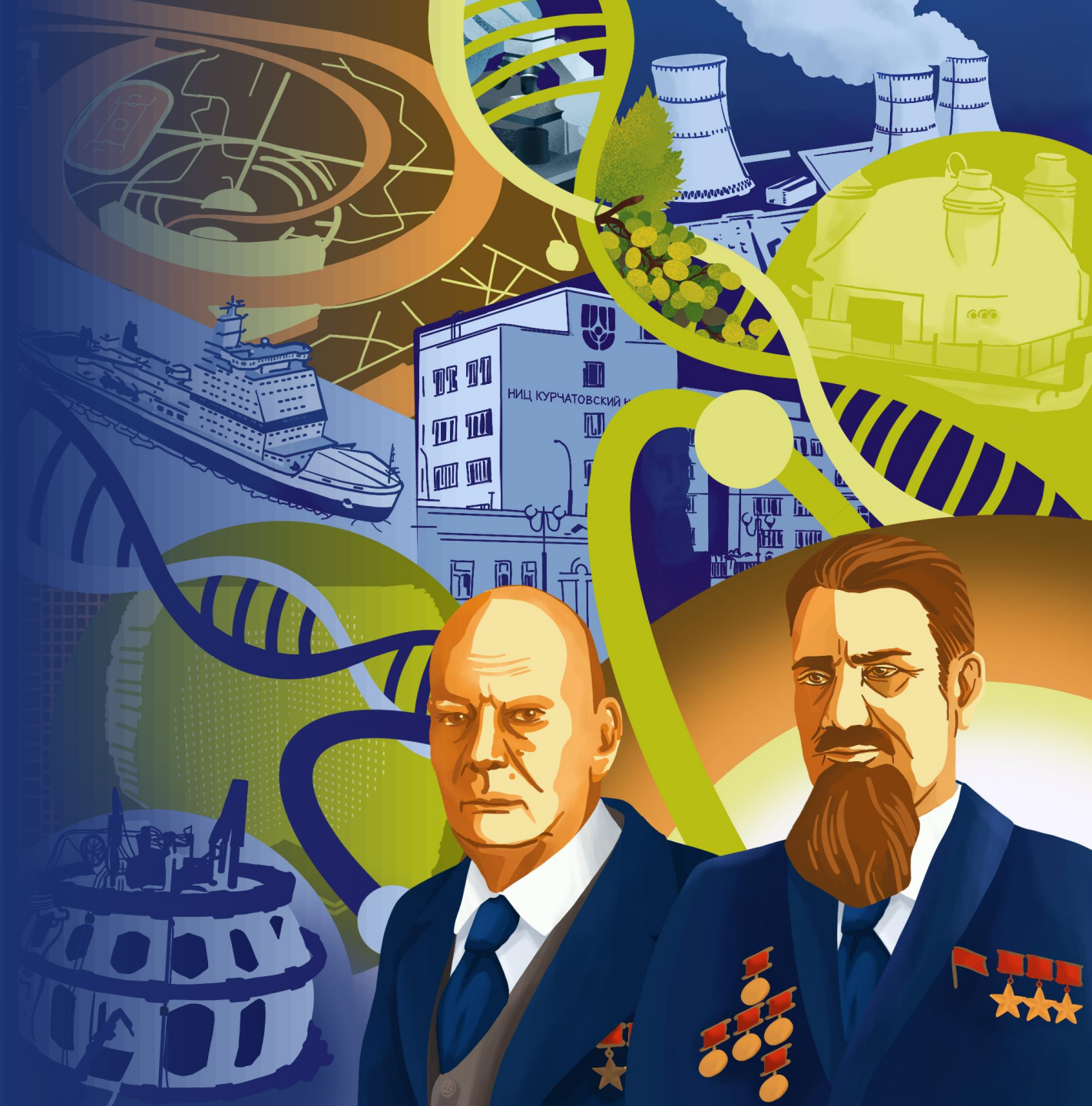
В ходе работы получены следующие результаты:

- Подобраны напряжения питания ФЭУ спектрометрических модулей по согласию откликов спектрометров на источник γ -излучения.
- Средний разброс откликов модулей относительно центрального по положению комптоновского края составляет **3,8%**; среднее значение неоднородности модулей принимает значение **9,0%**; пространственная неоднородность дает вклад **22%**; среднее относительное разрешение для энергии 1 МэВ равняется **7,7%**.
- При одновременном суммировании сигналов со всех модулей γ -спектрометрия затруднительна из-за вида суммарного энергосигнала в сборке.



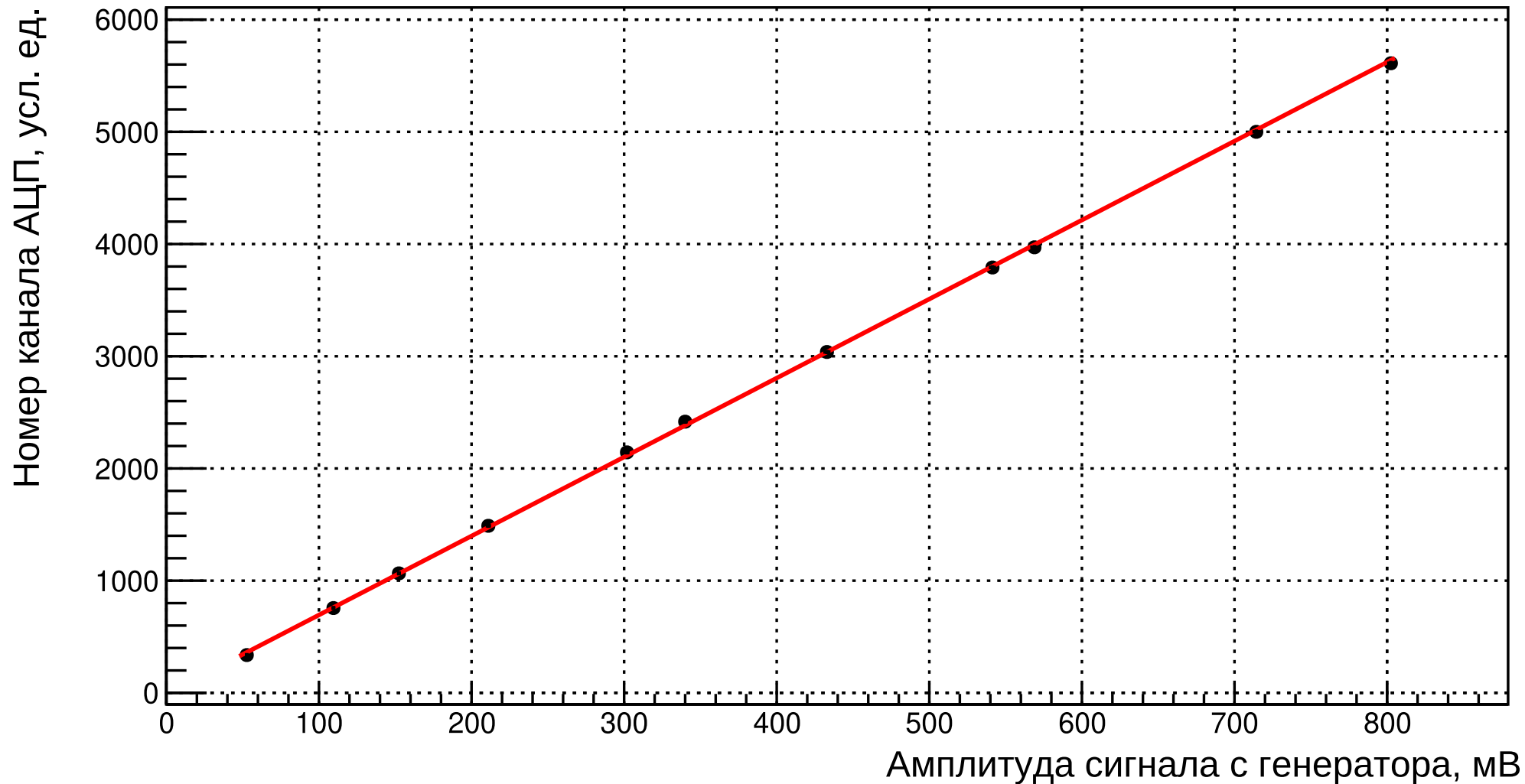
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Спасибо за
внимание!





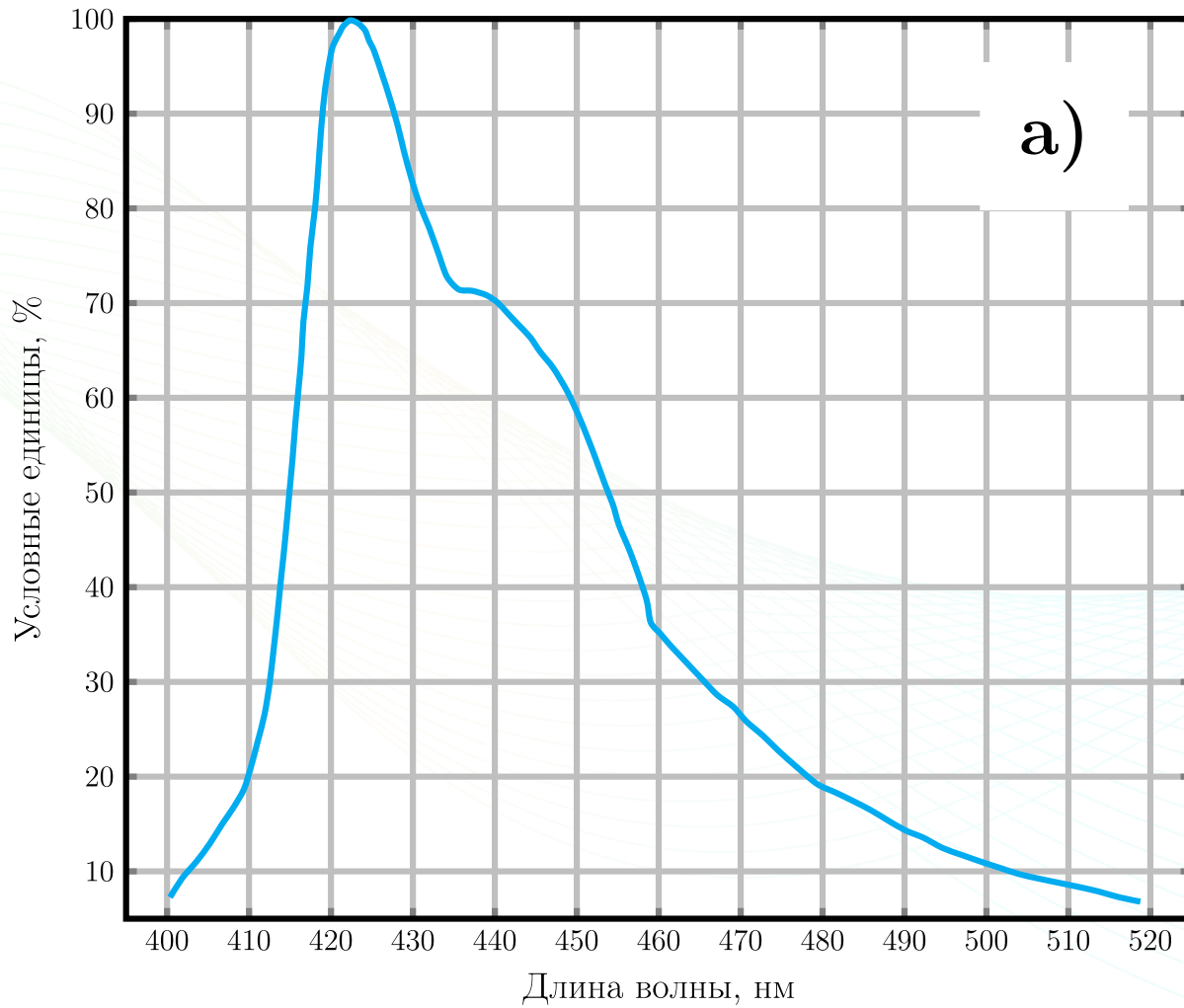
Линейность АЦП



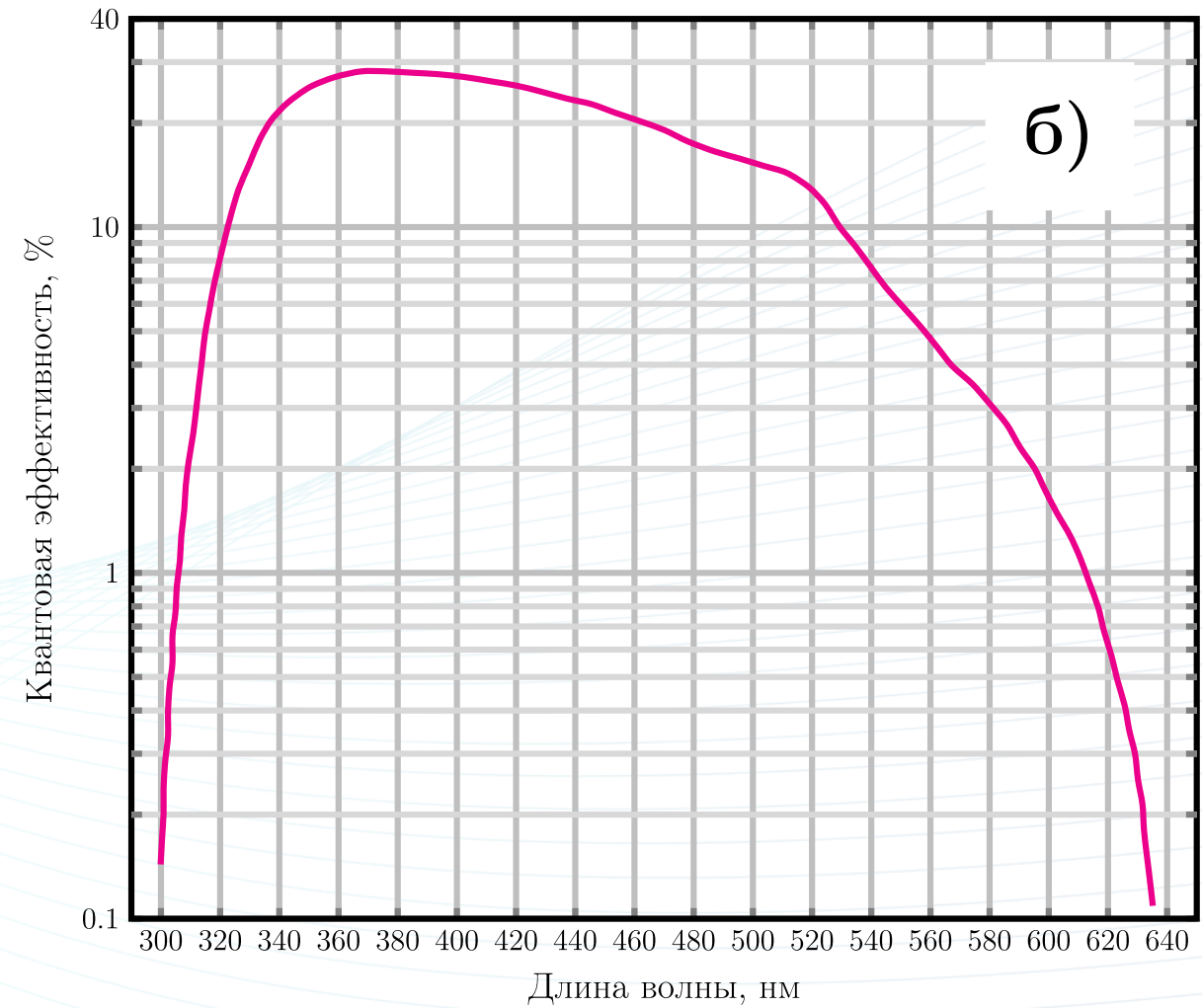
Дополнительные слайды: Спектры эмиссии сцинтиллятора и поглощения ФЭУ



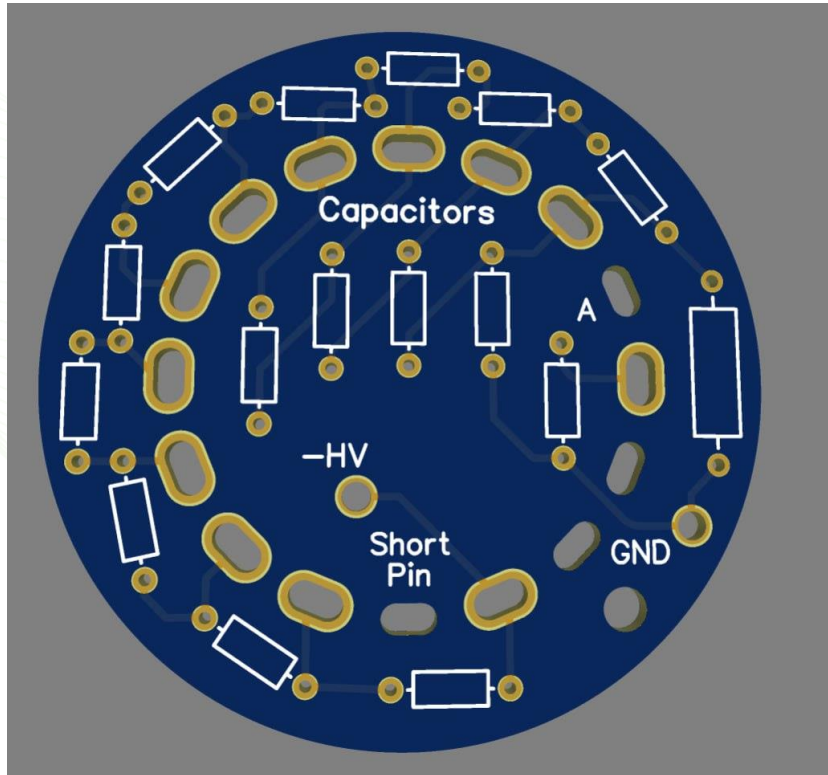
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



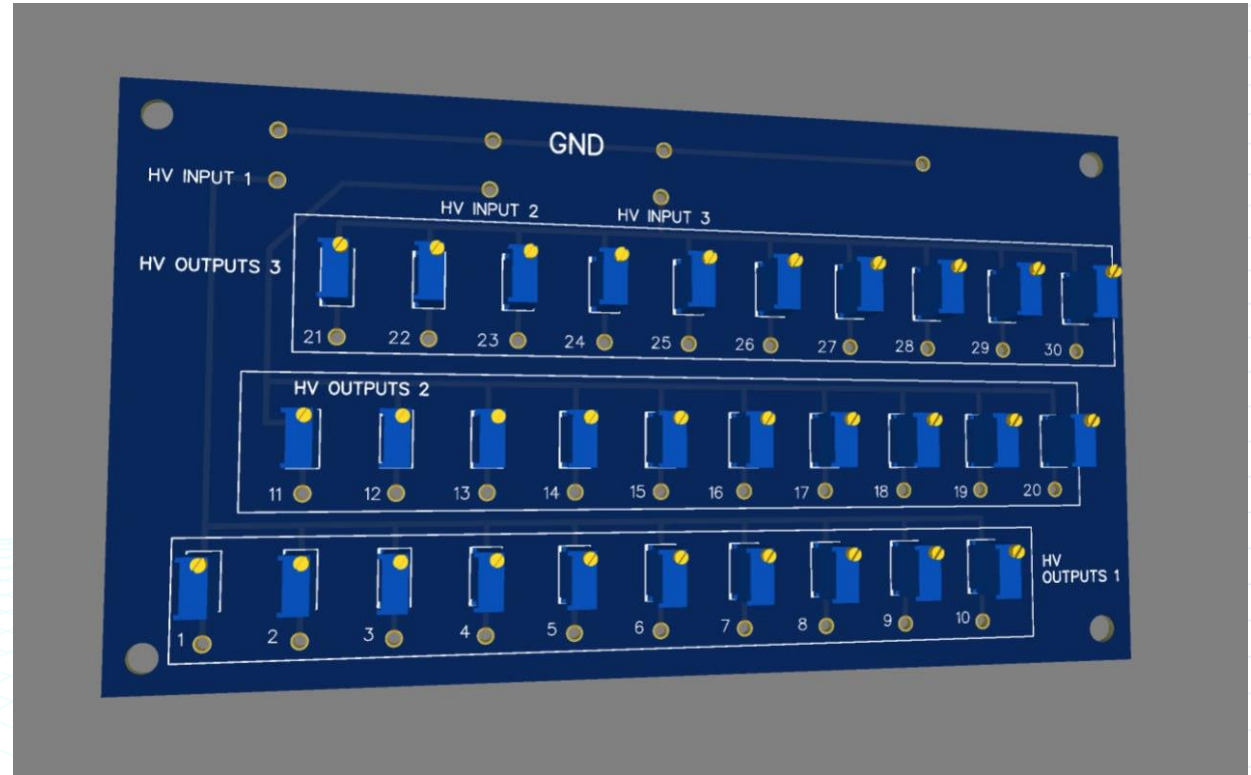
Спектр высвечивания пластикового сцинтиллятора



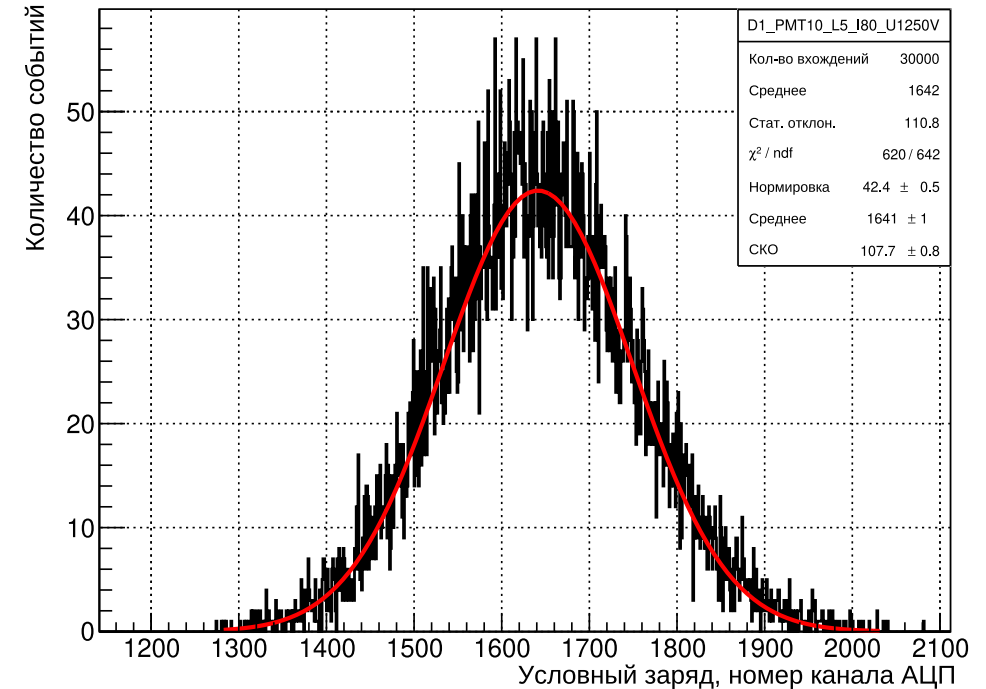
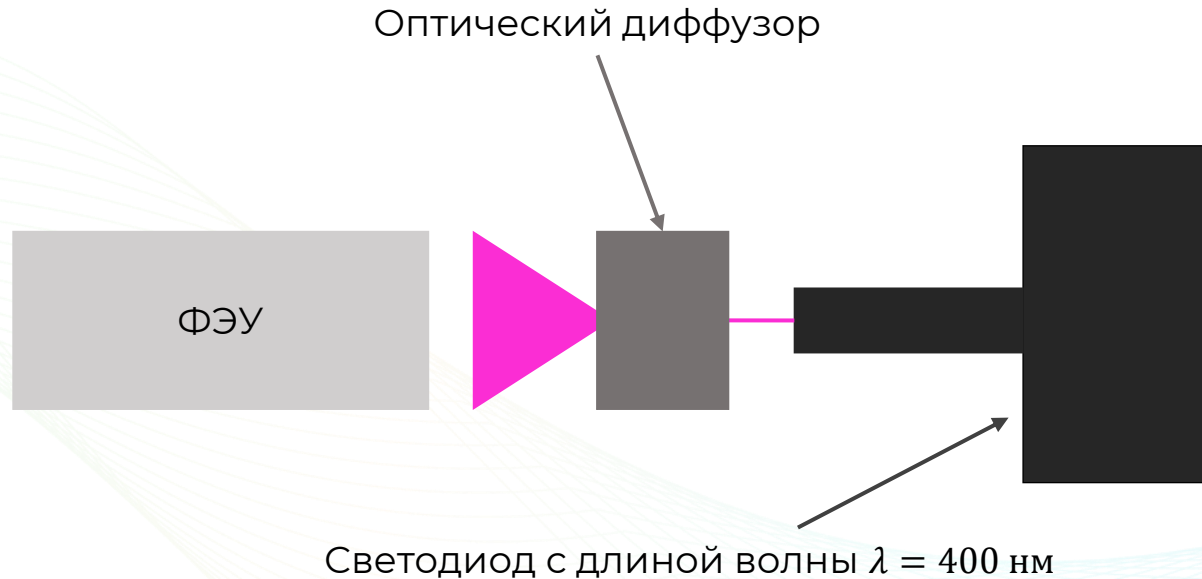
Спектр поглощения ФЭУ, нормированный на квантовую эффективность



Делитель напряжения



Разветвитель напряжения

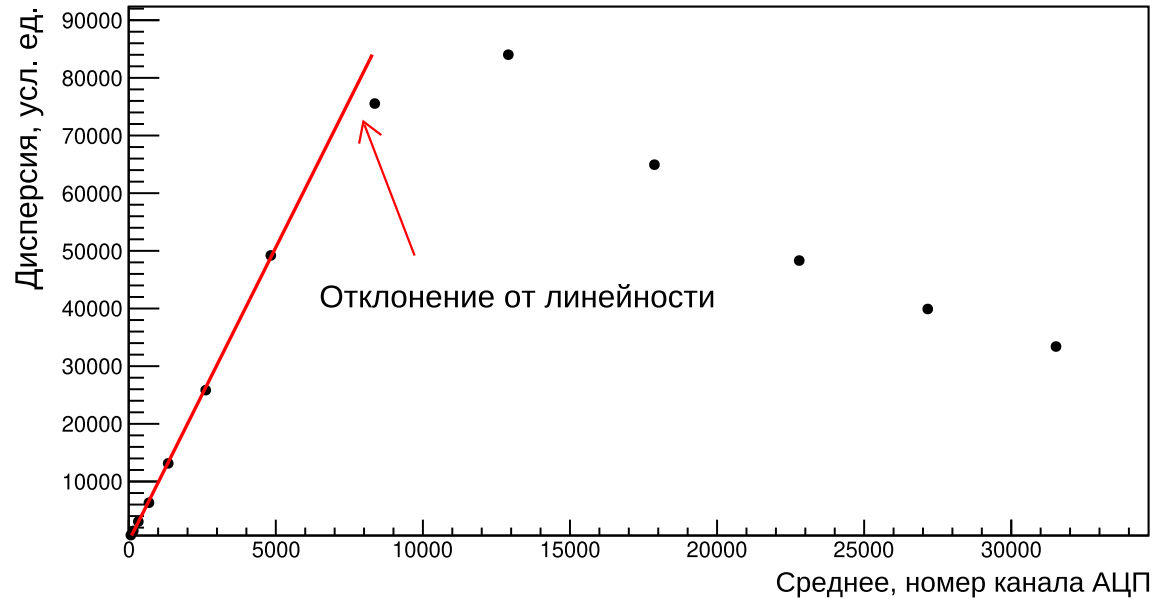


Аппаратурная кривая отклика ФЭУ
(гауссиана)

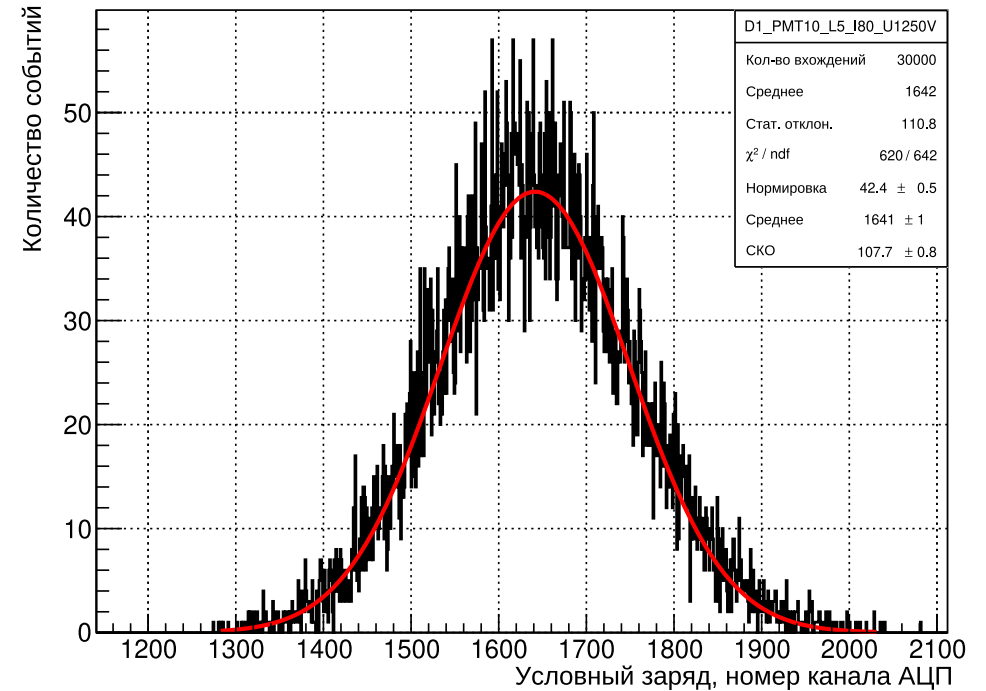
2 серии измерений:

- измерение зависимости отклика 17 ФЭУ от яркости светодиода при постоянном напряжении → **рабочий диапазон амплитуд**;
- измерение зависимости отклика 17 ФЭУ от напряжения при постоянной яркости светодиода → **рабочий диапазон напряжений**.

Насыщение ФЭУ



Зависимость дисперсии кривой отклика ФЭУ от среднего.

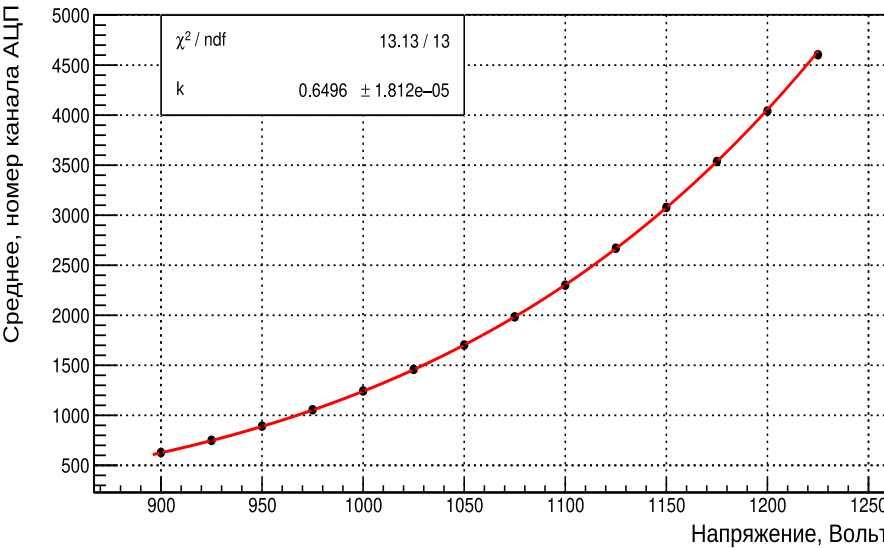


Красная линия – ожидаемая зависимость: $D = k \cdot \mu$, где $D = \sigma^2$ – дисперсия, μ – среднее.

Отклонение от линейности: амплитуды сигналов – 600 мВ ~ 5000 номер канала.

Все дальнейшие измерения проводились в рабочем диапазоне амплитуд

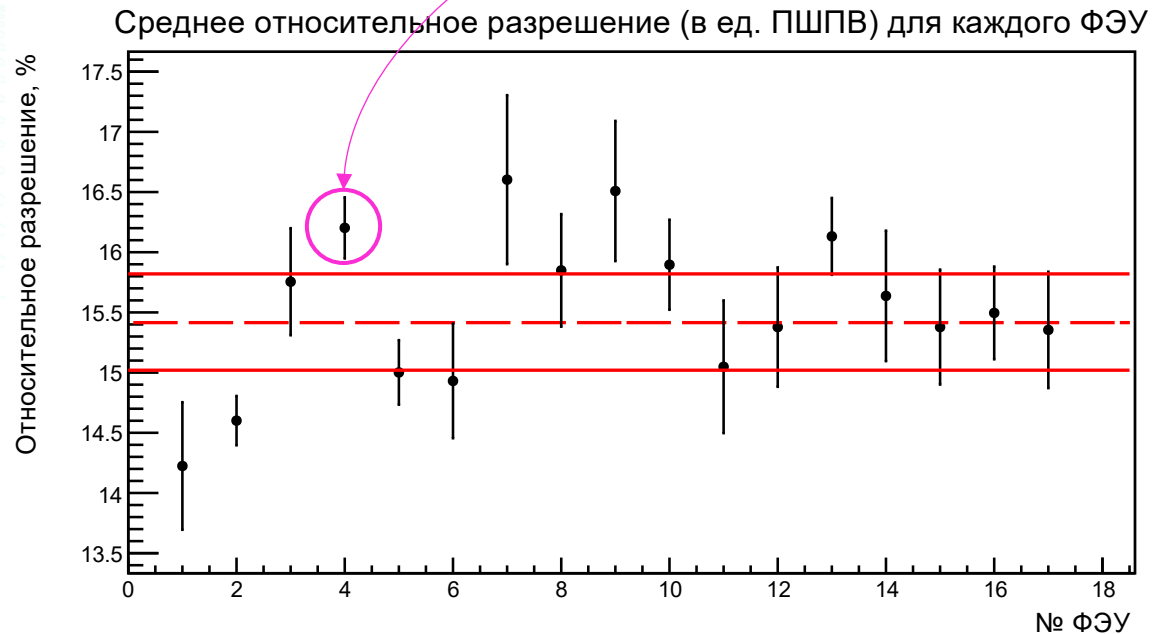
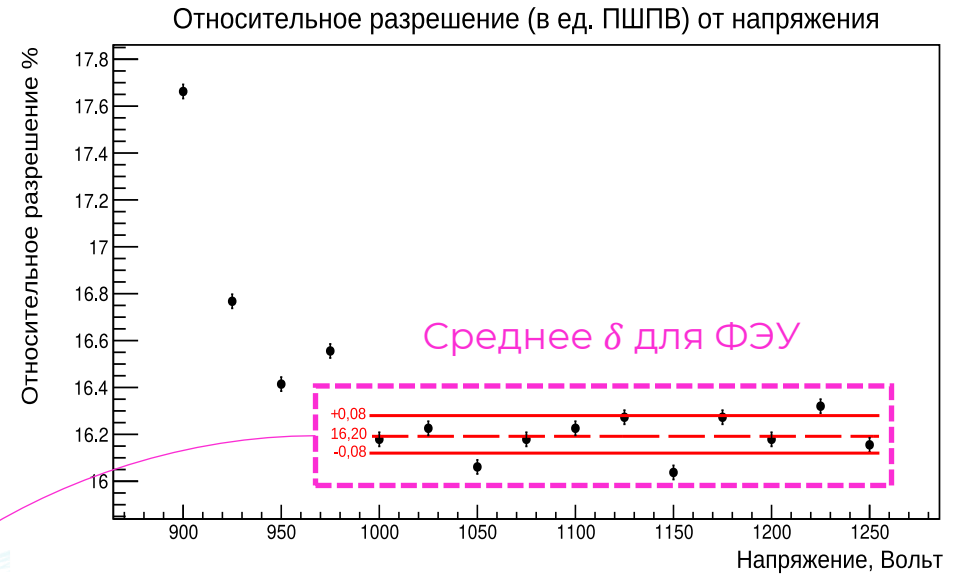
Дополнительные слайды: Спектрометрические характеристики ФЭУ



Подгонка эмпирическим законом:

$$\mu = \frac{a^n}{(n+1)^{kn}} \cdot U^{kn},$$

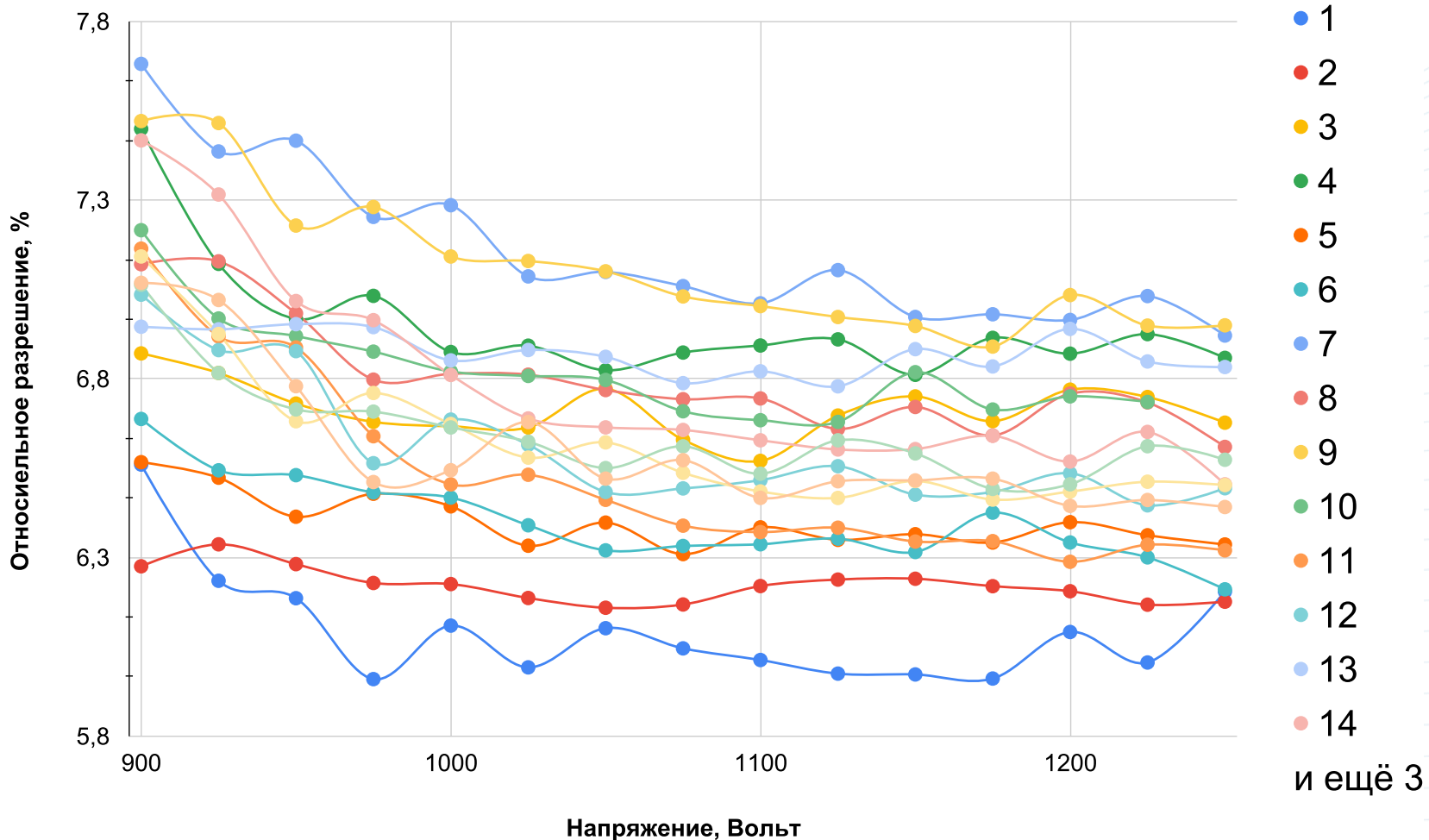
где μ – среднее кривой отклика ФЭУ,
 U – подаваемое напряжение,
 n – кол-во динодов = 10,
 k – постоянная $\in [0.7 - 0.9]$,
 a – свободный параметр.



Разброс средних
относительных
разрешений ФЭУ



Зависимость отклика ФЭУ от напряжения



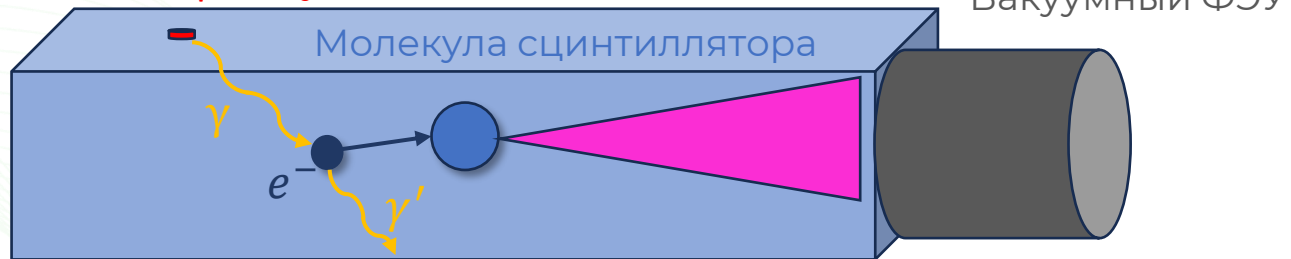
Дополнительные слайды: Определение спектрометрических характеристик пластиковых сцинтилляторов



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



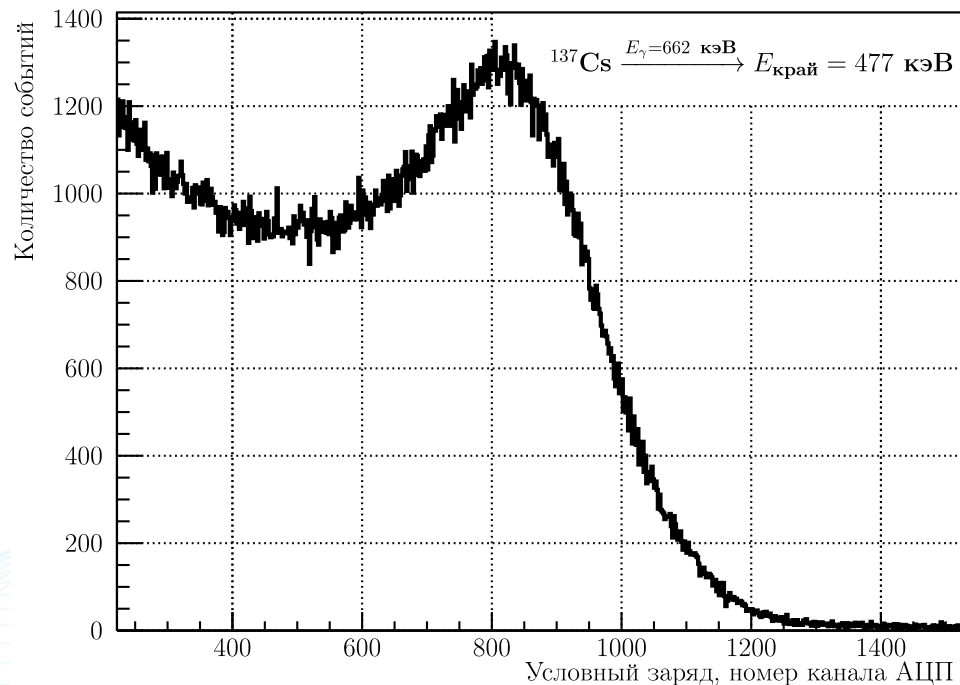
Источник γ -излучения



Сцинтилляционная вспышка

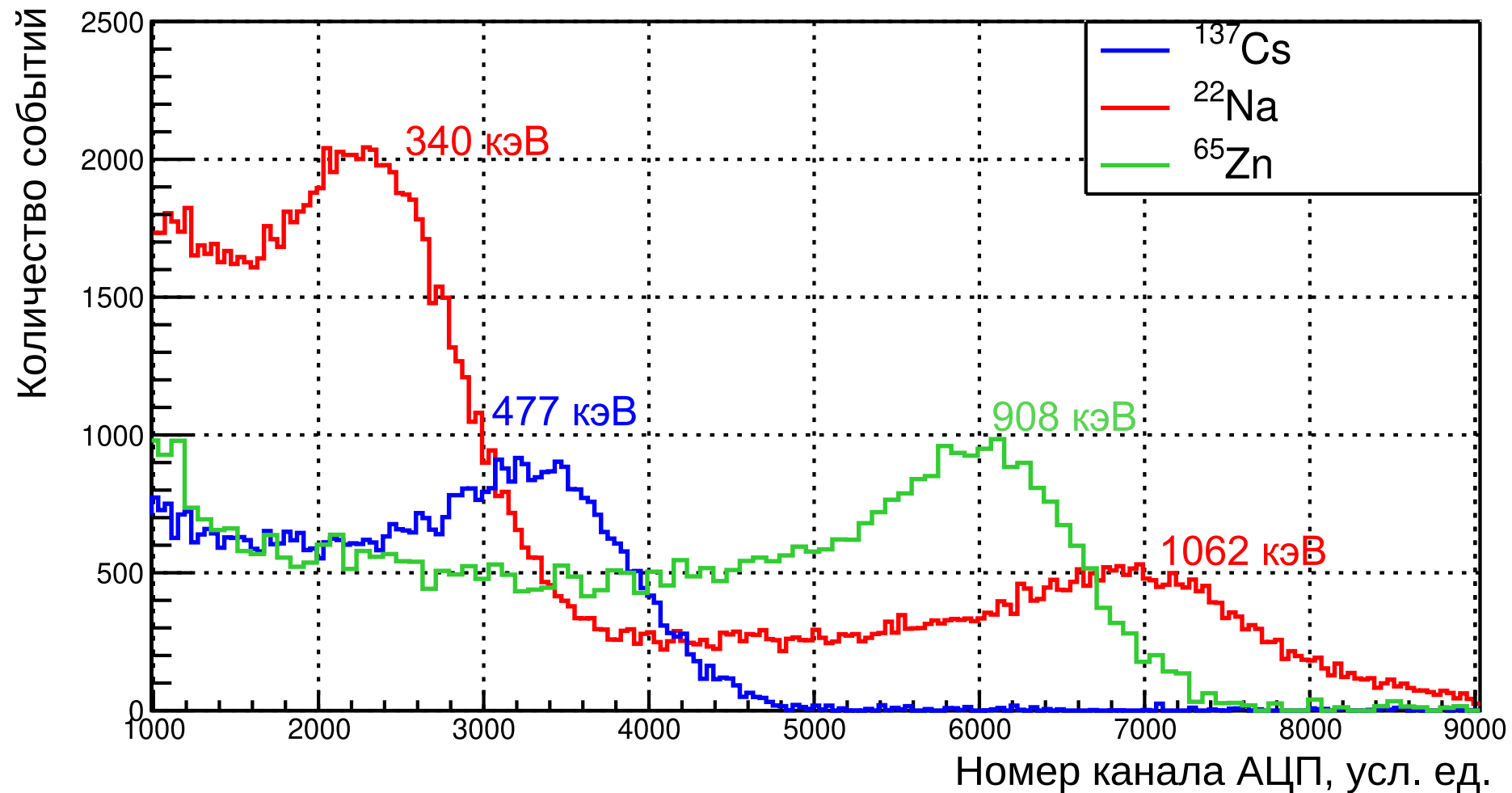
Пластиковый сцинтиллятор

Процесс регистрации γ -излучения в пластиковом
сцинтилляторе



Аппаратурная кривая отклика пластикового
сцинтиллятора
(комптоновское распределение)

Произведено измерение отклика 9 пластиковых сцинтилляторов на источник γ -излучения ^{137}Cs , который помещался в точку 35 см. Пластиковый сцинтиллятор обернут в диффузный отражатель для улучшения светособирания и уменьшения неоднородности.



Аппаратурные кривые спектрометра для ^{137}Cs (красная), ^{60}Co (синяя) и ^{22}Na (зеленая)



$$S(Q) = \int_0^{E_{max}} S_{th}(E) \cdot N \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_E(E)} \cdot e^{-\frac{(E-kQ-b)^2}{2\sigma_E^2(E)}} dE,$$

где $S_{th}(E)$ – спектр по энерговыделению, получаемый методом Монте-Карло;

E – энергия; N – нормировка; k – коэффициент пропорциональности между

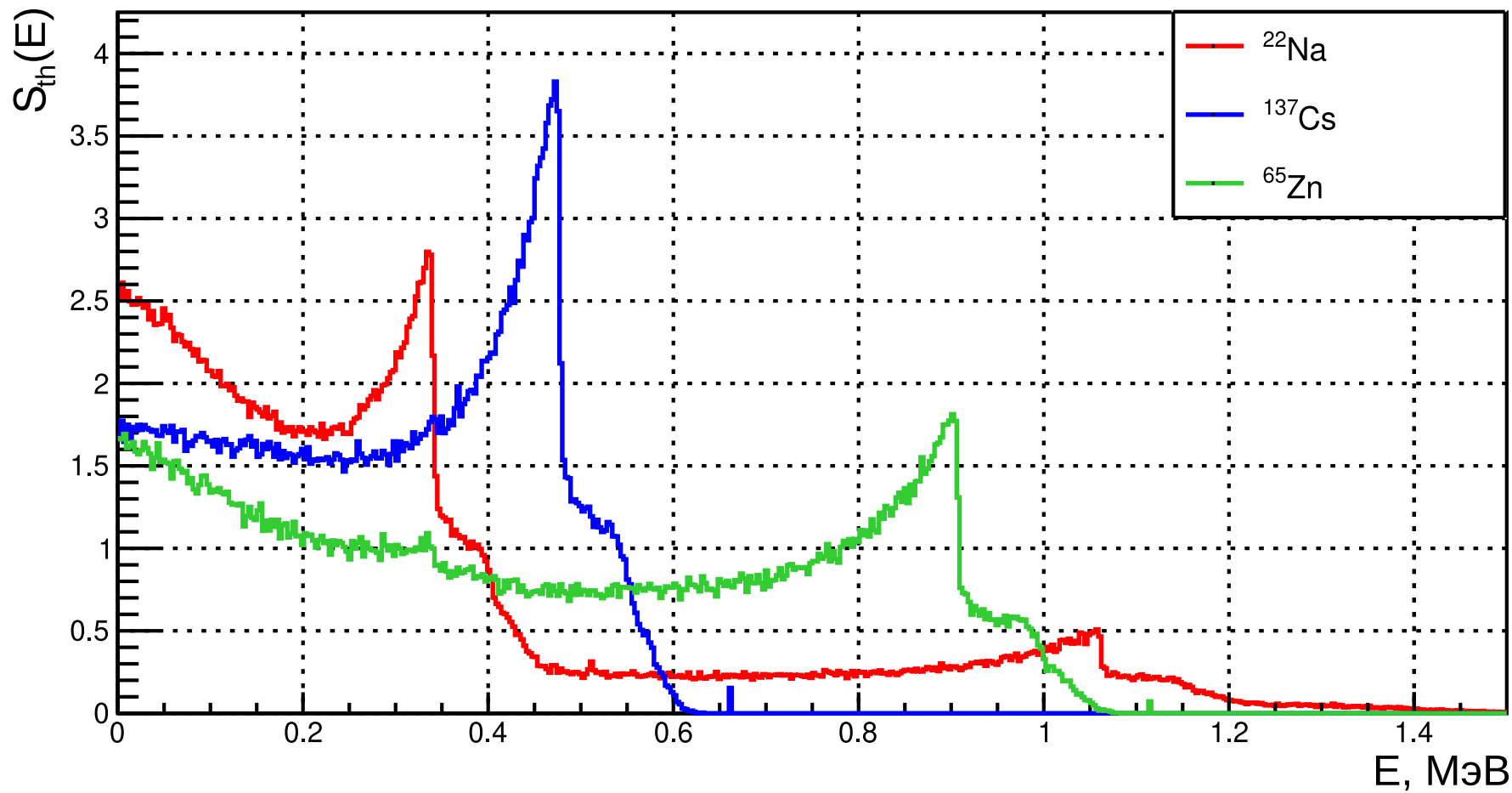
регистрируемой энергией $E_{рег.}$ и условным зарядом Q в линейном приближении:

$E_{рег.} = k \cdot Q + b$, где коэффициент b отвечает за смещение нуля по оси энергии; $\sigma_E(E)$ –

энергетическое разрешение: $\sigma_E(E) = E \cdot \sqrt{\alpha^2 + \frac{\beta^2}{E} + \frac{\gamma^2}{E^2}}$, где α – параметр,

характеризующий неоднородность детектора; β – статистический параметр,

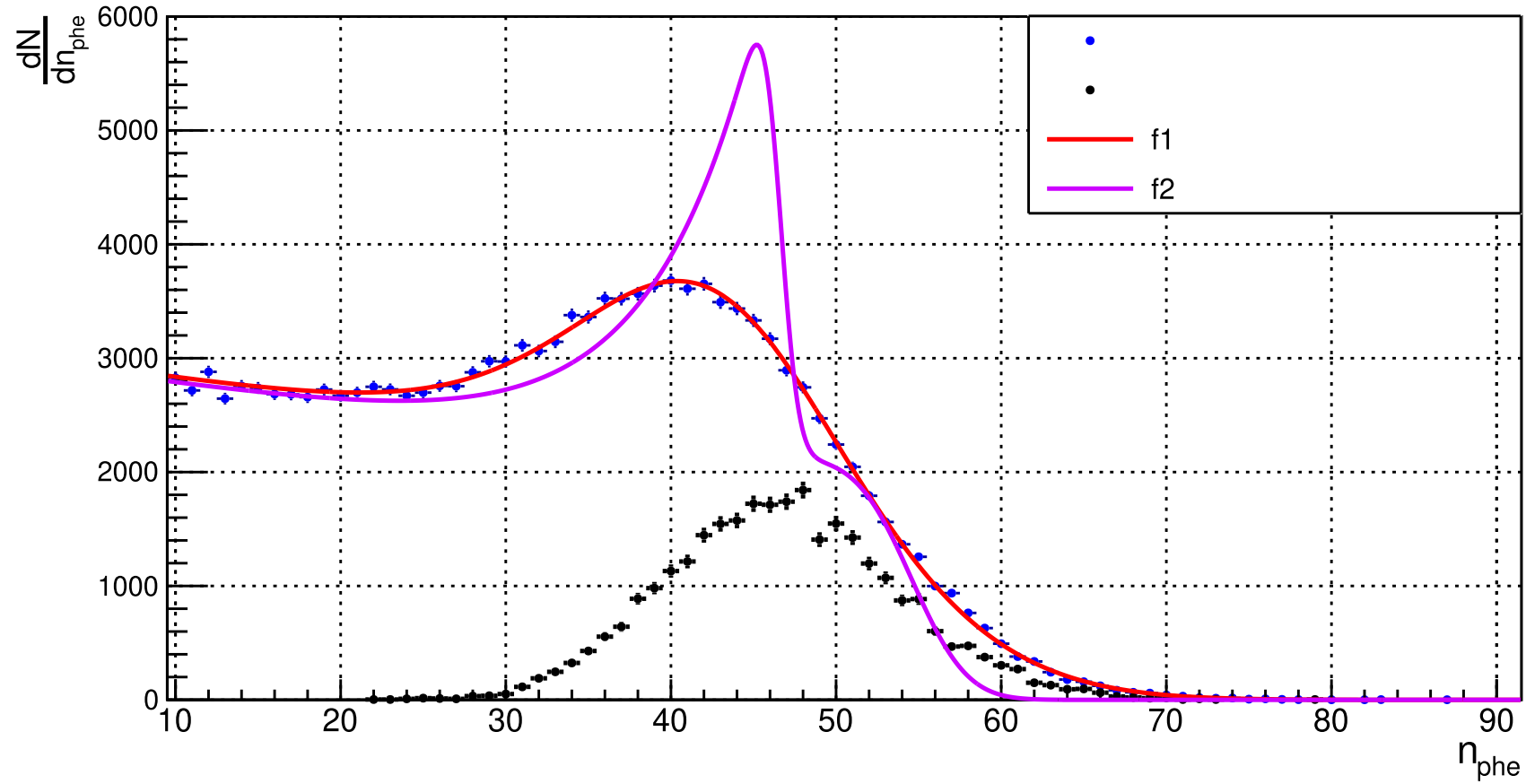
зависящий от числа фотоэлектронов; γ – параметр шумов электроники.

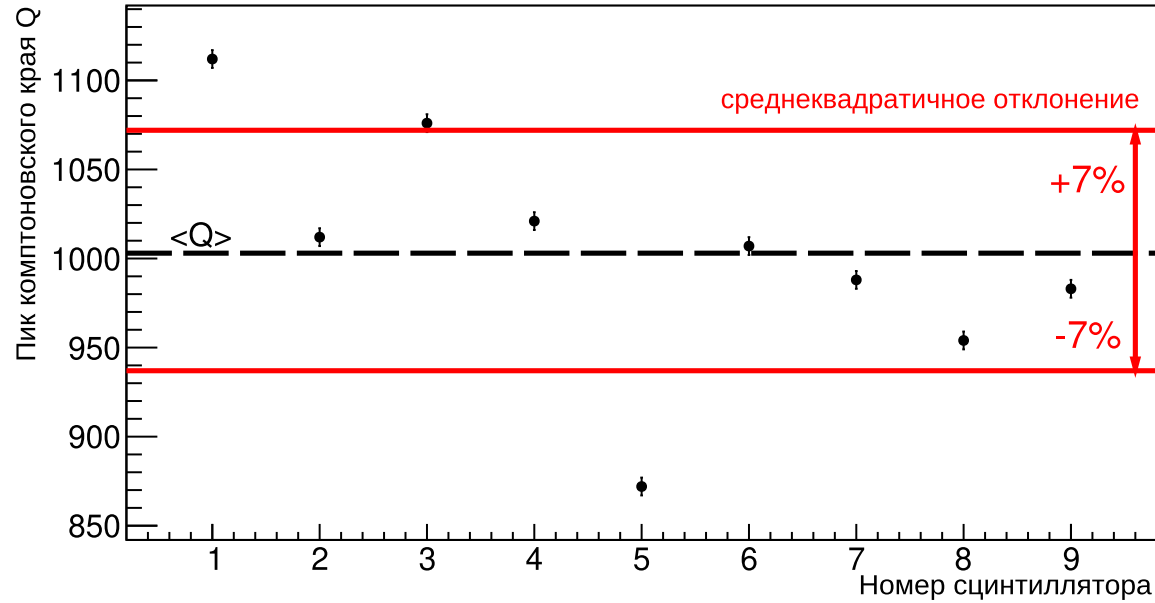


Дополнительные слайды: спектры с разыгранными моно-электронами с энергией комп. края

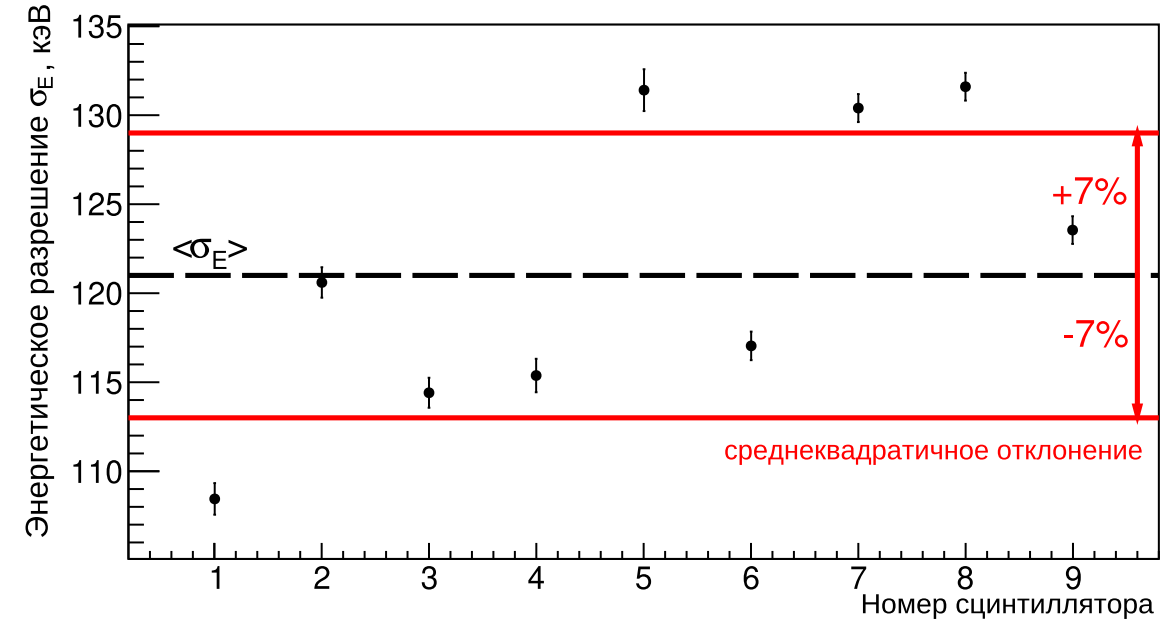


НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

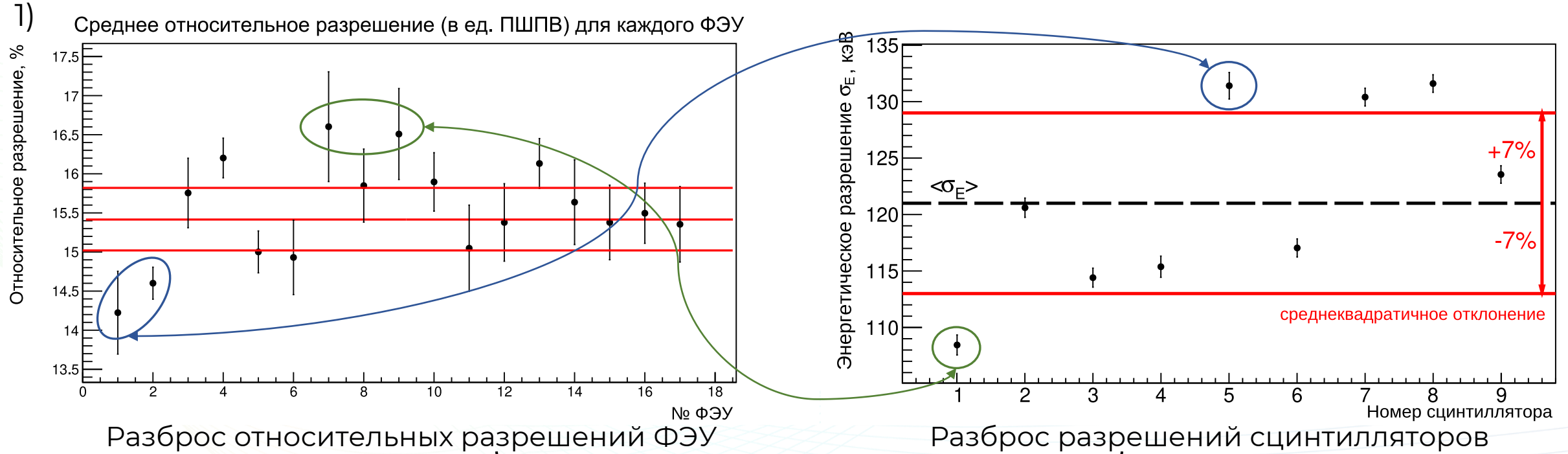




Разброс пика комптоновского края $Q_{\text{край}}$ для 9 сцинтилляторов



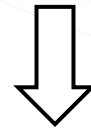
Разброс энергетических разрешений σ_E (в ед. ПШПВ) на линии $E_e = 0.477$ МэВ для 9 сцинтилляторов



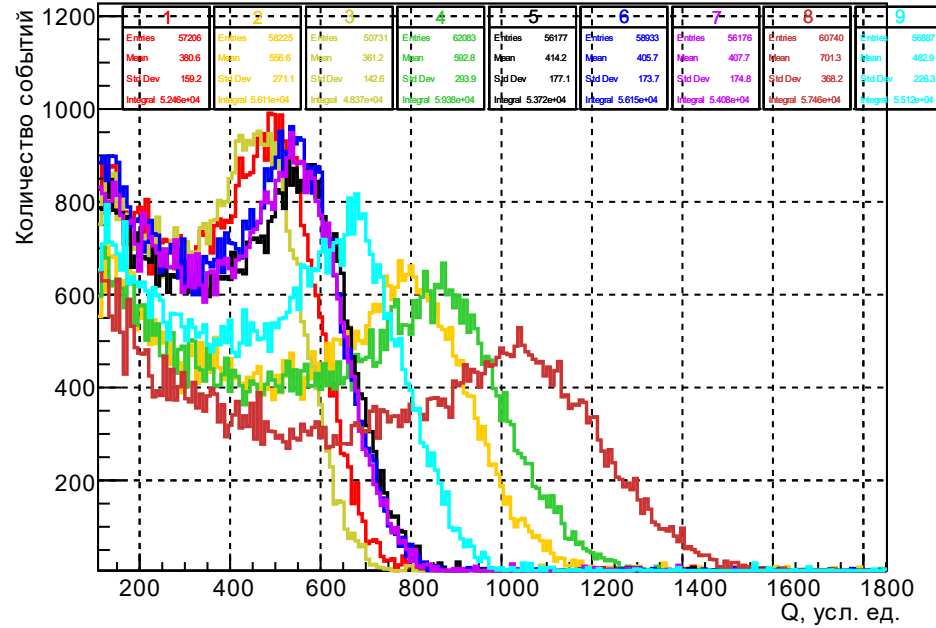
“компенсация” разрешений ФЭУ и сцинтилляторов

2) выравнивание коэффициентов усиления ФЭУ на каждом модуле подстройкой напряжений

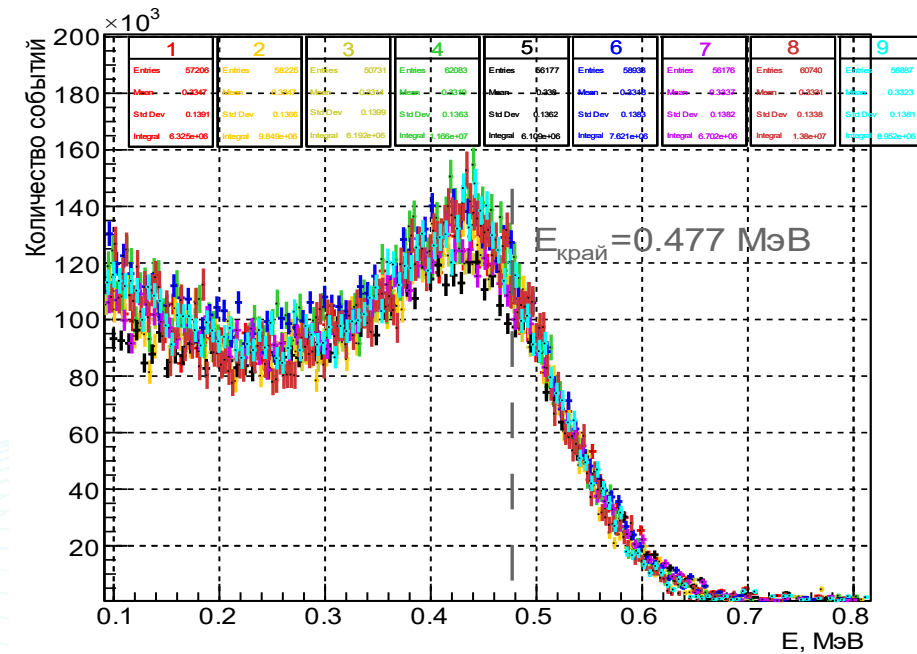
- нивелирование негативного вклада в абсолютное суммарное разрешение модуля
- минимизация неоднородности светособирания



min разброс спектральных характеристик модулей



в единицах Q



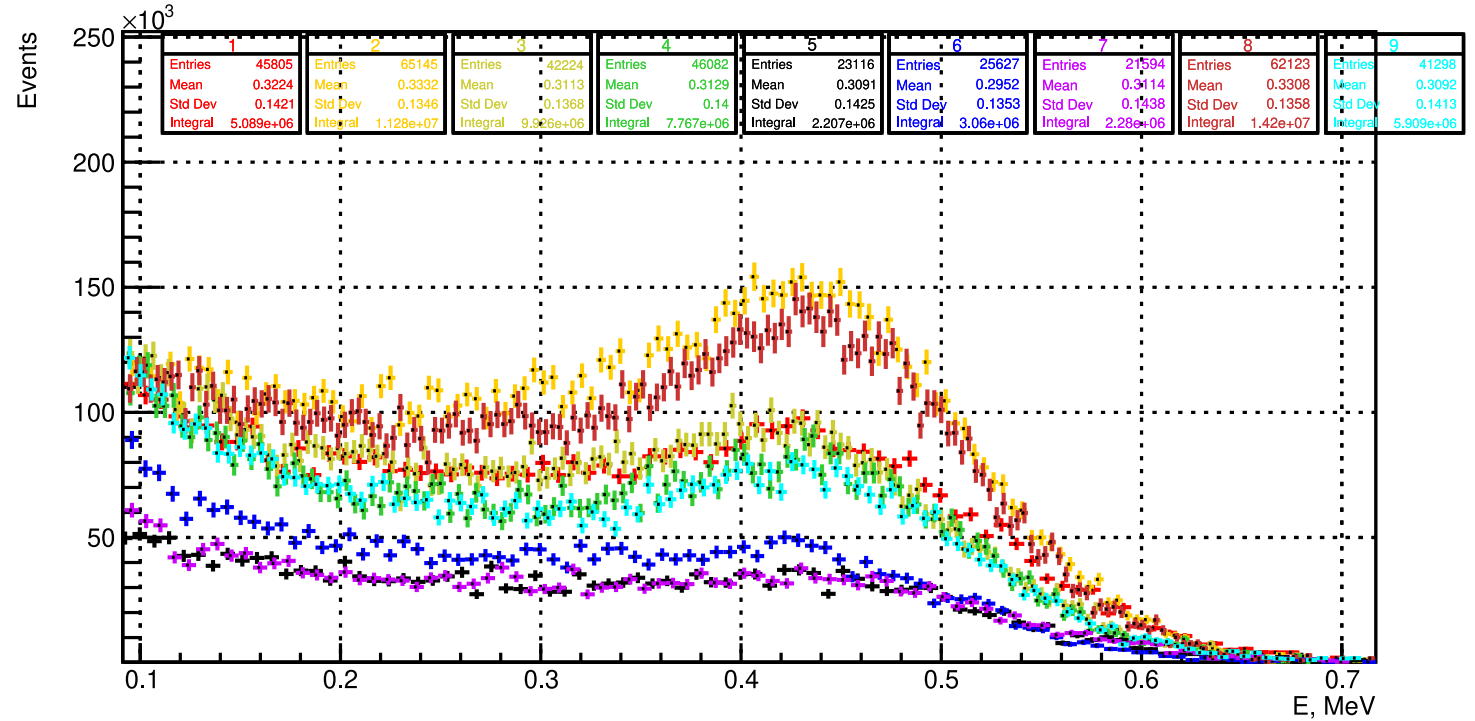
в единицах E

Аппаратурные кривые отклика модулей на γ -источник Cs-137 в точке 35 см.

Дополнительные слайды: Энергетическая калибровка модулей в геометрии блока

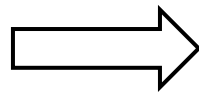


НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



Аппаратурные энергетические спектры ^{137}Cs при калибровке только центрального модуля

Геометрия модулей с учетом энергетического разрешения: чем хуже, тем дальше от центра



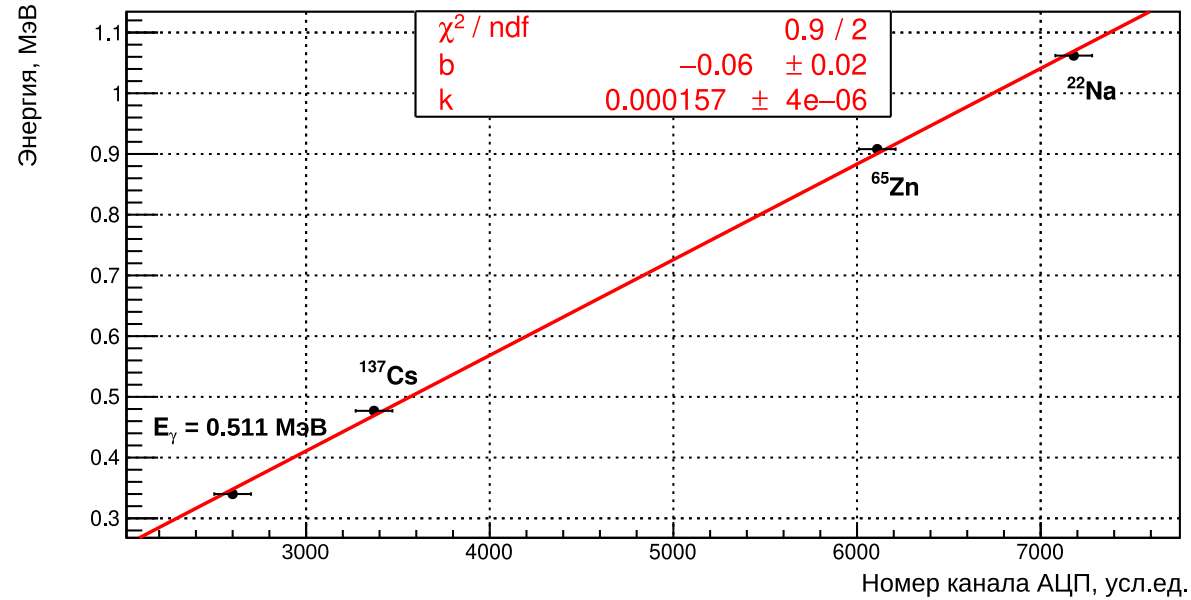
Разница в высоте спектров соответствует геометрическому расположению модулей в сборке*

* при измерении 8-го модуля АЦП часть времени был в режиме *busy*

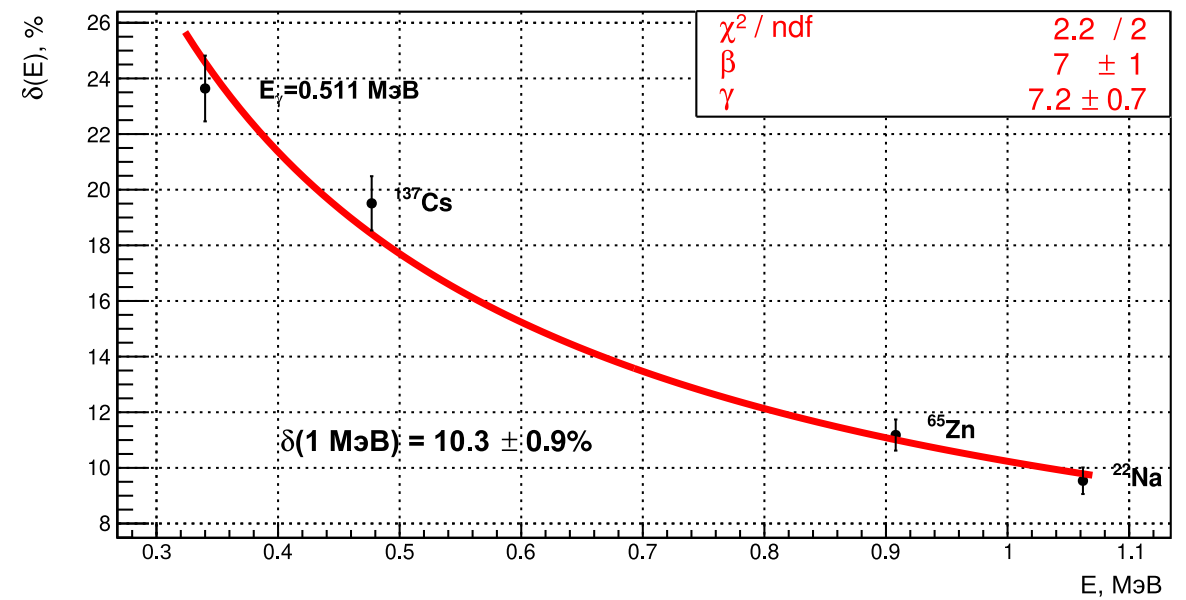
Дополнительные слайды: энергетическая шкала и относительное разрешение



Калибровка энергетической шкалы



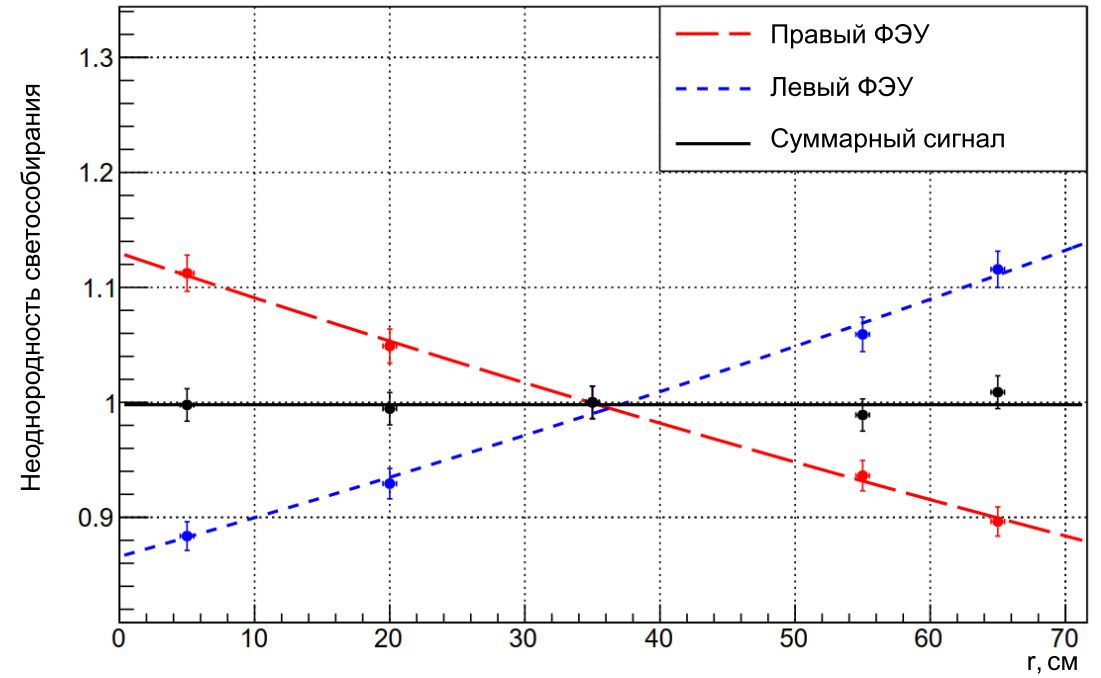
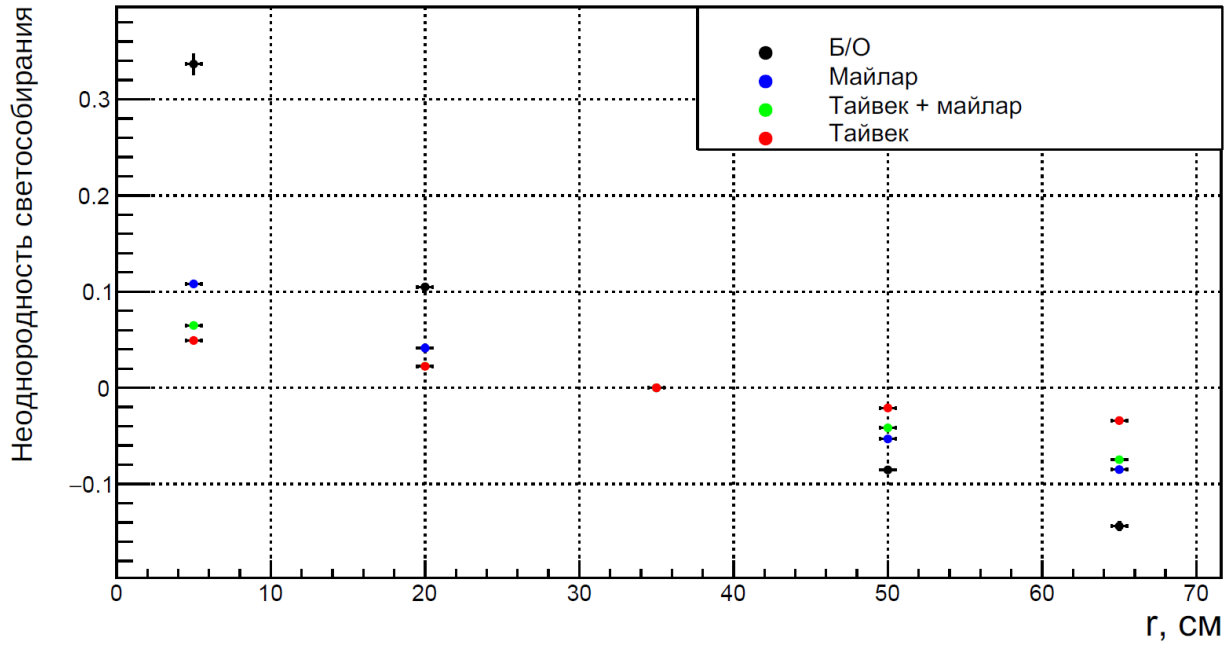
Относительное энергетическое разрешение (в единицах ПШПВ)

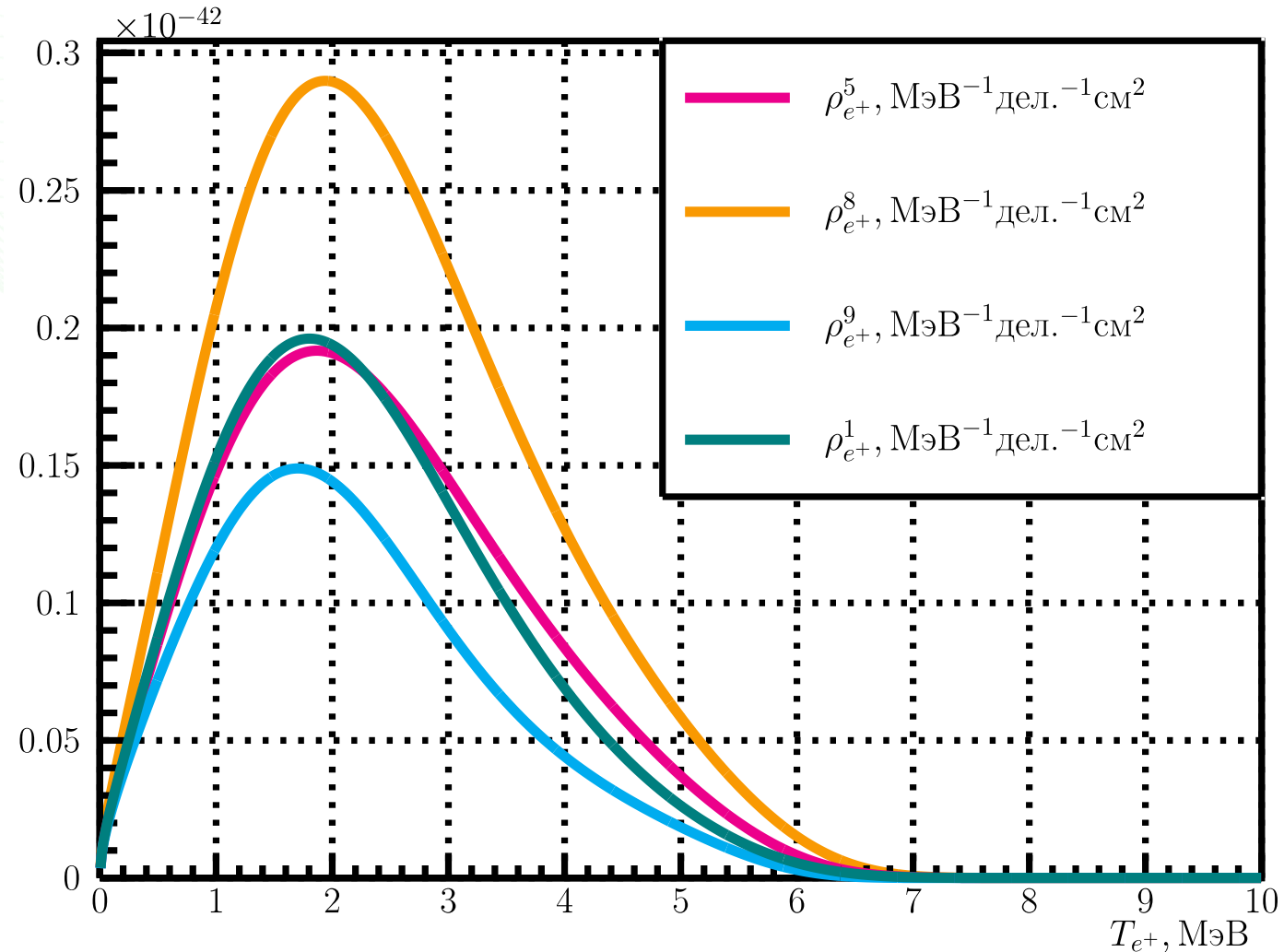


Дополнительные слайды: неоднородность светособирания и сравнение отражателей



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»





Спектры позитронов ОБР продуктов деления i -го изотопа «в момент рождения», нормированные на одно деление i -го изотопа: $\rho^5, \rho^8, \rho^9, \rho^1$ соответствуют $^{235}\text{U}, ^{238}\text{U}, ^{239}\text{Pu}$ и ^{241}Pu .

Дополнительные слайды: доли делений для типичной кампании реактора типа ВВЭР



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

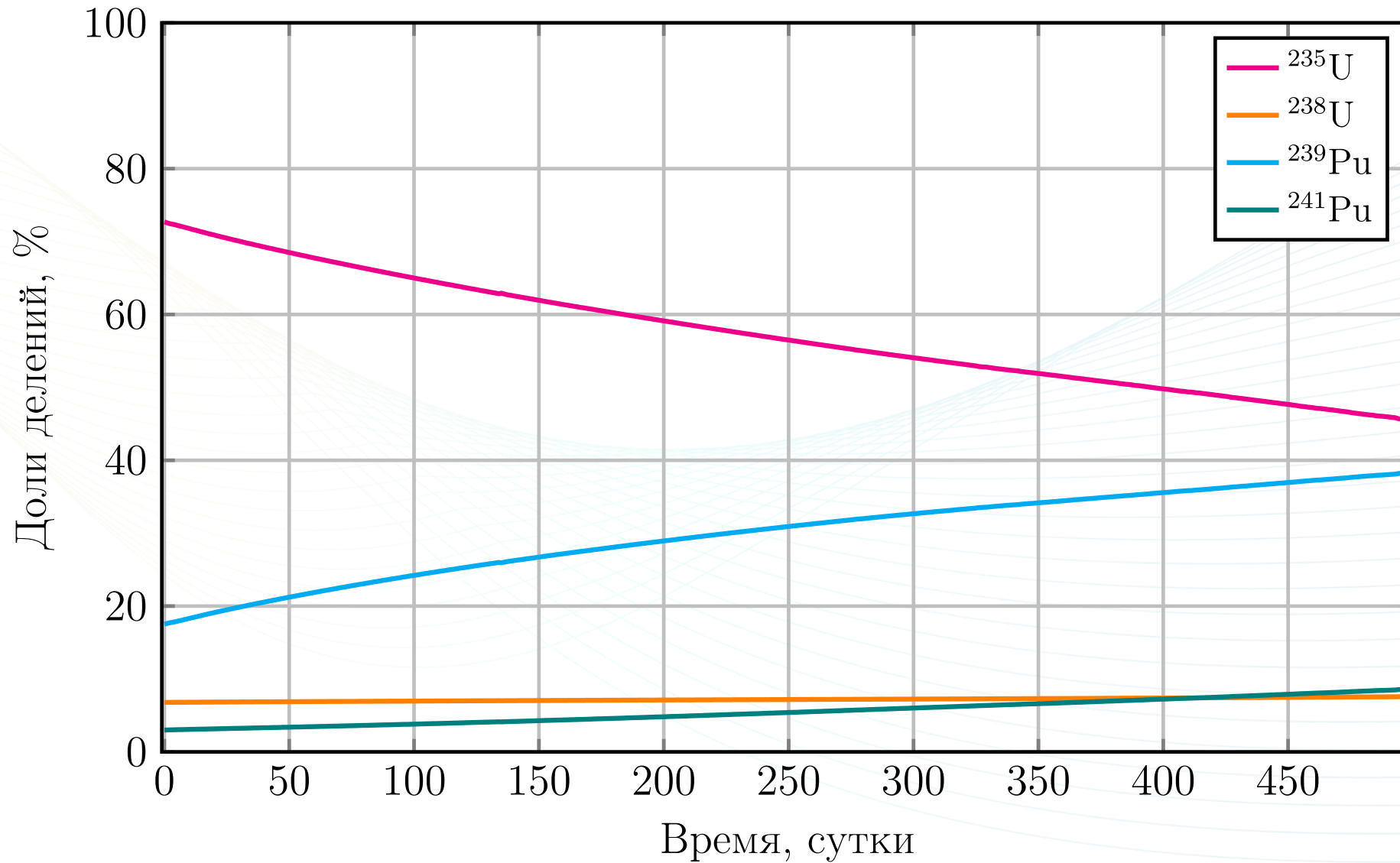




Таблица 1.2 — Различные методы детектирования реакторных $\bar{\nu}_e$ [37]. CC (NC) обозначает взаимодействие по заряженному току (нейтральному току). Сечение усреднено по всему спектру энергии $\bar{\nu}_e$. N и Z — число нейтронов и протонов в ядре рабочего вещества соответственно. Для этих оценок предполагается, что доли деления составляют 58%, 29%, 8% и 5% для ^{235}U , ^{239}Pu , ^{238}U и ^{241}Pu соответственно.

Реакция	Тип взаимодействия	Сечение реакции (10^{-44} см ² /деление)	Порог (МэВ)
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	CC	~ 63	1.8
$\bar{\nu}_e + d \rightarrow n + n + e^+$	CC	~ 1.1	4.0
$\bar{\nu}_e + d \rightarrow n + p + \bar{\nu}_e$	NC	~ 3.1	2.2
$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$	CC/NC	$\sim 0.4 \times Z$	0
$\bar{\nu}_e + A \rightarrow \bar{\nu}_e + A$	NC	$\sim 9.2 \times N^2$	0

37. Qian X., Peng J.-C. Physics with reactor neutrinos // Reports on Progress in Physics. — 2019. — Vol. 82, no. 3. — P. 036201.



Таблица 1.3 — Различные процессы, используемые для детектирования нейтронов отдачи для реакции ОБР. Перечислены каналы обнаружения и соответствующие сечения захвата для тепловых нейтронов. В скобках приведена энергия, уносимая γ -квантами. В реакциях с Cd и Gd образуется большое количество γ -квантов, поэтому для данных реакций в скобках указана суммарная уносимая энергия γ -квантами.

Мишень	Реакция	Сечение реакции (барн) для теплового нейтрона
H	$n + p \rightarrow d + \gamma$ (2.2 МэВ)	~ 0.33
^3He	$n + ^3\text{He} \rightarrow p + ^3\text{H} + 0.764 \text{ МэВ}$	~ 5300
^6Li	$n + ^6\text{Li} \rightarrow \alpha + ^3\text{H} + 4.8 \text{ МэВ}$	~ 950
^{10}B	$n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^{11}\text{B}^*$ $^{11}\text{B}^* \rightarrow \alpha + ^7\text{Li} + 2.79 \text{ МэВ}, 6\%$ $^{11}\text{B}^* \rightarrow \alpha + ^7\text{Li} + \gamma$ (0.48 МэВ) + 2.31 МэВ, 94%	~ 3860
^{113}Cd	$n + ^{113}\text{Cd} \rightarrow ^{114}\text{Cd} + \gamma$ ($\sum E_\gamma = 9.04 \text{ МэВ}$)	~ 20600
Gd	$n + ^{155}\text{Gd} \rightarrow ^{156}\text{Gd} + \gamma$ ($\sum E_\gamma = 8.5 \text{ МэВ}$) $n + ^{157}\text{Gd} \rightarrow ^{158}\text{Gd} + \gamma$ ($\sum E_\gamma = 7.9 \text{ МэВ}$)	~ 61000 ~ 256000

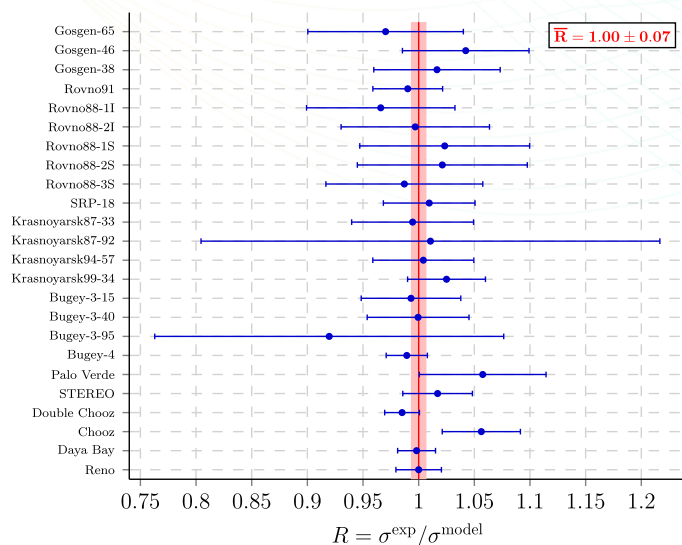


Реакторная антинейтринная аномалия

Заключается в дефиците экспериментально определенной интенсивности потока в сравнении с обновленными теоретическими данными (модель Huber — Mueller).

Возможное объяснение: стерильное нейтрино — ряд новых экспериментов опровергает гипотезу стерильного нейтрино в рамках RAA (DANSS, STEREO, PROSPECT).

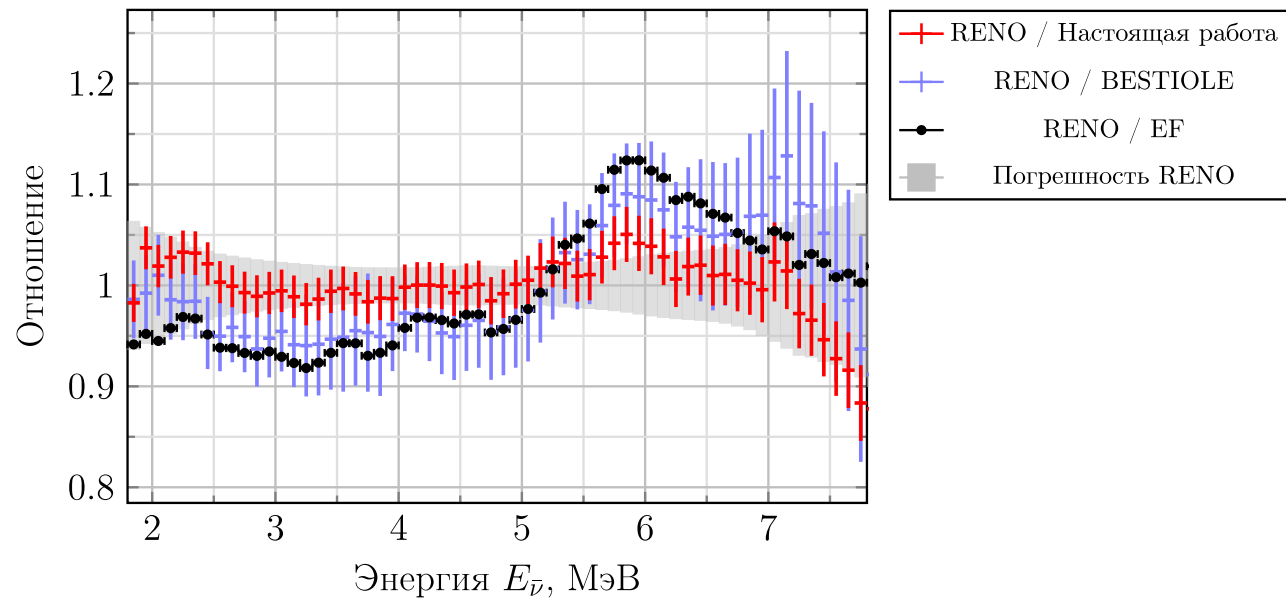
Ставится под вопрос корректность самой модели Huber — Mueller.



«Bump effect»

Состоит в локальном 10% превышении формы экспериментального спектра антинейтрино над теоретическим в области от 5 до 7 МэВ.

Вопрос о происхождении пока остается открыт.



Из работ Вячеслава Зайцева