

Фоторегистрирующая система на основе ФЭУ Hamamatsu R11410-20 детектора когерентного рассеяния нейтрино РЭД-100. Характеристики ФЭУ.

Меликян Юрий (от имени коллаборации РЭД),
Лаборатория Экспериментальной Ядерной Физики
Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ»



- РЭД-100:
 - Когерентное рассеяние нейтрино
 - Принцип работы эмиссионного детектора
 - Характеристики РЭД-100
- ФЭУ Hamamatsu R11410-20:
 - Описание ФЭУ
 - Установка по тестированию ФЭУ
 - Характеристики ФЭУ:
 - чувствительность и однофотозлектронные спектры
 - уровень шумов
 - спектры послеимпульсов
- Заключение

Когерентное рассеяние нейтрино

упругое взаимодействие всех типов нейтрино с атомными ядрами

✓ Предсказано Стандартной моделью:

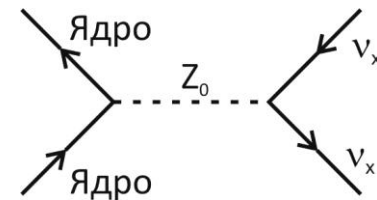
✓ Не наблюдалось

✓ Большое сечение:

$$\sigma = 0,4 \cdot 10^{-44} N^2 \cdot E_\nu^2 \text{ [см}^2\text{]},$$

N – число нейтронов в ядрах мишени,
 E_ν - энергия нейтрино (МэВ)

✓ Низкая энергия ядер отдачи ($\lesssim 1$ кэВ) :-)



Эмиссионный детектор:

1) Ионизация среды ядром отдачи:

- *несколько e^- на 1 кэВ: $\frac{N_{e^-}}{E_{\text{ядра}}} = 12,5 \cdot E_{\text{ядра}}^{-0,34}$ - известная зависимость для $E_{\text{ядра}} \geq 4$ кэВ*
- *ионизационный выход ядер отдачи с $E_{\text{ядра}} < 1$ кэВ будет исследован на пучке квазимонохроматических нейтронов реактора ИРТ МИФИ (эксперимент РЭД-1)*



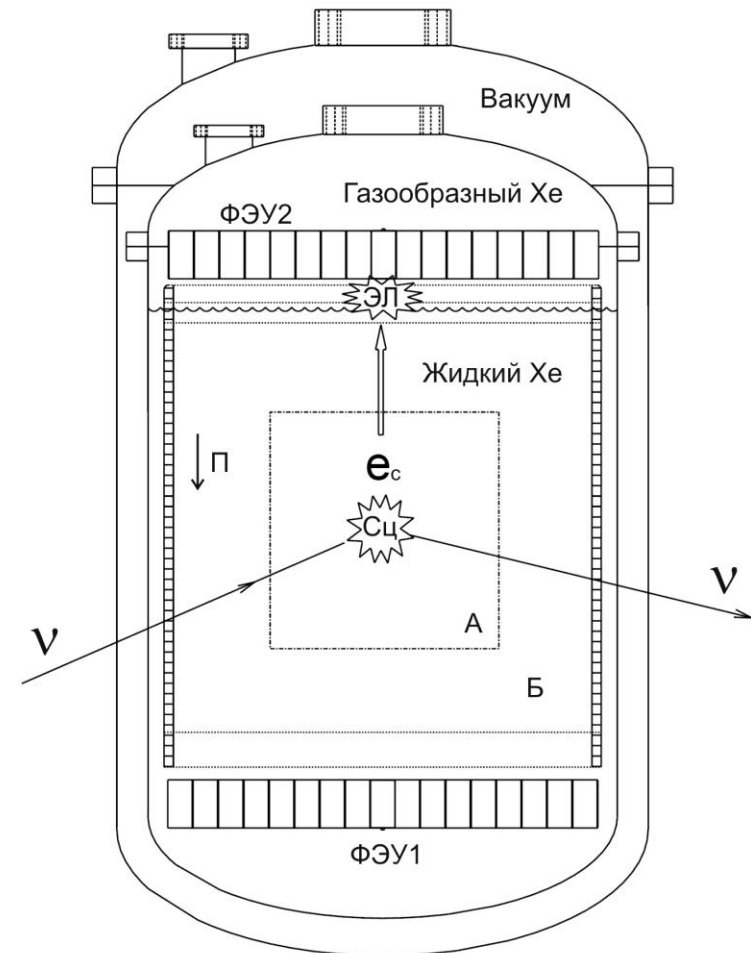
2) Слабый сцинтилляционный сигнал



3) Дрейф e^- ионизации в газовую фазу под действием электромагнитного поля



4) Электролюминесценция электронов в газе

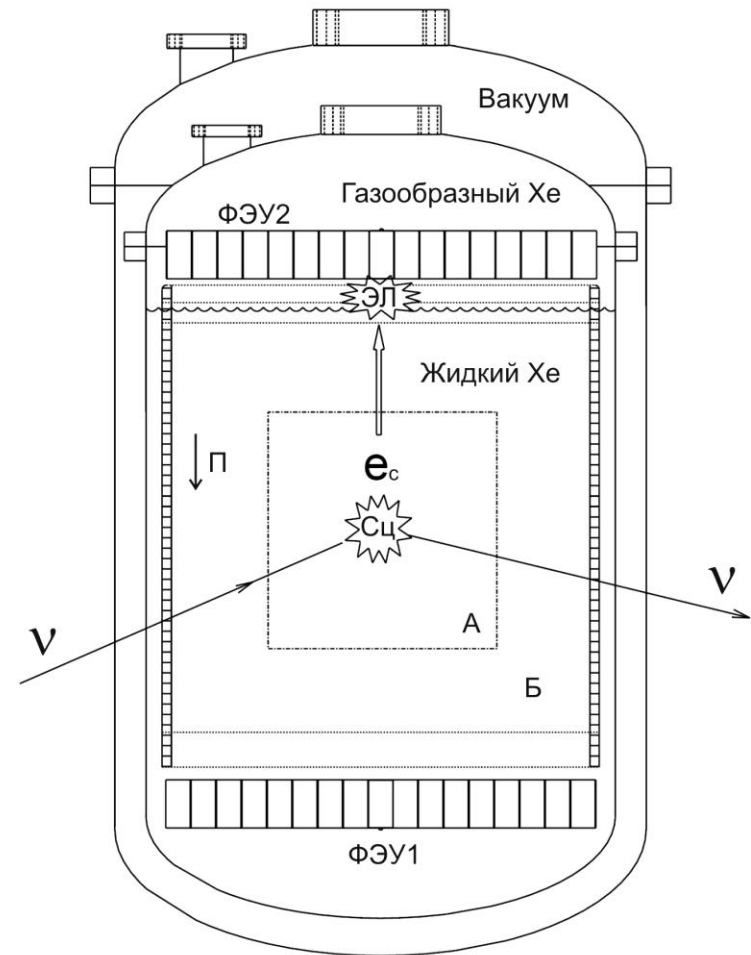


«Бесстеночный режим»:

А – рабочий объём. События в нём – полезные.
 Б – активная и пассивная защита.

Характерный недостаток эмиссионных детекторов на жидком ксеноне –
одноэлектронные шумы:

Обусловлены термоэлектронной эмиссией электронов ионизации, скопившихся под границей раздела фаз. Частота - десятки герц. Слабое тангенциальное поле снижает частоту в несколько раз.



РЭД-100. Характеристики.

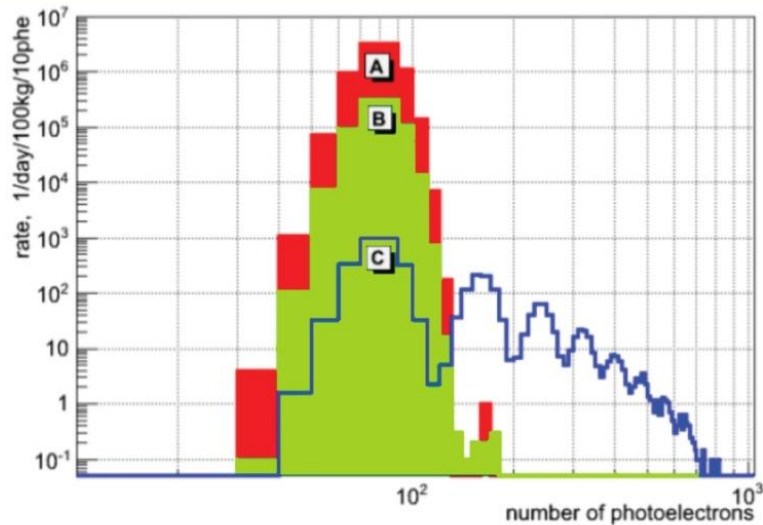
220 кг ксенона, **100 кг** – в рабочем объёме.

Низкофоновые материалы:

Компонент (материал)	^{238}U	^{232}Th	^{40}K	^{60}Co	^{137}Cs
ФЭУ, мБк/шт	0,4	0,3	8,3	2	
Криостат (титан), мБк/кг	0,2	0,25	0,93		
Отражатель (тефлон), мБк/кг	2	2	15	5	1
Конструктив для ФЭУ/ теплообменник (медь), мБк/кг	2	1	4	1	0,5

Один e^- ионизации в результате люминесценции (в газе) порождает 80 фотоэлектронов на ФЭУ одной матрицы (два e^- - 160 ф.э., три e^- - 240 ф.э., ...).

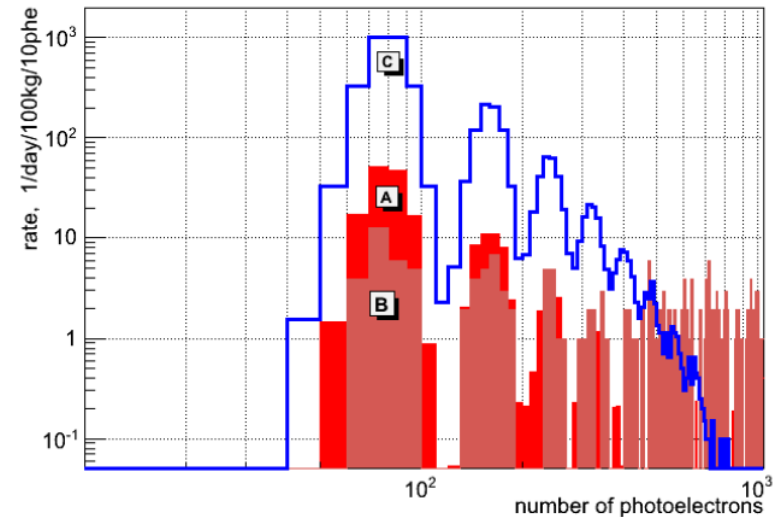
Проведение эксперимента на Калининской АЭС:



Результат моделирования – события от:

- A** – одноэлектронных шумов (100 Гц);
- B** – одноэлектронных шумов (10 Гц);
- C** – когерентного рассеяния.

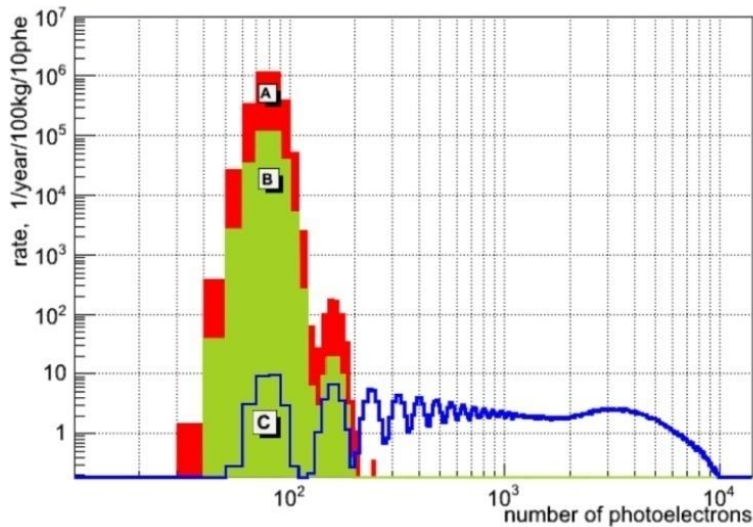
38 000 полезных событий в день
433 события в день (от трёх и более e⁻)



Результат моделирования фонов – число событий от:

- A** - собственной активности компонент детектора,
- B** - нейтронов от космики,
- C** - когерентного рассеяния.

Проведение эксперимента на Spallation Neutron Source, Оак Ридж, США:



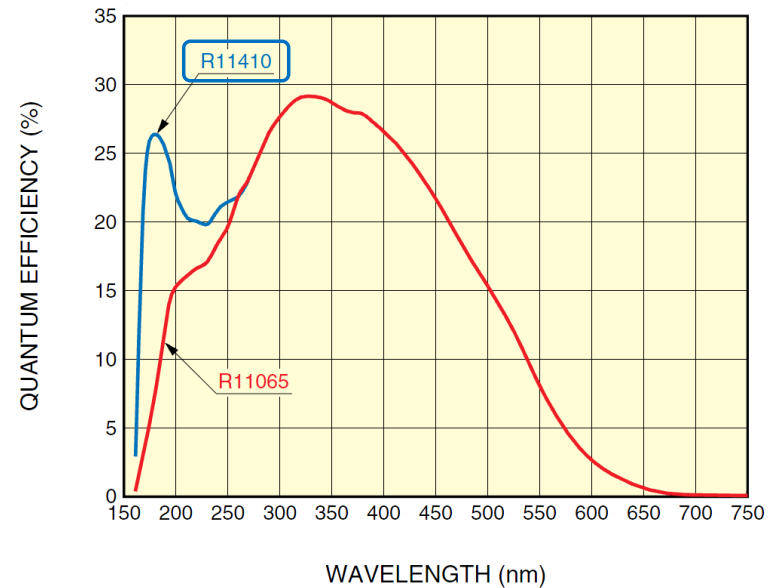
2000 полезных событий в год
1400 событий в год (от трёх и более e^-)

Результат моделирования для числа событий при облучении на Spallation Neutron Source, Oak Ridge:

- A** – одноэлектронные шумы (100 Гц);
- B** – одноэлектронные шумы (10 Гц);
- C** – когерентное рассеяние.

- РЭД-100:
 - Когерентное рассеяние нейтрино
 - Принцип работы эмиссионного детектора
 - Характеристики РЭД-100
- *ФЭУ Hamamatsu R11410-20:*
 - *Описание ФЭУ*
 - Установка по тестированию ФЭУ
 - Характеристики ФЭУ:
 - *чувствительность и однофотозлектронные спектры*
 - *уровень шумов*
 - *спектры послеимпульсов*
- Заключение

ФЭУ Hamamatsu R11410-20

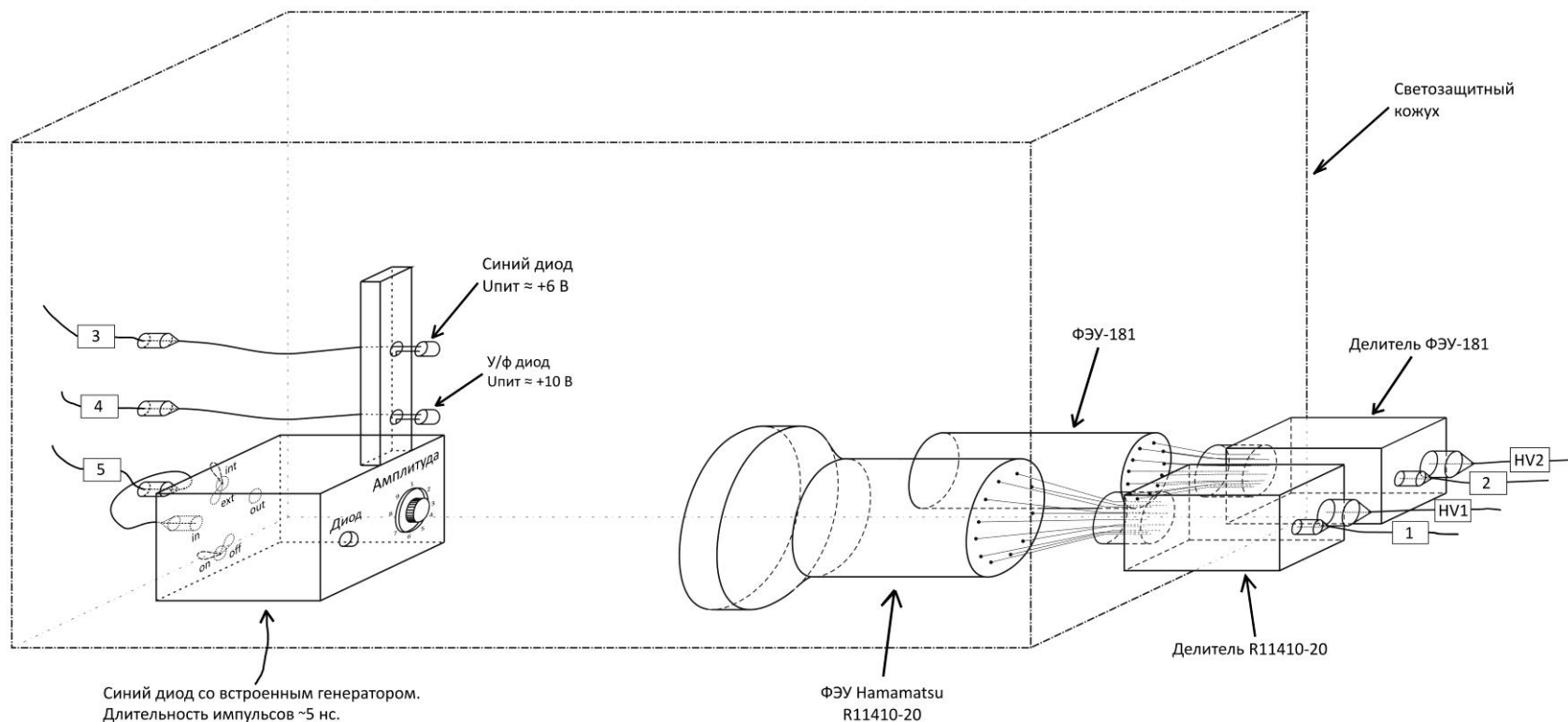


Window material: synthetic silica

Photocathode: bialkali

Установка по тестированию ФЭУ

Схема конструктивной части установки для тестирования ФЭУ



Характеристики ФЭУ

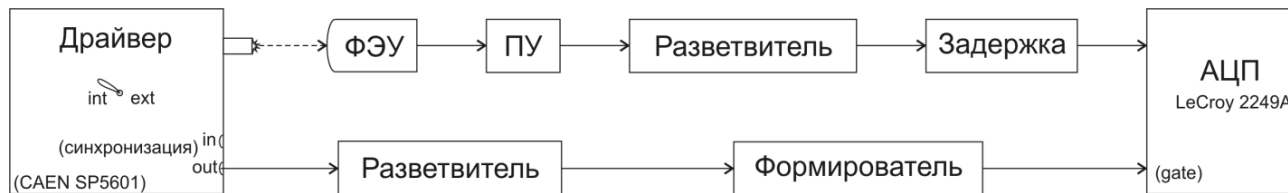
Амплитуда выходного импульса ФЭУ индивидуальна для каждого прибора

Амплитуда выходного импульса ФЭУ напрямую зависит от напряжения питания

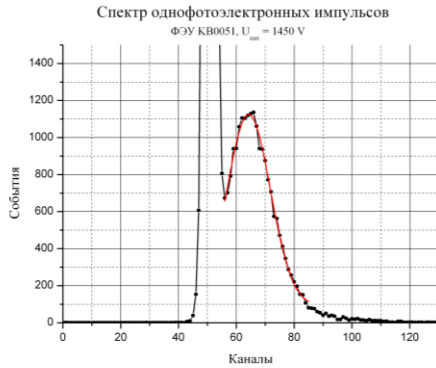


Можно подобрать индивидуальное $U_{\text{пит}}$ по каждому прибору и выровнять выходные амплитуды всех ФЭУ

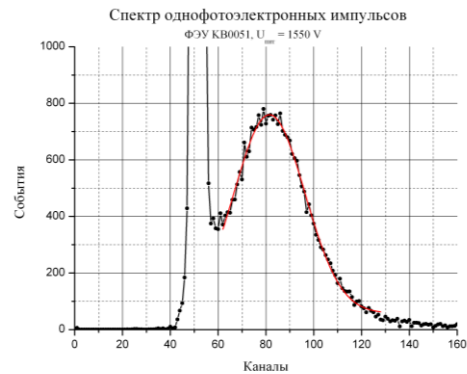
Однофотоэлектронные спектры



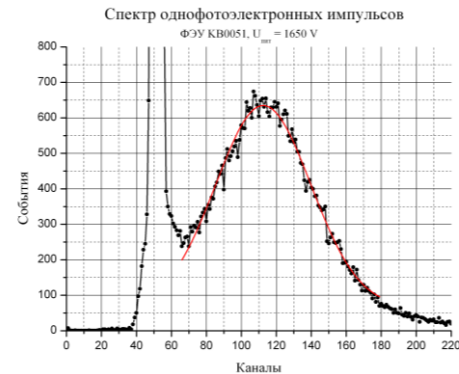
$P(0 \text{ ф.э.}) \approx 89,6\%$
 $P(1 \text{ ф.э.}) \approx 9,9\%$
 $P(2 \text{ ф.э.}) \approx 0,5\%$



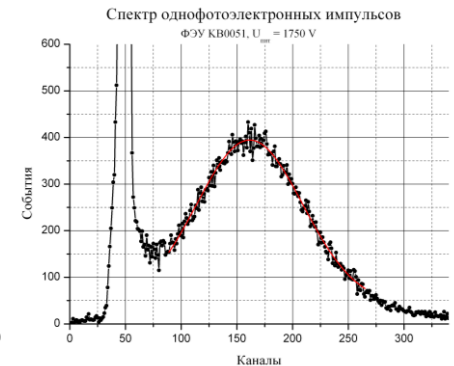
1450 V



1550 V

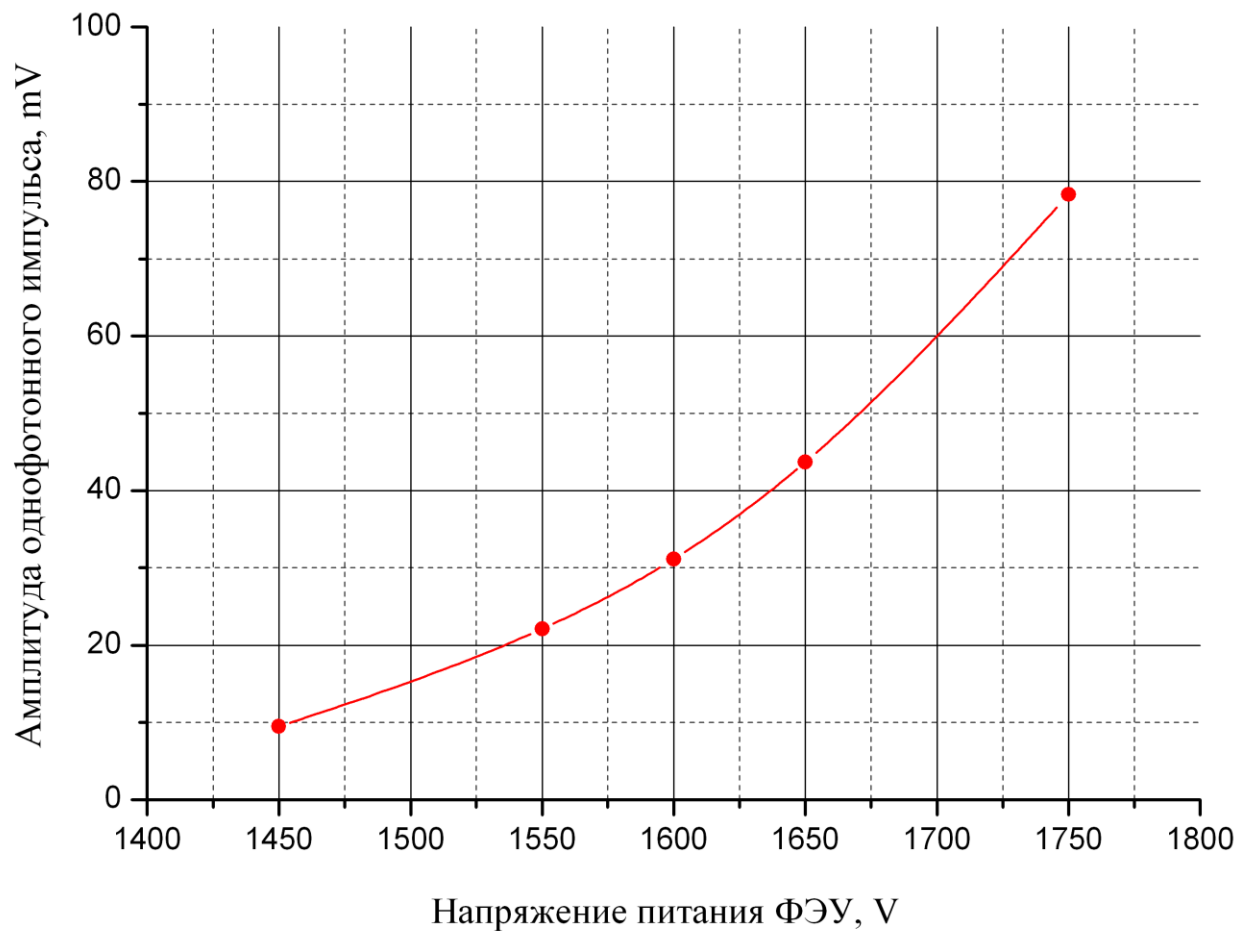


1650 V

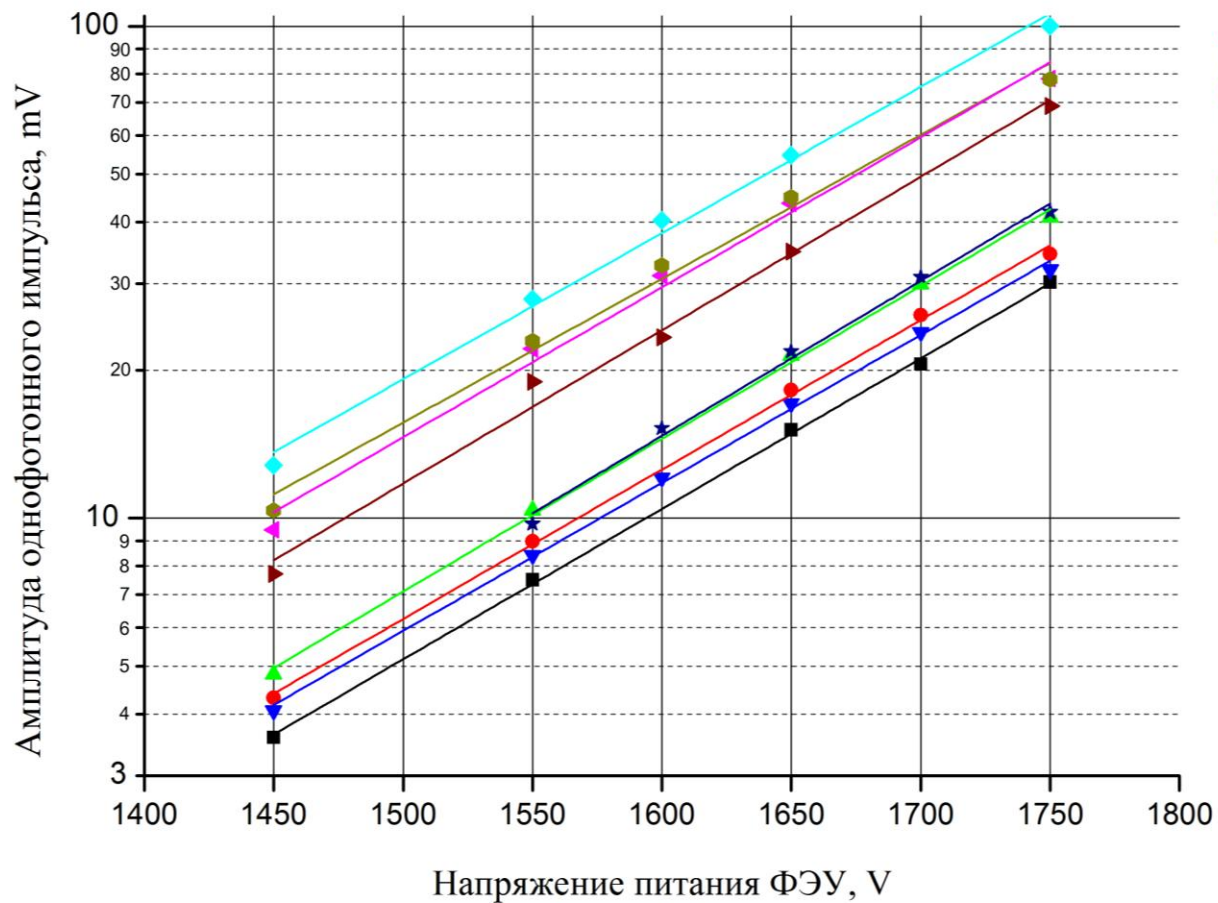


1750 V

Амплитуда сигнала с ФЭУ KB0051



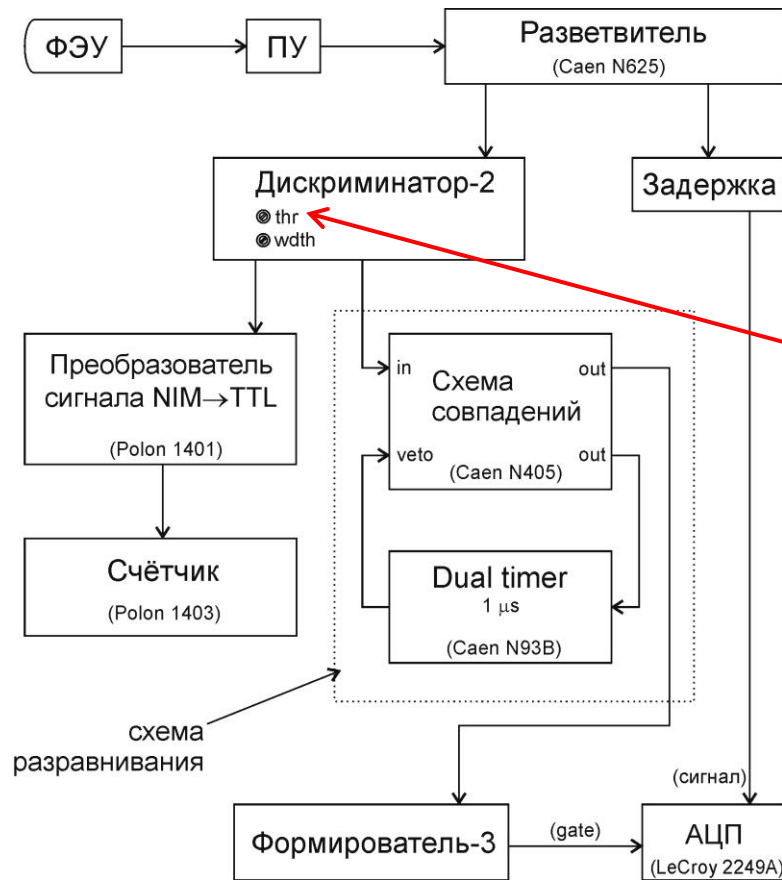
Распределение ФЭУ по амплитуде выходного сигнала



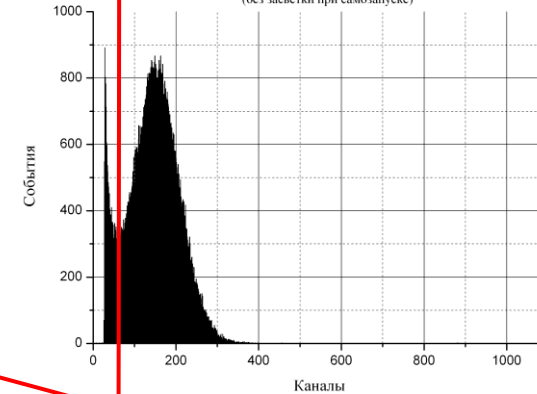
Serial number	Anode luminous sensitivity, A/lm
KB0049	768,0
KB0054	669,0
KB0052	609,0
KB0024	511,0
KB0051	461,0
KB0022	357,0
KB0020	338,0
KB0018	337,0
KB0021	324,0

Паспортные данные ФЭУ

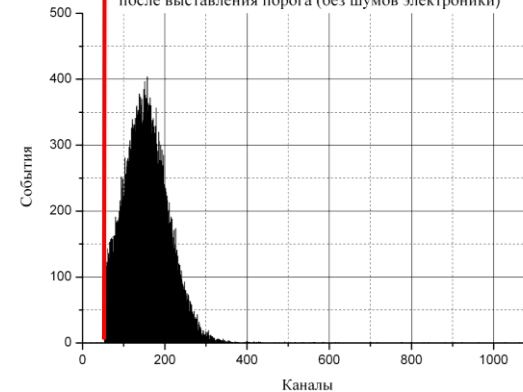
Характеристики шумов



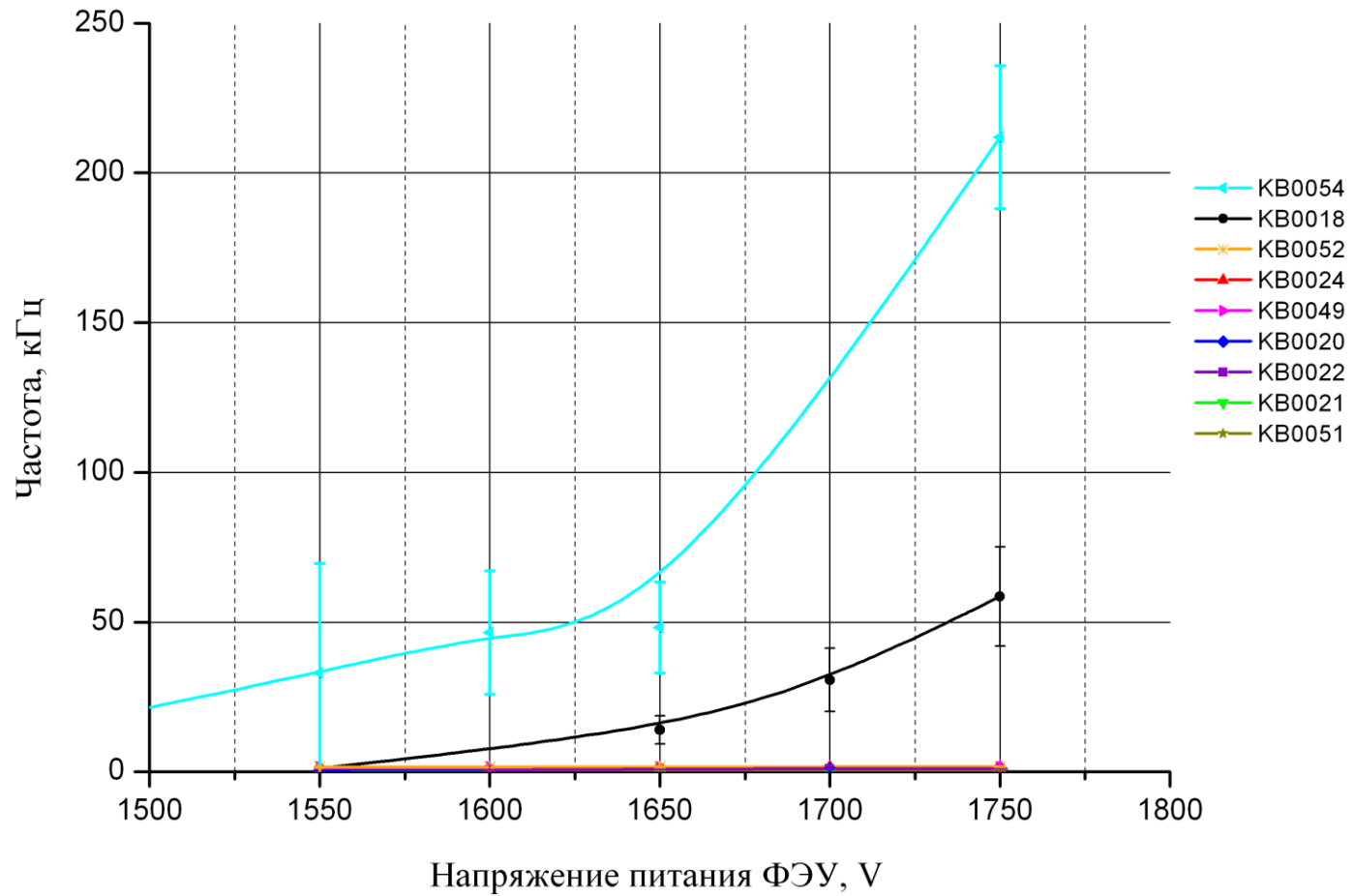
Спектр шумовых импульсов ФЭУ KB0051 при $U_{пит} = 1750$ V
(без засетки при самозапуске)



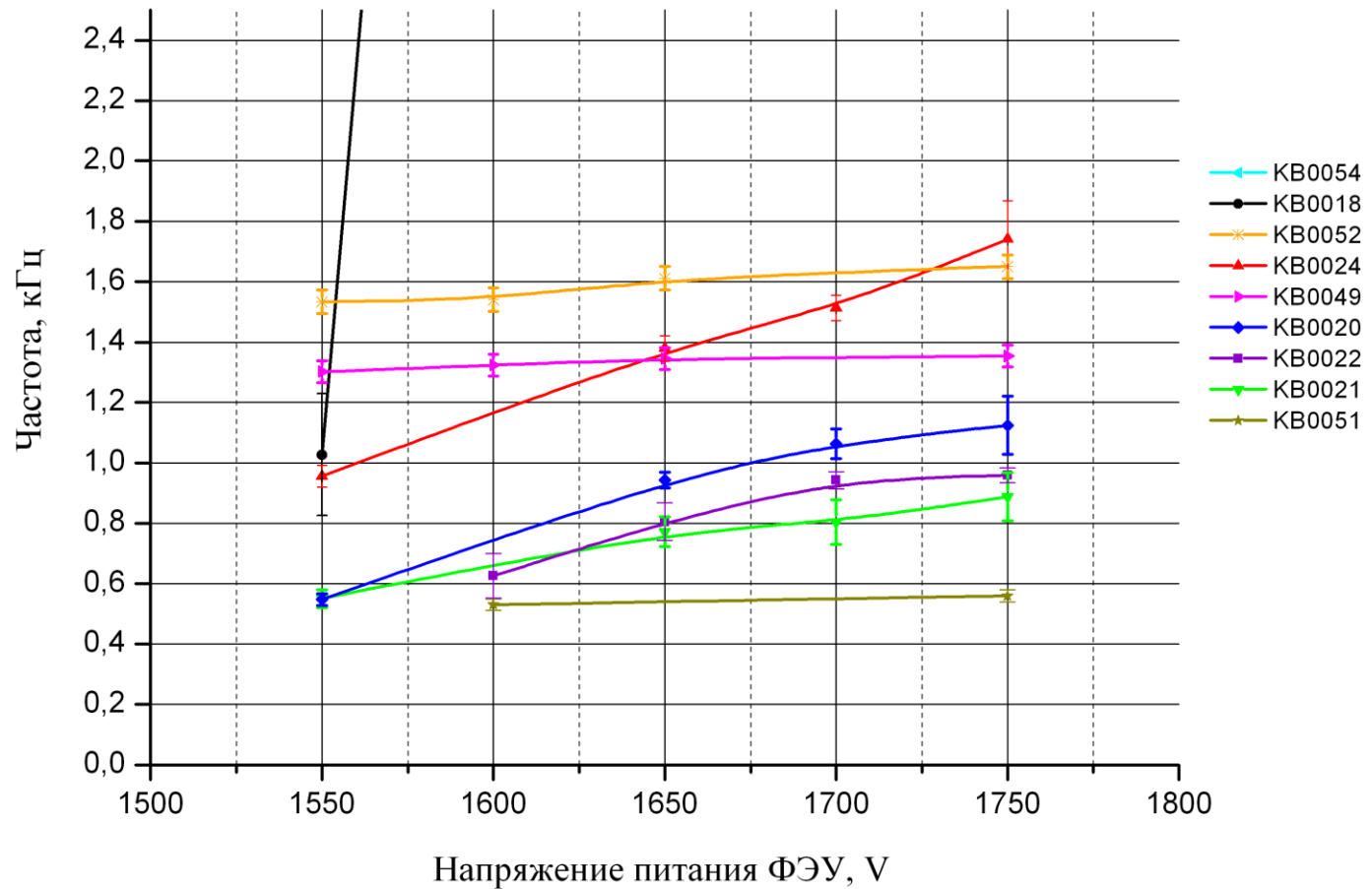
Част. спектра шумовых импульсов ФЭУ KB0051 при $U_{пит} = 1750$ V
после выставления порога (без шумов электроники)



Характеристика импульсов темнового тока



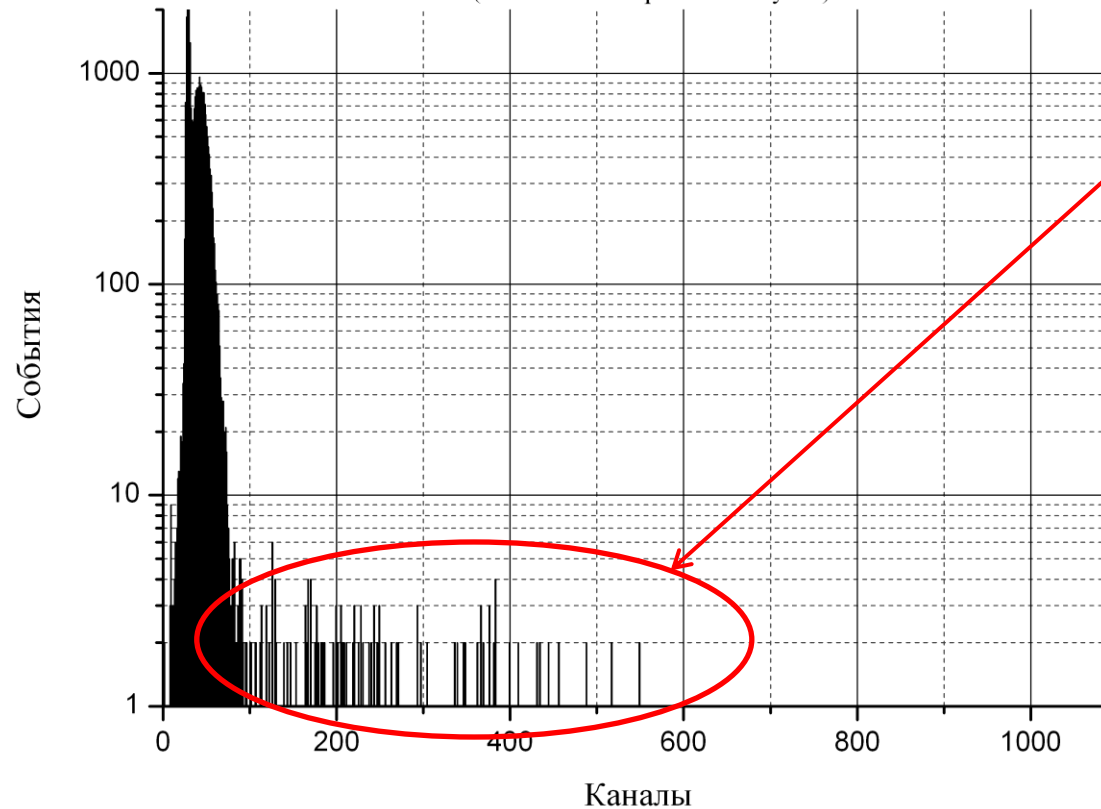
Характеристика импульсов темнового тока (другой масштаб)



Спектры послеимпульсов

Спектр шумовых импульсов ФЭУ KB0054 при $U_{\text{пит}} = 1450 \text{ V}$

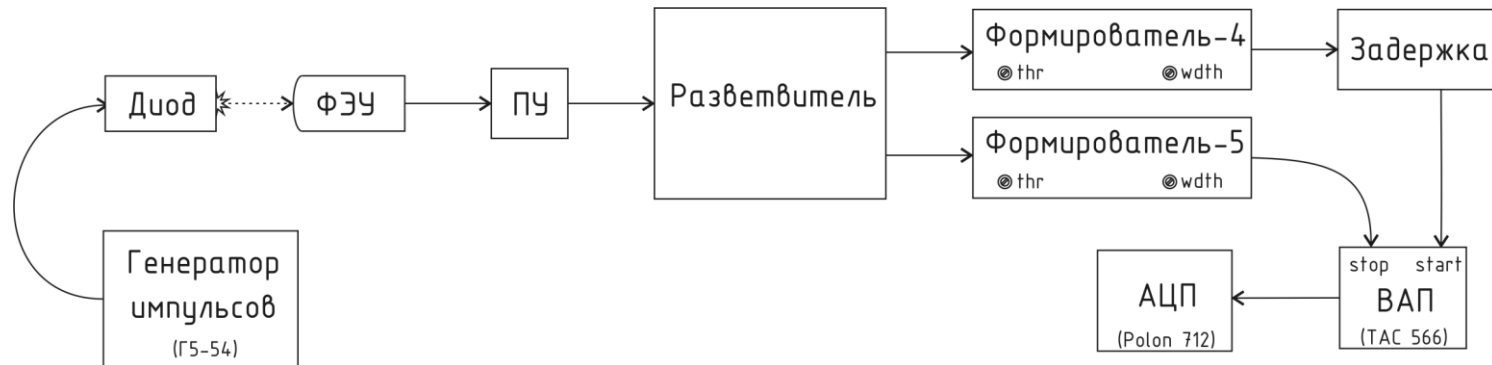
(без засветки при самозапуске)



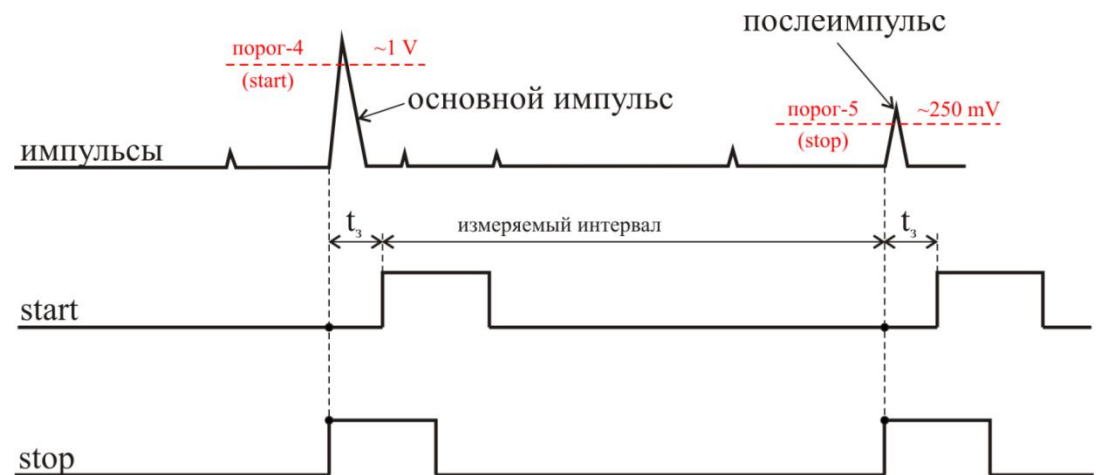
Послеимпульсы

Амплитуда - несколько ф.э.
Время прихода – $100 \div 2000$ нс после основного события.

Схема установки по измерению периодов следования послеимпульсов:

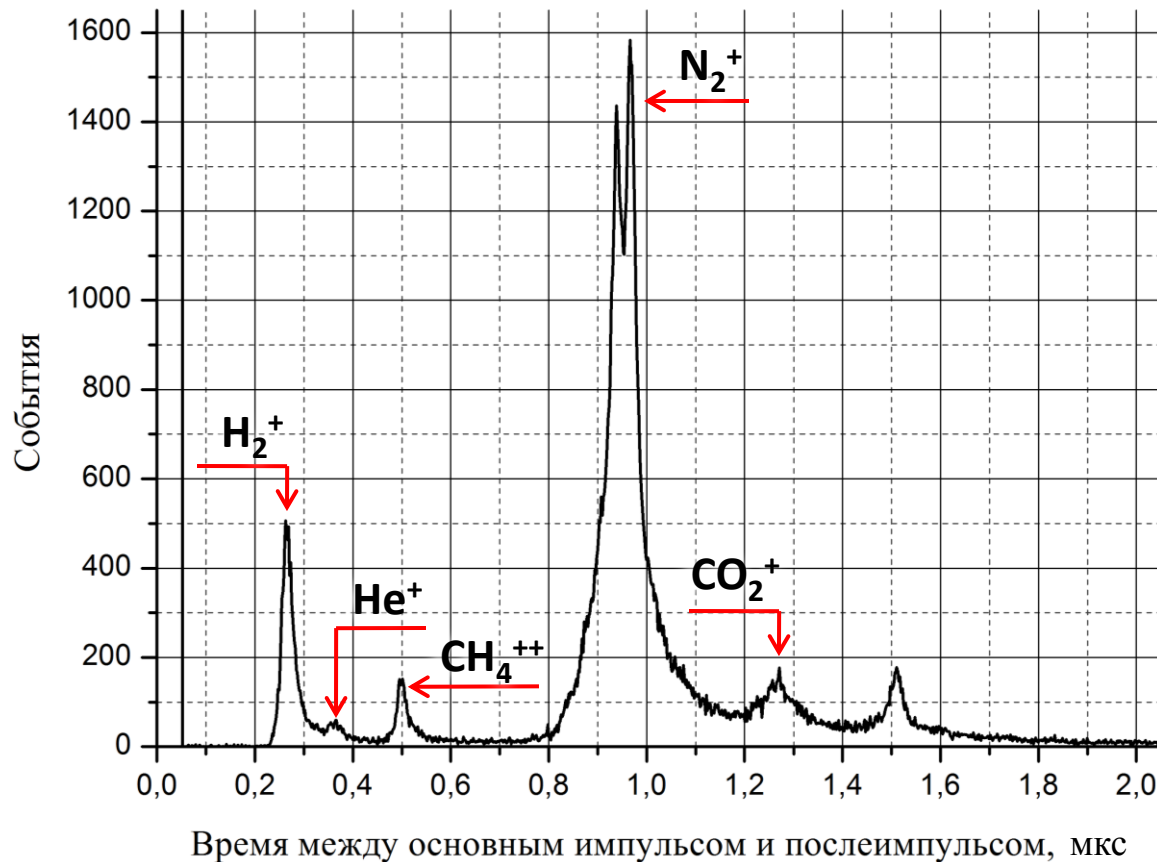


Временная диаграмма,
поясняющая работу схемы:



Временной спектр следования послеимпульсов ФЭУ KB0020,

$$U_{\text{пит}} = 1600 \text{ V}, t_{\text{изм}} = 25 \text{ мин}$$



$$\tau = l \sqrt{\frac{2m}{qU}}$$

↑
время дрейфа
ионов к фотокатоду

- РЭД-100:
 - Когерентное рассеяние нейтрино
 - Принцип работы эмиссионного детектора
 - Характеристики РЭД-100
- ФЭУ Hamamatsu R11410-20:
 - Описание ФЭУ
 - Установка по тестированию ФЭУ
 - Характеристики ФЭУ:
 - *чувствительность и однофотозлектронные спектры*
 - *уровень шумов*
 - *спектры послеимпульсов*
- *Заключение*

Заключение

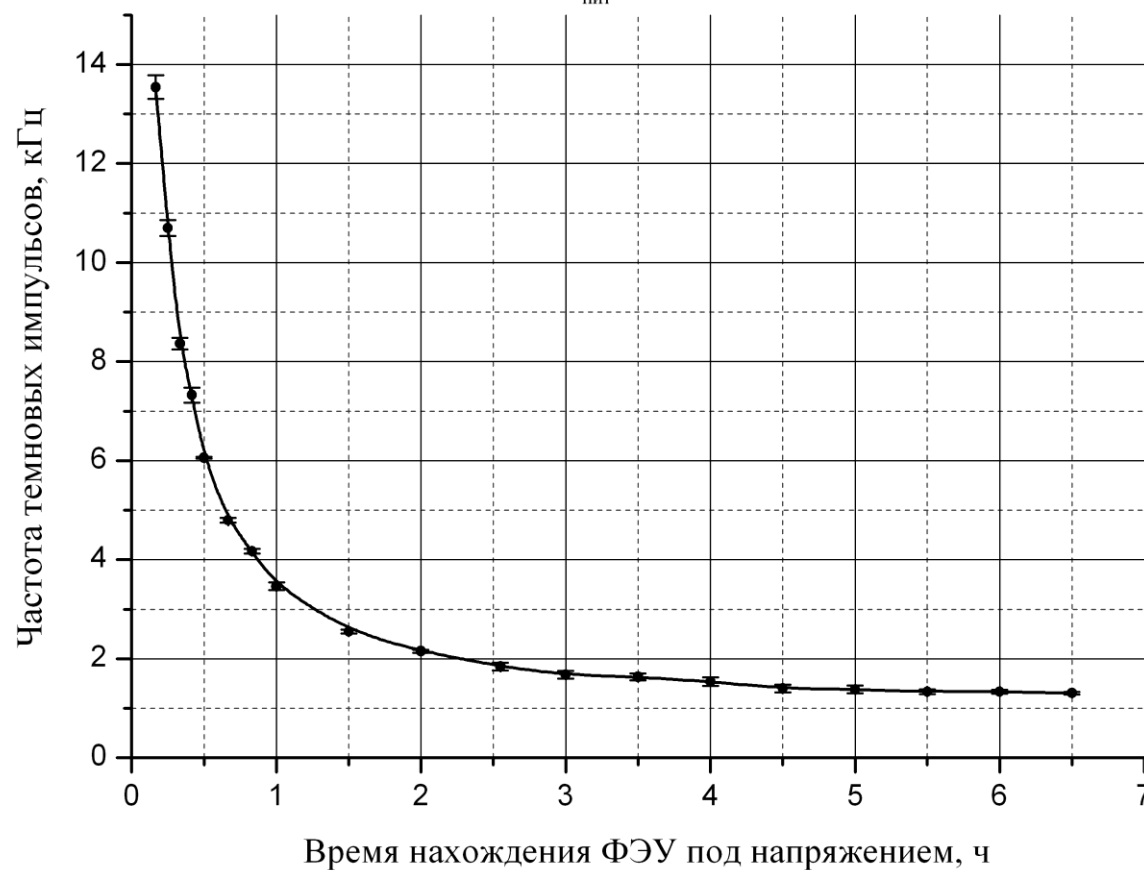
- Эмиссионные детекторы на благородных газах – чувствительный инструмент, позволяющий зарегистрировать КРН;
- Результаты моделирования для детектора конфигурации РЭД-100 дают обнадеживающие результаты;
- Уже ведутся активные работы по сборке детектора;
- Важное «белое пятно» теории – ионизационный выход от частиц с $E < 1$ кэВ – будет исследовано в эксперименте РЭД-1;
- ФЭУ Hamamatsu R11410-20 – замечателен по уровню собственной активности и чувствительности к однофотонным событиям;
- Измеренные характеристики ФЭУ позволят:
 - выровнять по всем ФЭУ амплитуды сигналов от одинаковых вспышек;
 - наиболее рационально расположить ФЭУ в матрице;
 - оценить частоту собственных шумов ФЭУ;
 - исследовать микроскопические течи в корпусе ФЭУ по возрастающему пику послеимпульсов от ионов Хе.

Спасибо за внимание!

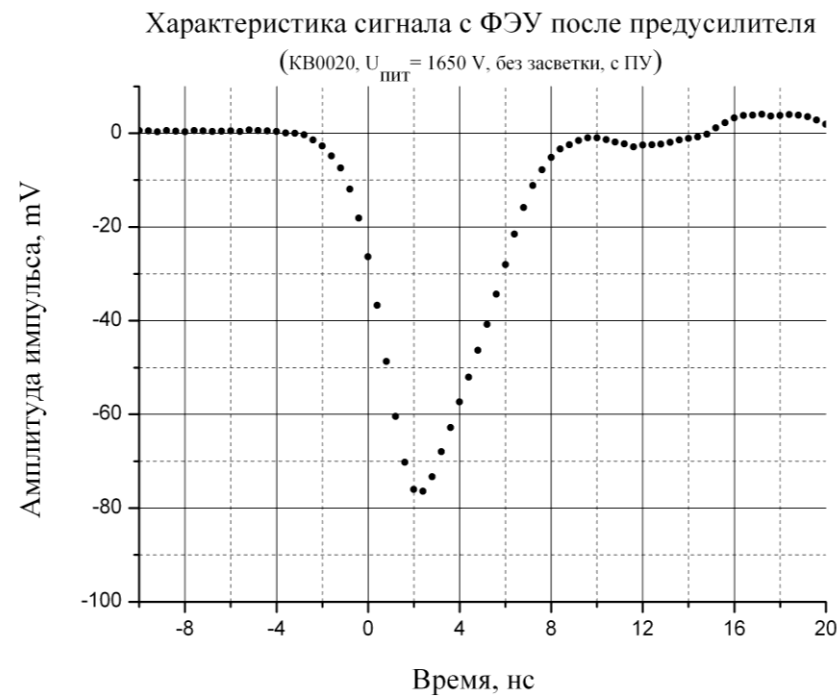
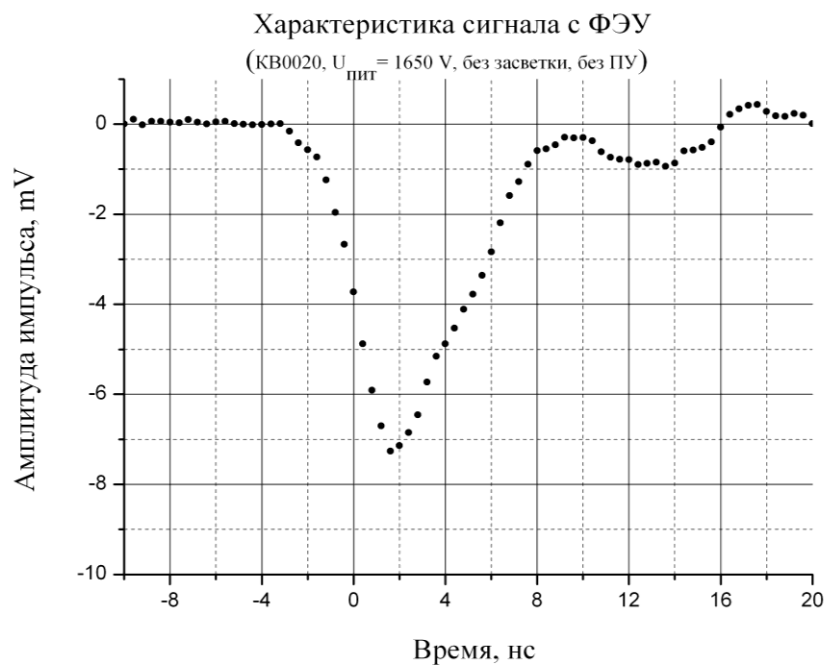
Back-up slides



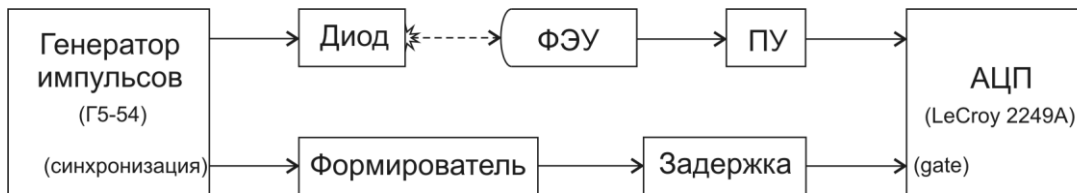
Исследование частоты темновых импульсов на стабильность,

ФЭУ KB0051, $U_{\text{пит}} = 1550 \text{ V}$, без засветки

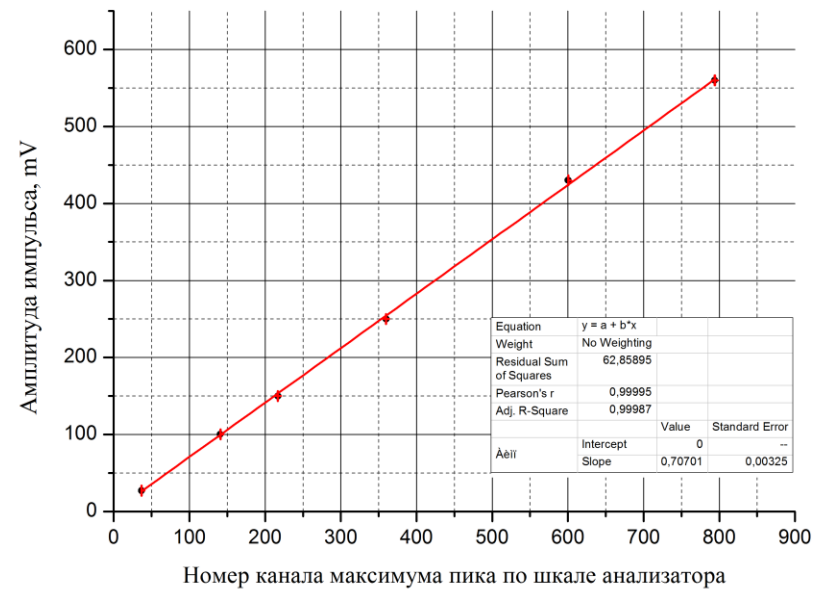
Форма сигналов

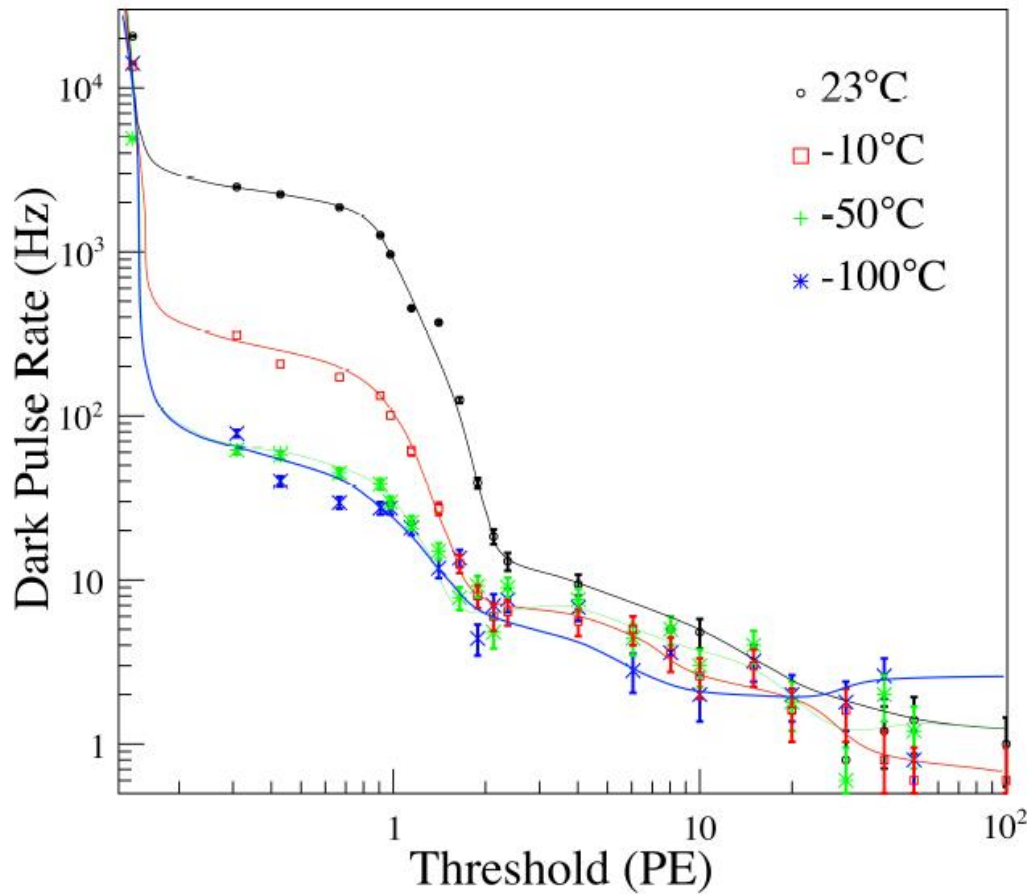


Калибровка шкалы анализатора



Калибровка шкалы анализатора

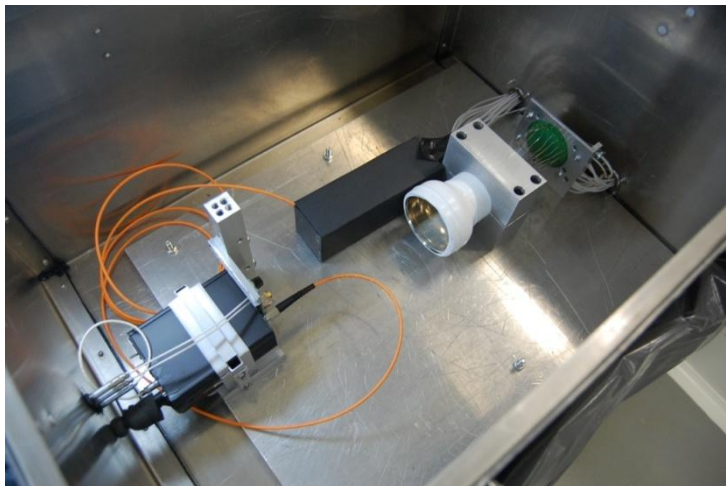
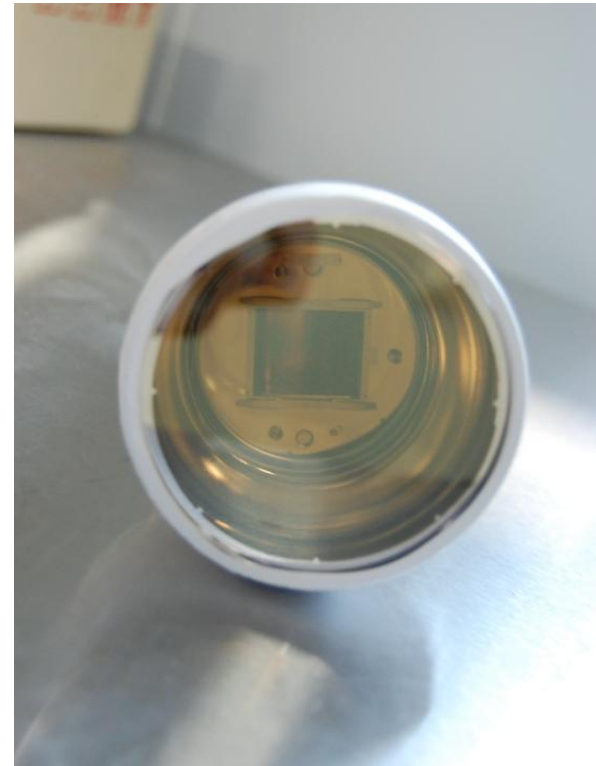




K. Lung, K. Arisaka, A. Bargetzi, P. Beltrame, A. Cahill, T. Genma, C. Ghag, D. Gordon, J. Sainz, A. Teymourian, Y. Yoshizawa, «*Characterization of the Hamamatsu R11410-10 3-Inch Photomultiplier Tube for Liquid Xenon Dark Matter Direct Detection Experiments*»

$$\tau = 7.2 \times 10^{-5} (M/Z)^{1/2} \int_{s_0}^0 (V(s_0) - V(s))^{-1/2} ds$$

- P.B. Coates, The origins of Afterpulses in Photomultipliers, J. Physics D: Applied Physics, 6, pp. 1159-1166 (1973).





Международная сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН

Протвино, 5 - 8 ноября 2013