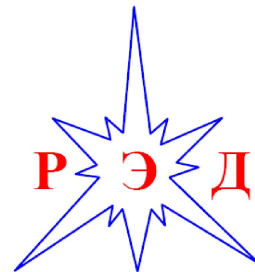




# Двухфазный эмиссионный детектор на жидком ксеноне и проблема одноэлектронных шумов при регистрации упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах ксенона

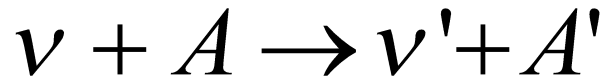
А.И.Болоздыня



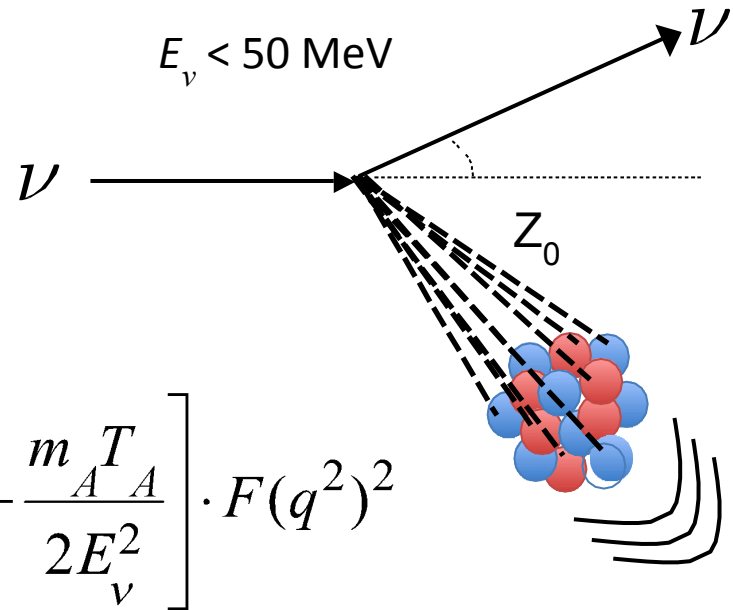
РОССИЙСКИЙ ЭМИССИОННЫЙ ДЕТЕКТОР

23 января 2020 года  
Семинар Теоретического отдела им Л.М.  
Бибермана

# 1. Упругое когерентного рассеяния нейтрино (УКРН) на тяжёлых ядрах



$$\Delta x_i \Delta p_i \geq \frac{\hbar}{2}$$



$$\frac{d\sigma}{dT_A} = \frac{G_F^2}{4\pi} m_A [Z(1 - 4\sin^2\theta_w) - N]^2 \left[ 1 - \frac{m_A T_A}{2E_\nu^2} \right] \cdot F(q^2)^2$$

$m_A$  – масса атомного ядра с атомным номером  $A$ ,  $T_A$  – кинетическая энергия ядра отдачи,  $E_\nu$  – энергия нейтрино,  $Z$  – число протонов в ядре,  $N$  – число нейтронов в ядре,  $F(q^2)$  – ядерный формфактор,  $\theta_w$  - угол Вайнберга,  $\sin^2\theta_w \approx 0.22$ ;  $(1 - 4\sin^2\theta_w) = o(1)$

*D.Z. Freedman, D.N. Schramm, and D.L. Tubbs. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 27, 167 (1977)*

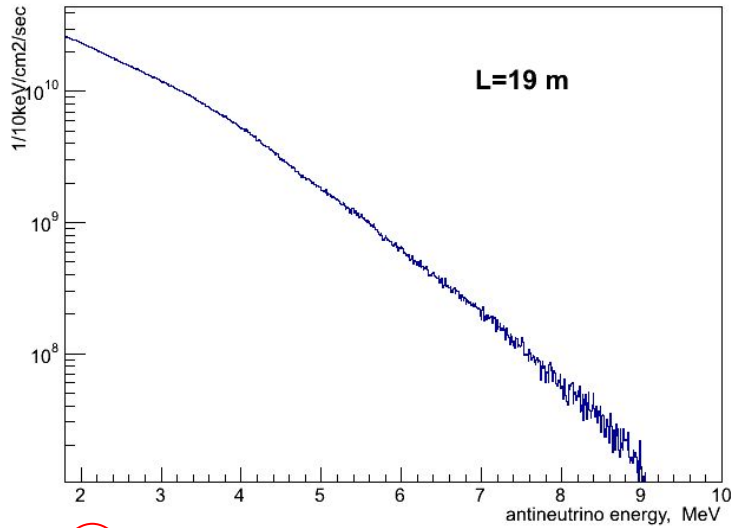
$$\sigma \sim N^2$$

Эффект УКРН был впервые наблюден в 2017 году в международном эксперименте COHERENT, проводимом в Окриджской национальной лаборатории США на сильноточном протонном ускорителе SNS, генерирующем смесь трёх типов нейтрино

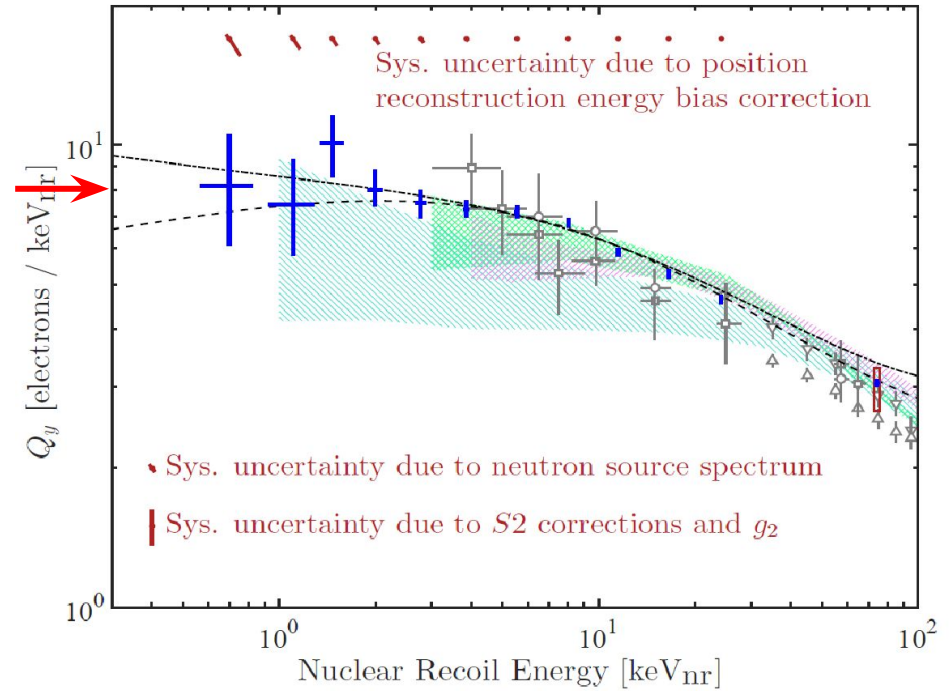
*D.Y. Akimov et al. Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering, Science 357 (2017) no. 6356 1123 [arXiv:1708.01294].*

## 2. Использование ядерного реактора в качестве источника нейтрино, а ядер Хе в качестве мишени

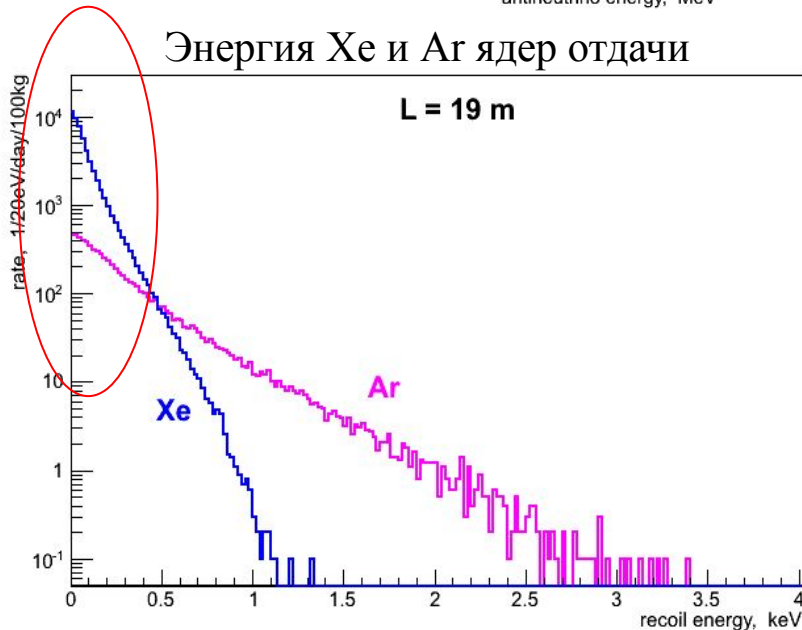
$\bar{\nu}_e$  энергетический спектр



Величина сигнала



Энергия Хе и Ar ядер отдачи

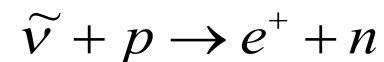


Усреднённое по спектру реакторных антинейтрино для ядра Хе

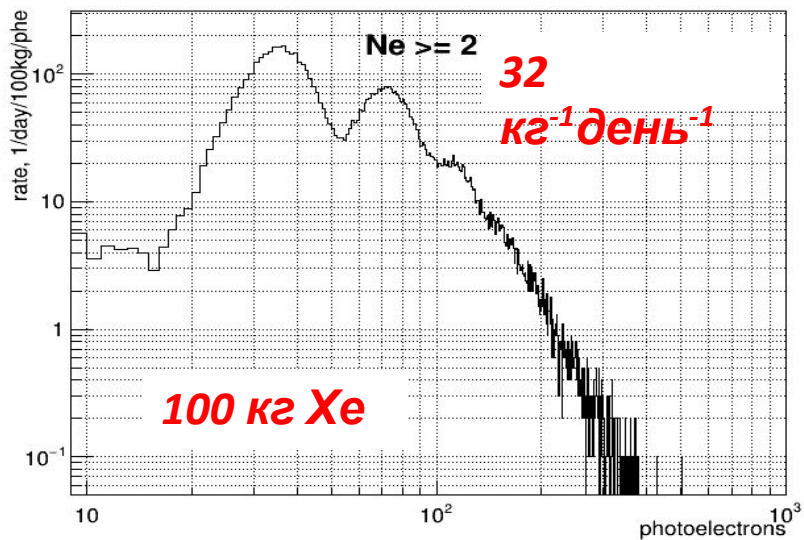
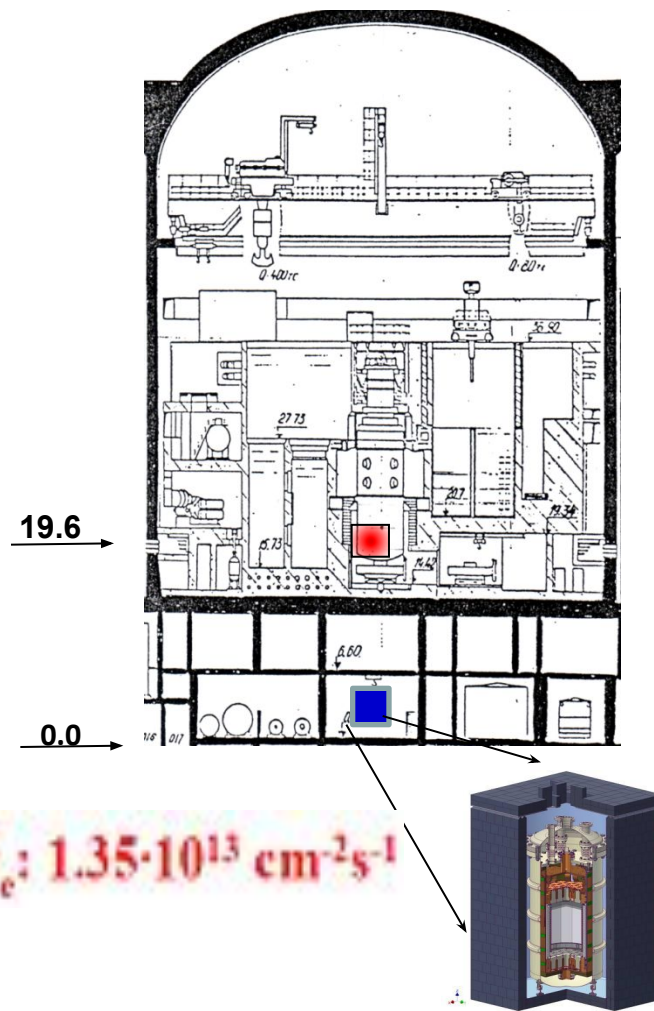
$$\langle \sigma \rangle \approx 7 \cdot 10^{-41} \text{ см}^2$$

Для сравнения - сечение обратного бета распада на протоне

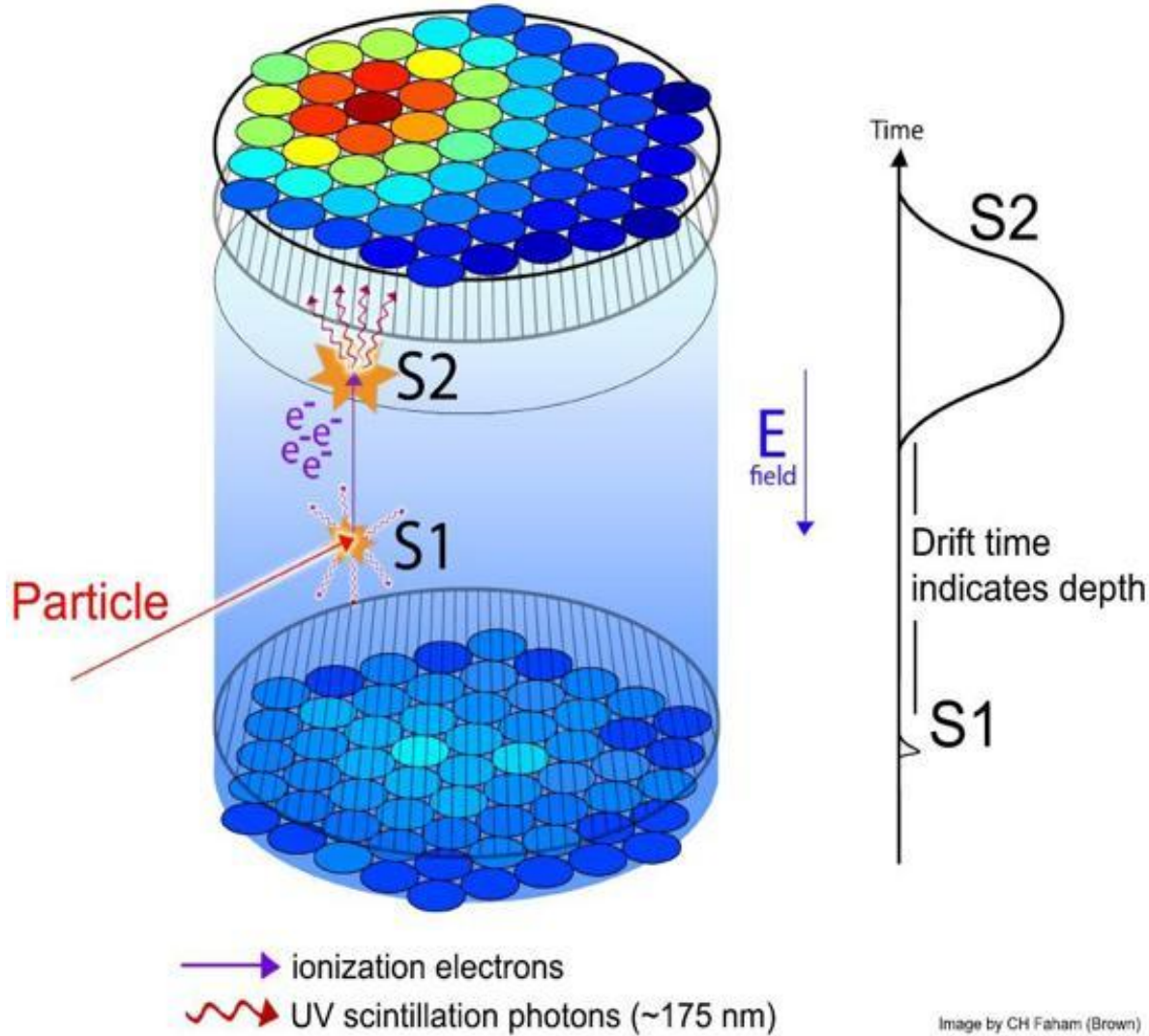
$$\langle \sigma \rangle \approx 1 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2$$



# Постановка эксперимента на Калининской АЭС

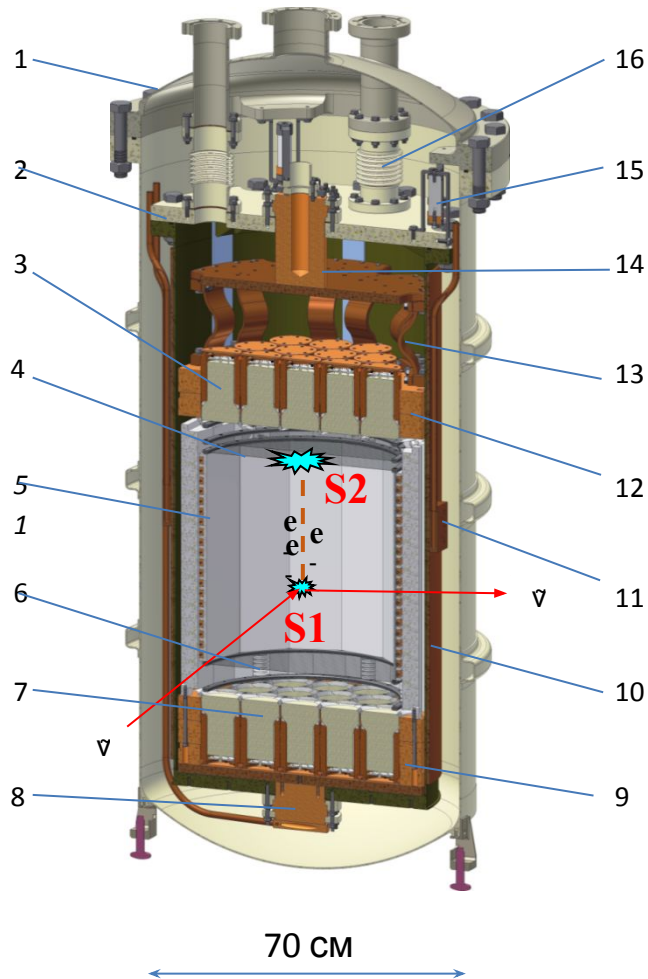


## 4. Двух-фазный эмиссионный детектор



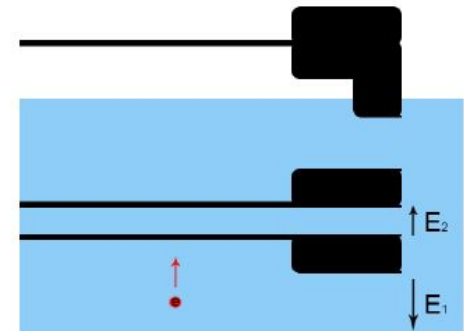
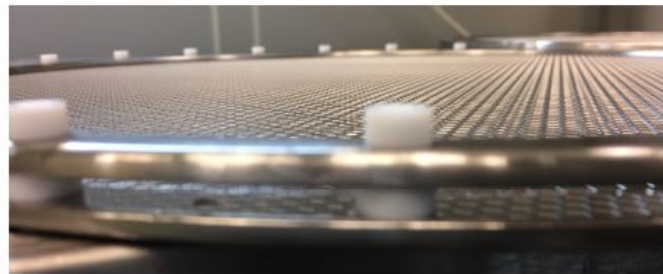
- 3D позиционная чувствительность
- Разделение  $\gamma/n, \nu$
- Тяжелое ядро Xe
- Отсутствие АКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ Xe

## Детектор РЭД-100

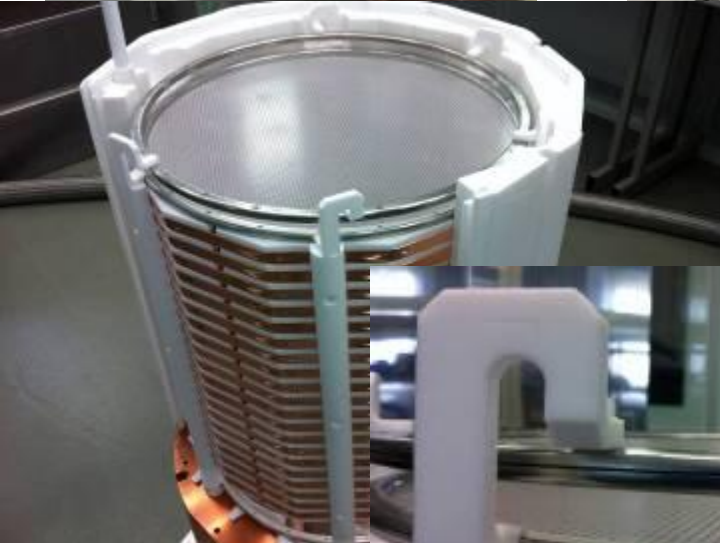
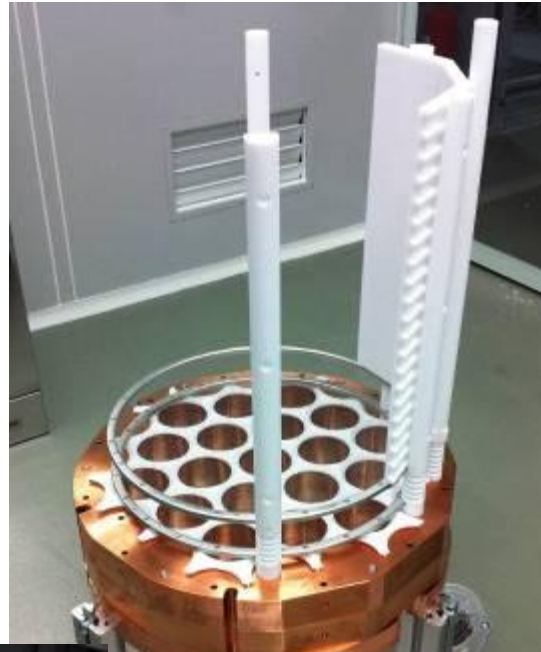


1 – внешний (тёплый) сосуд криостата, 2 – внутренний (холодный) сосуд криостата, 3 – верхняя матрица из девятнадцати ФЭУ типа Hamamatsu R11410-20, 4 – сетчатый анод и вытягивающая сетка, 5 – рабочий объем, окружённый тефлоновым отражателем со встроенными поле-задающими электродами, 6 – сетчатый катод, 7 – нижняя матрица из девятнадцати ФЭУ, 8 – нижний центральный теплосъёмник с термосифоном, 9 – медная обойма для нижней матрицы ФЭУ, 10 – медный кожух холодного сосуда криостата, 11 – один из двух боковых теплосъёмников с термосифонами, 12 – медная обойма верхней матрицы ФЭУ, 13 – гибкий тепловой мост, 14 – верхний центральный теплосъёмник с медным диском, на котором конденсируется ксенон, 15 – теплоизолирующий подвес на основе материала Vespel, 16 – сильфонная тепловая развязка на трубопроводе для вывода кабелей;  $e^-$  – электроны,  $\bar{\nu}$  – антинейтрино, S1 – сцинтилляционная вспышка, S2 – электролюминесцентная вспышка.

### Электронный затвор

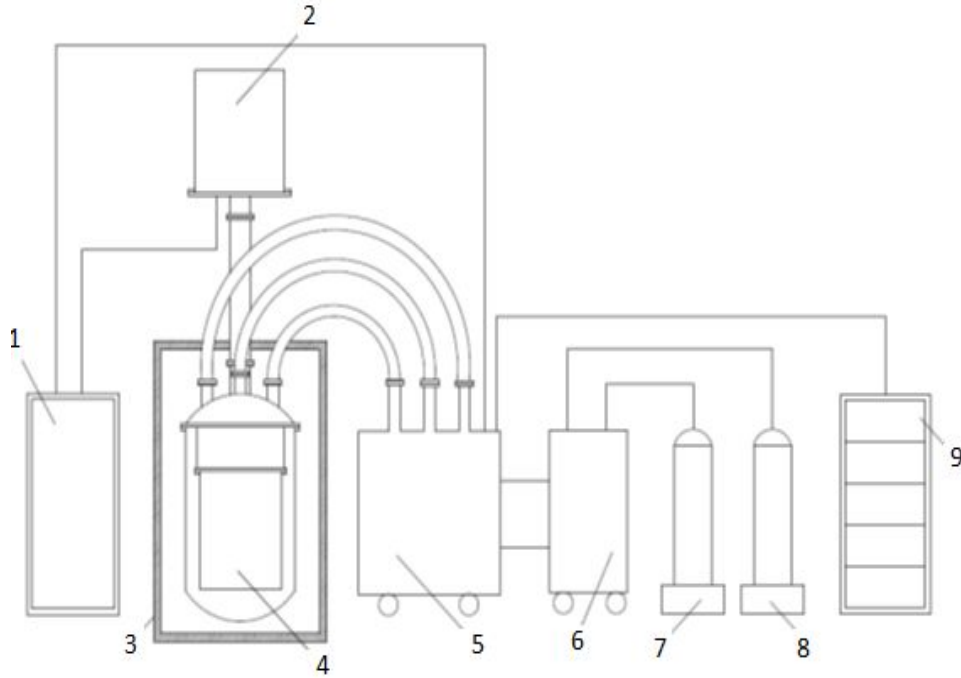


# Сборка детектора РЭД-100 в чистой комнате





Монтаж внутренней структуры детектора РЭД-100 в чистой комнате ISO5 класса



## Блок-схема и общий вид установки РЭД-100 в лаборатории экспериментальной ядерной физики НИЯУ МИФИ

1 - источник жидкого азота; 2 – криостат термосифонной криогенной системы; 3 - пассивная защита; 4 - детектор РЭД-100; 5 - интерфейсный блок; 6 - система газовой очистки; 7-8 - система хранения газообразного ксенона; 9 - система контроля над параметрами установки; 10 - система сбора данных.



Лабораторные испытания детектора РЭД-100 в 2019 году

## 5. Очистка исходного ксенона с помощью УФ облучения и Ti нанодисперсного геттера

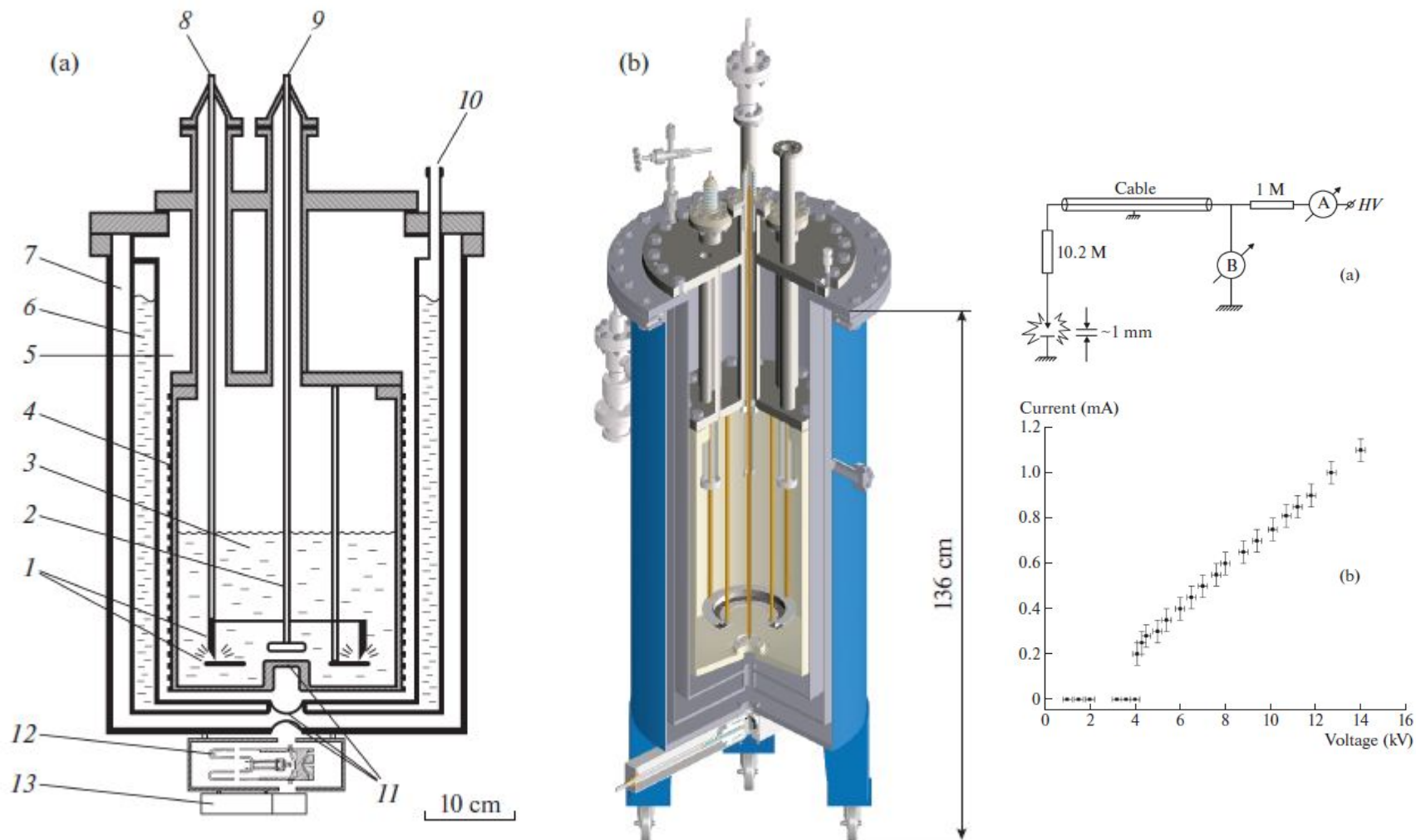


Fig. 1. Schematic drawing of Mojodyr (a) and general view of the apparatus (b): 1, titanium “blade-plane” electrodes; 2, anode of the ionization chamber for purity measurements; 3, liquid xenon; 4, cold vessel surrounded by copper wrap with electric heaters; 5, gaseous nitrogen jacket; 6, liquid nitrogen jacket; 7, vacuum jacket; 8, discharge gap high voltage feedthrough; 9, ionization signal output; 10, liquid nitrogen inlet; 11, X-ray aluminum windows; 12, X-ray tube (BSV-7 type); 13, scintillation detector.

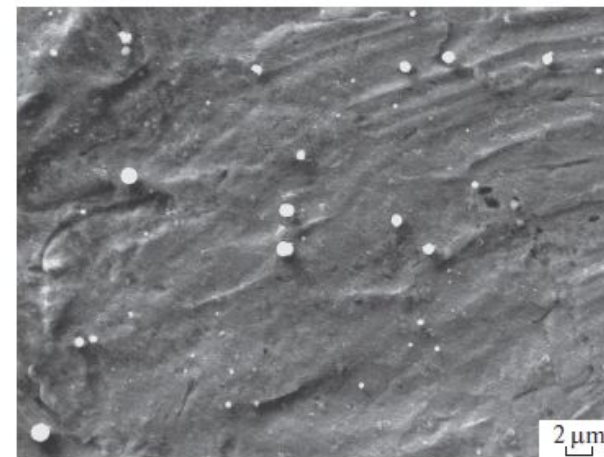
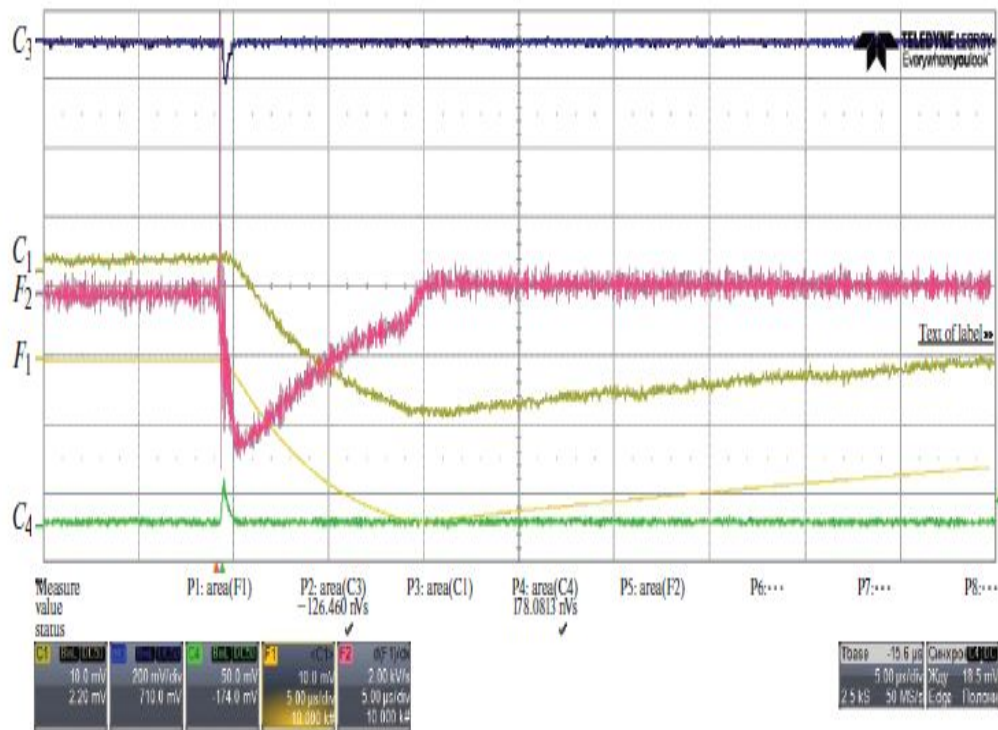
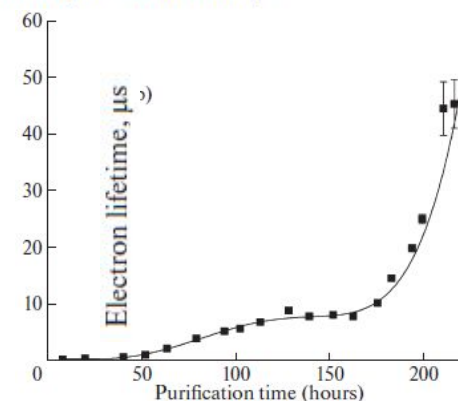


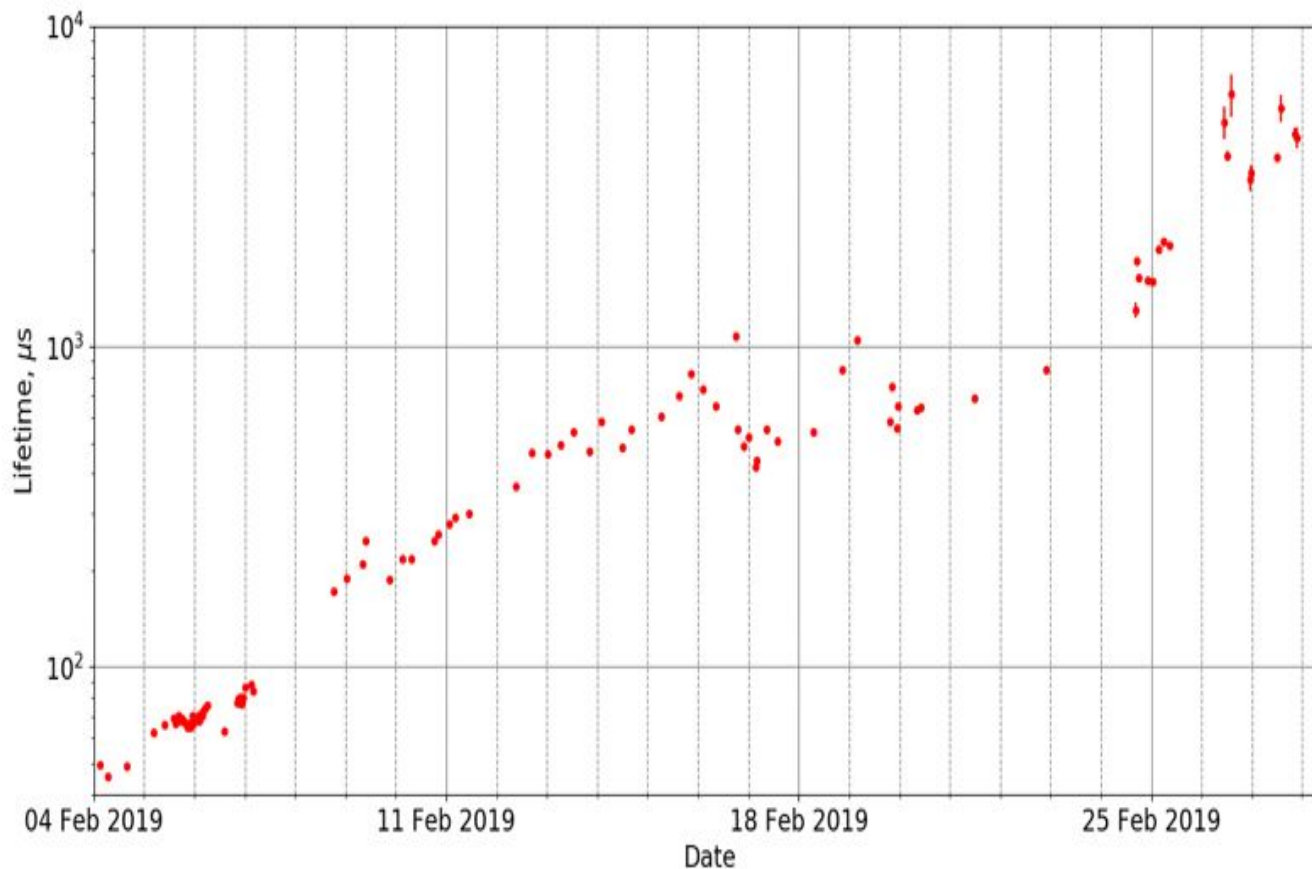
Fig. 6. The spheroidal particles of titanium powder on a metal piece immersed in liquid xenon during purification. The photo was obtained with the use of Carl Zeiss EVO 50 scanning electron microscope.



The content of molecular impurities in xenon before (“Initial”) and after (“Final”) the purification procedure, according to the analysis performed by Chromium LTD

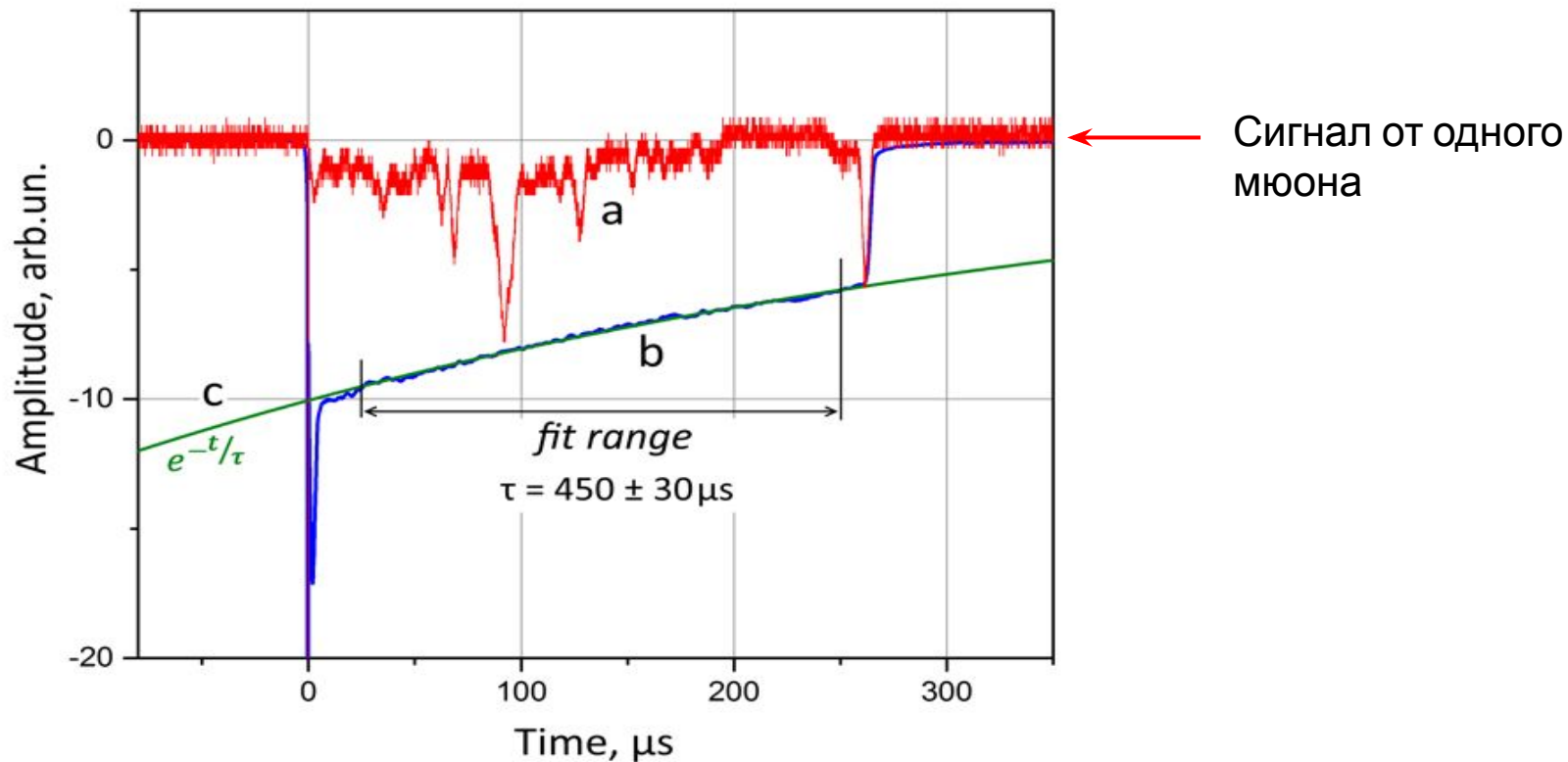
Purification stage	Content of molecular impurities, ppm								
	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CF <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SF <sub>6</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> R <sub>k</sub>
Initial	0.325	0.950	0.180	<0.001	0.210	0.835	1.4	0.015	7.450
Final	0.600	0.700	0.050	<0.001	0.065	0.015	1.0	<0.0001	1.520

Изменение времени жизни квази-свободных электронов до захвата электроотрицательными примесями (кислород) в жидком Xe при работе детектора с непрерывной циркуляционной очисткой с помощью горячего металлического геттера MONOTOR SAES



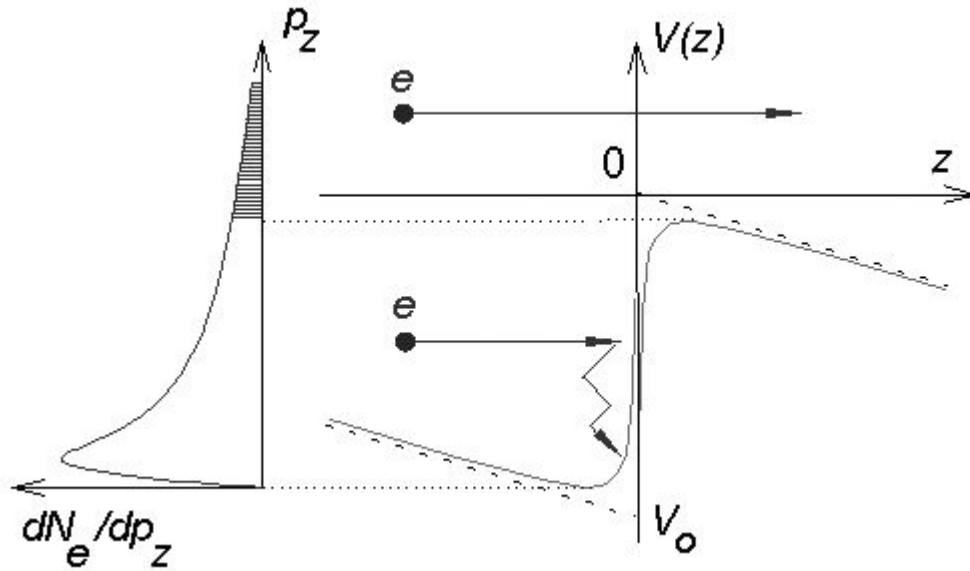
**Figure 7.** Evolution of the electron lifetime in the RED-100 detector during constant circulation of Xenon in the period February 4 – 27, 2019. Electric field strength is 0.3kV/cm

Измерение времени жизни квази-свободных электронов до захвата электроотрицательными примесями в жидком Хе с помощью космических мюонов



**Figure 6.** Examples of individual (a) and averaged (b) waveforms of muon events in the RED-100 detector, c – exponential fit of the averaged waveform; 10000 muon events were taken for averaging.

## 5. Электроны в ж.Хе в РЭД-100

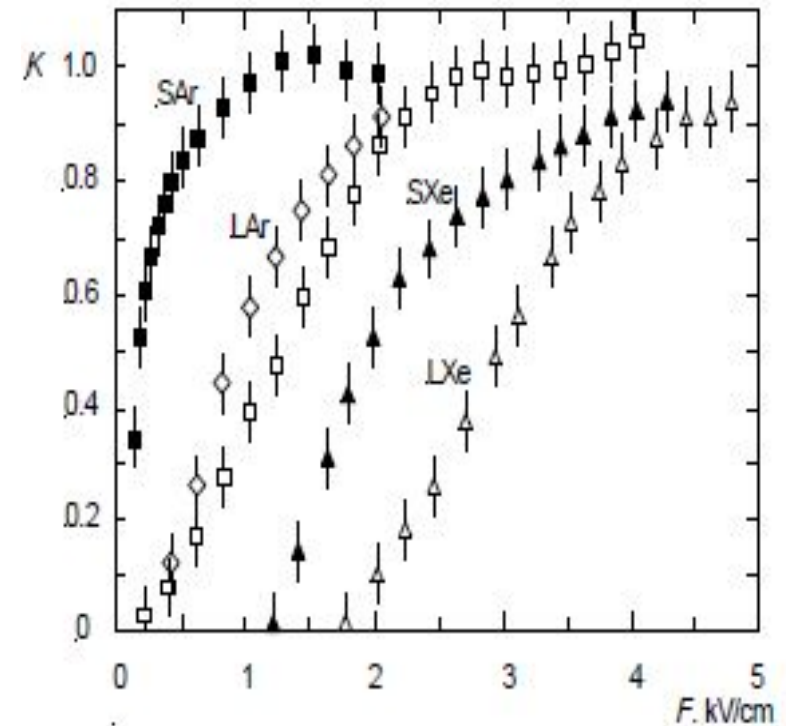


Эмиссия электронов из жидкого Хе

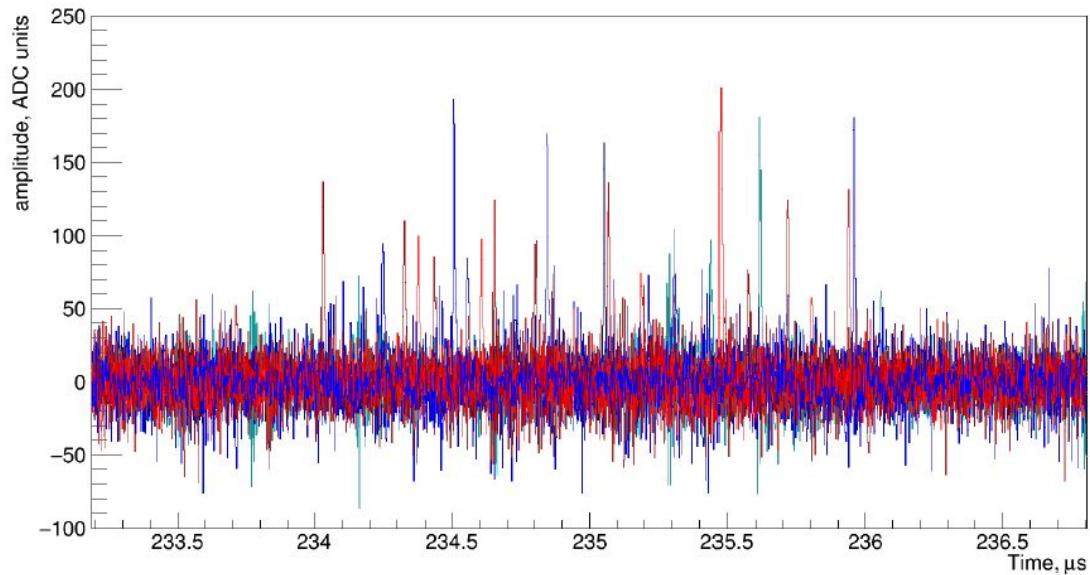
$$V_1(z) = V_0 - eF_1z + eA_1, z < 0$$

$$V_2(z) = -eF_2z + eA_2, z > 0$$

	$T, K$	$\varepsilon$	$\mu_0, cm^2/V/s$	$V_{o, eV}$	$F_c, kV/cm$	$F_o, kV/cm$	$t_e$
<i>Emitters of hot electrons</i>							
SNe	24		600	+1.1			
LCH <sub>4</sub>	100	1.66	400	-0.18	1.5	<4	
SCH <sub>4</sub>	77		~1000	0		<1.5	< 0.1 $\mu s$ (>1kV/cm)
LAr	84	1.51	475	-0.21	0.2	0.25	< 0.1 $\mu s$ (>0.3kV/cm)
SAr	83		1000	+0.3(6K)		0.1	< 0.1 $\mu s$ (>100V/cm)
LKr	116	1.66	1800	-0.4	0.08	1.6	< 0.1 $\mu s$ (>1.6kV/cm)
SKr	116		3700	-0.25(20K)		0.98	< 0.1 $\mu s$ (>1kV/cm)
LXe	161	1.93	2200	-0.61	0.05	1.75	< 0.1 $\mu s$ (>1.8kV/cm)
SXe	161		4500	-0.46 (40K)		1.25	< 0.1 $\mu s$ (>1.3kV/cm)



# Одноэлектронный сигнал в РЭД-100

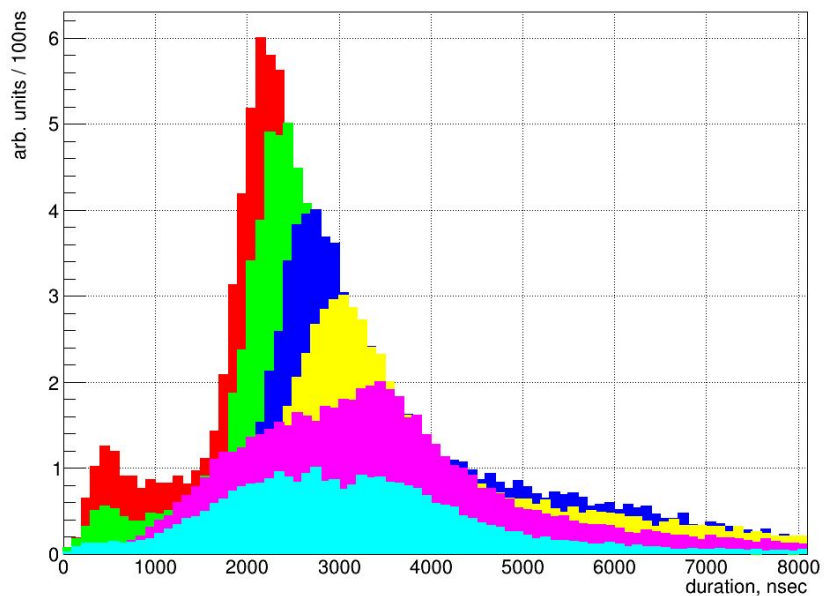


Осциллограмма  
SE (Single Electron)  
сигнала в РЭД-100

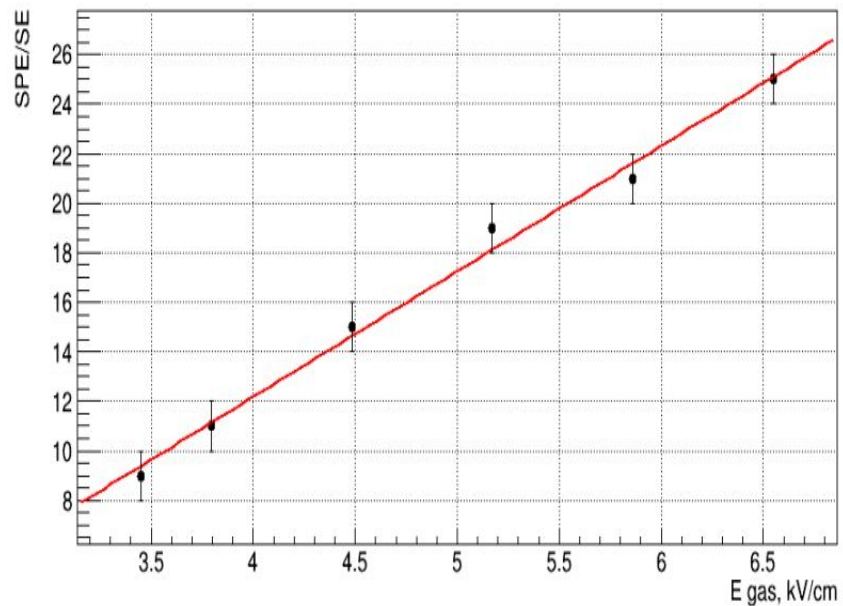
2 мкс



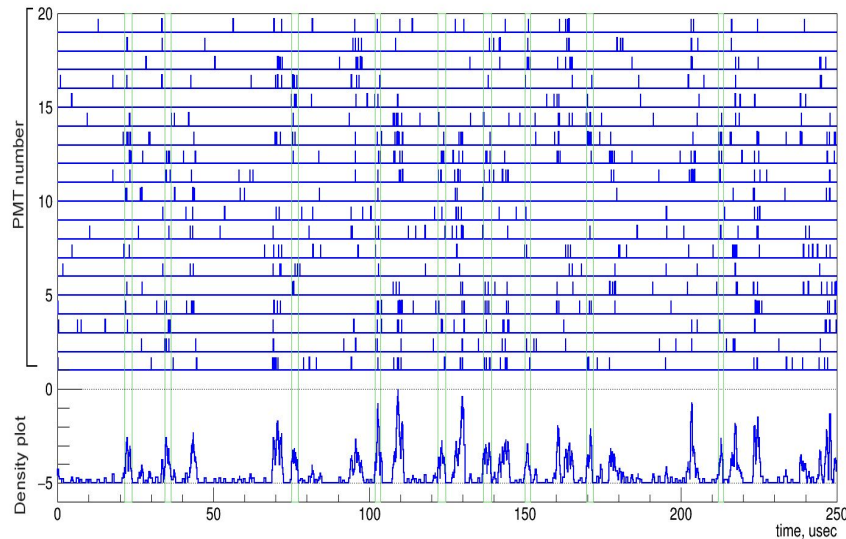
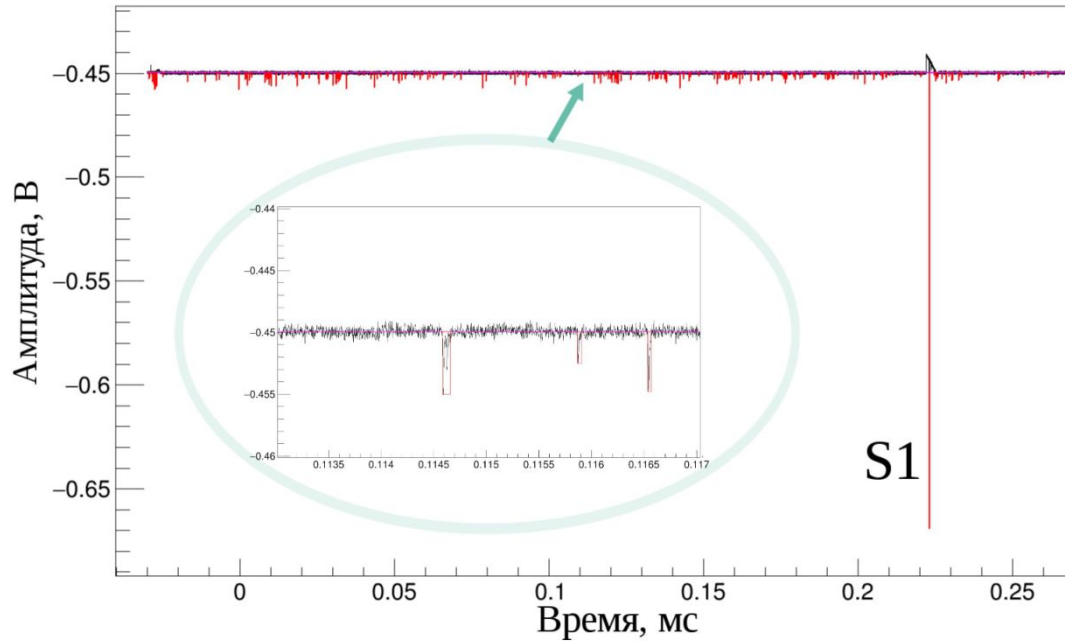
Длительность SE при  
полях  
3.5 – 6.6 кВ/см в зазоре



Удельный световой выход в  
центральной  
зоне электро-люминесцентного зазора



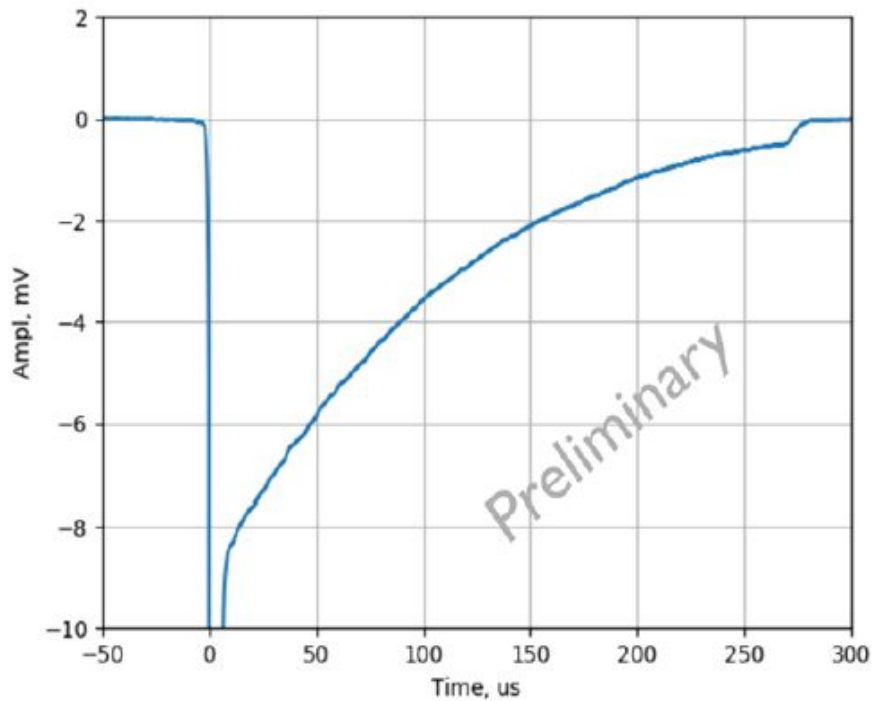
## Выделение одноэлектронных сигналов



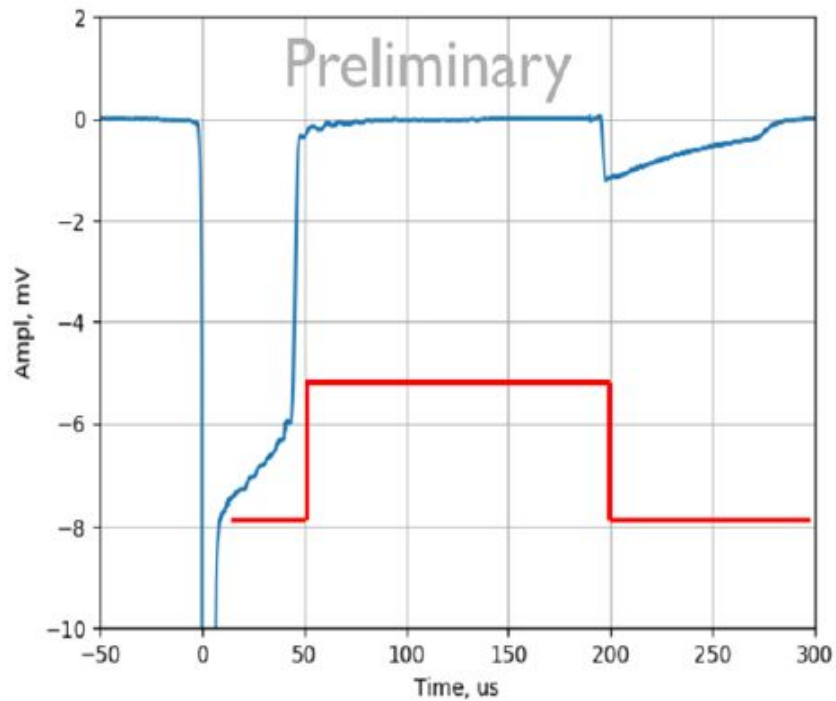
Первичный отбор SPE-импульсов происходит методом отбора по длительности и амплитуде. Прошедшие отбор импульсы нормируются на величину SPE, после чего для верхней матрицы ФЭУ строятся гистограммы плотности сигнала, на которых по превышению над нулевой линией выделяются кластеры, удовлетворяющие критериям характерной SE-длительности и величины.

# «Электронный затвор» блокирует мощные сигналы от космики

06 Feb 2019 20:10

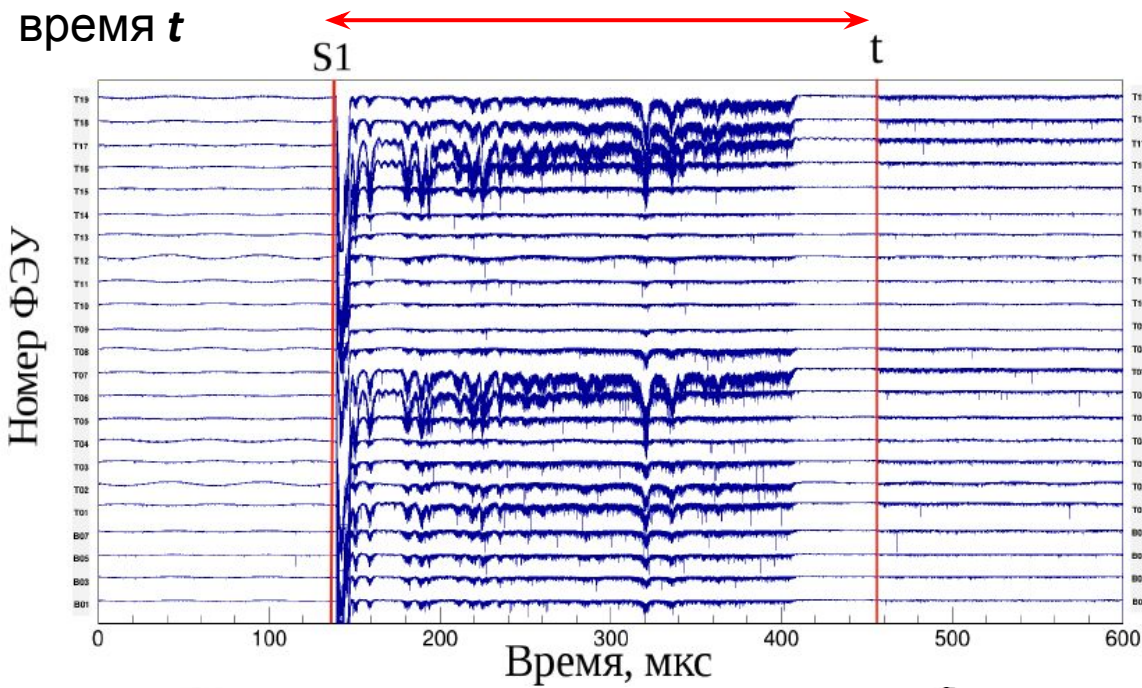


06 Feb 2019 14:12



Блокировка с помощью  
ЭЗ

# Частичная блокировка мюонного сигнала с помощью электронного затвора на время $t$

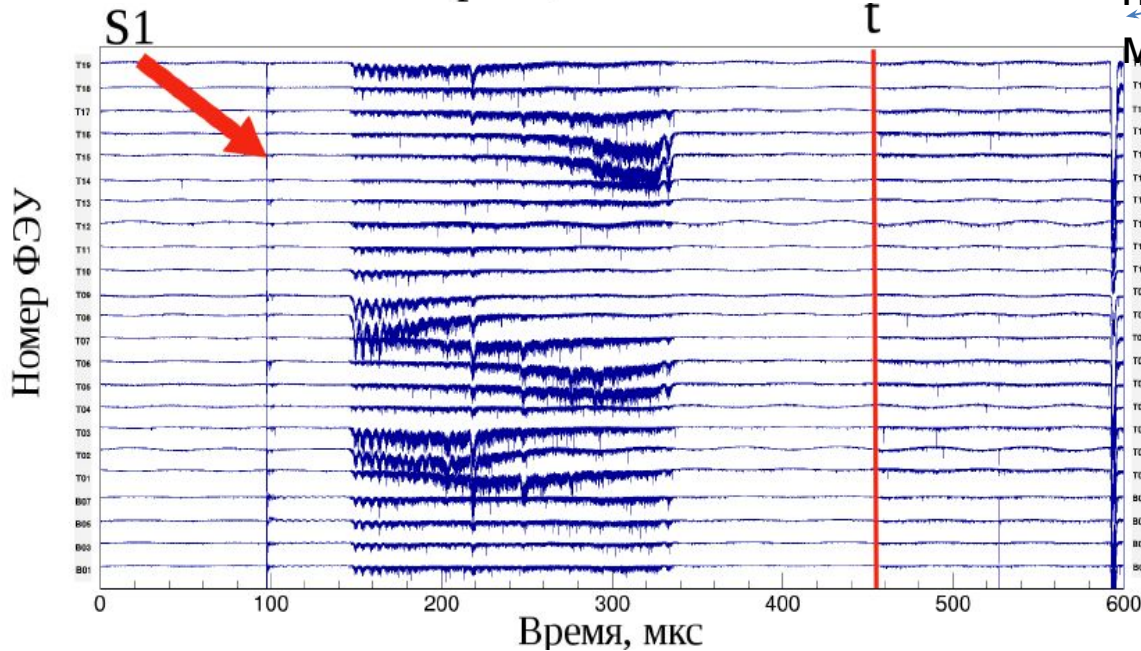


- Скорость счёта фоновых SE возрастает после прохождения мюона через детектор

- Появление SE коррелировано с треком в пространстве

- Скорость счёта возрастает как после «вертикальных», так и после «горизонтальных»

МЮОНОВ



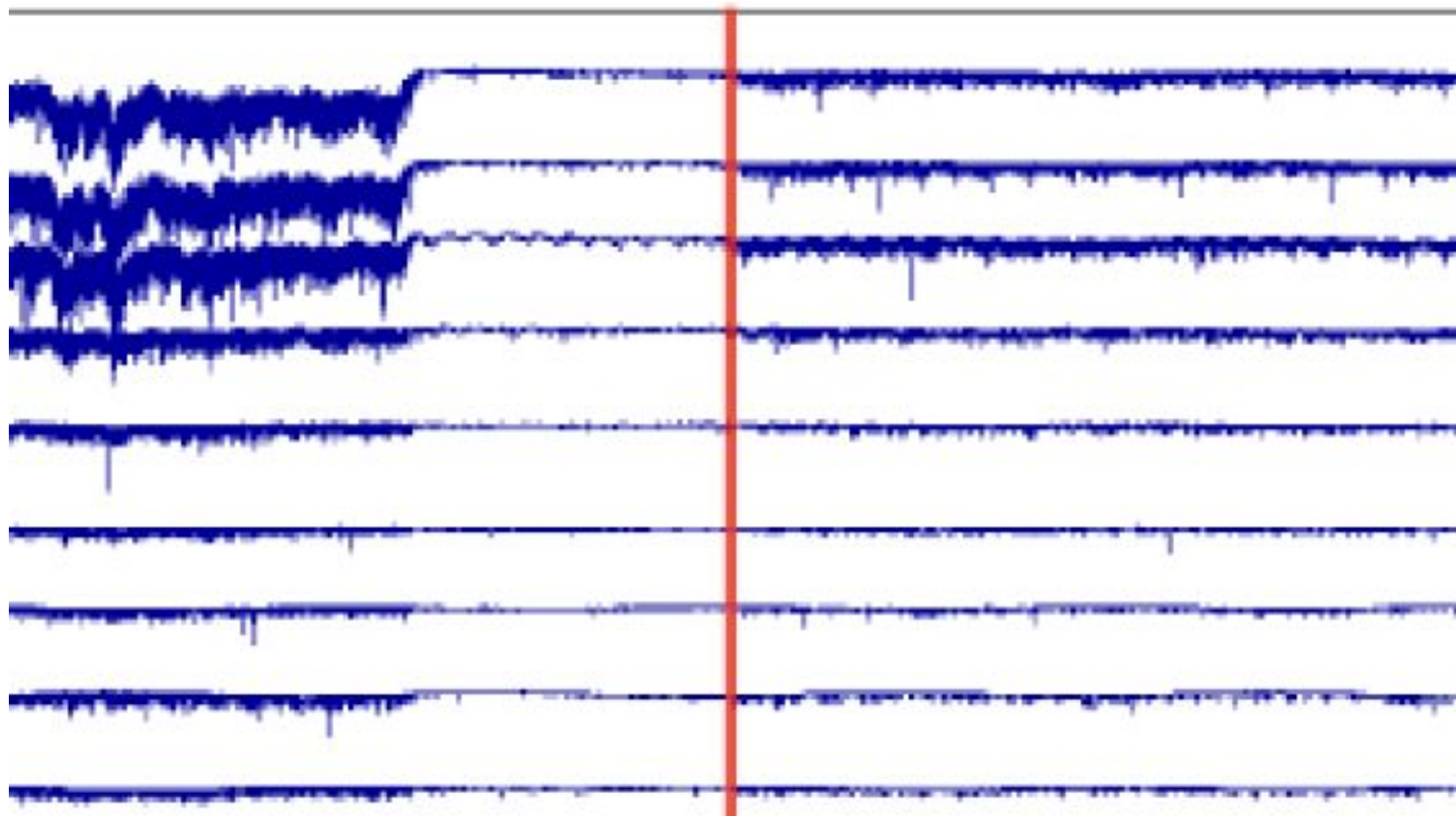
Затвор частично закрыт

Затвор полностью открыт

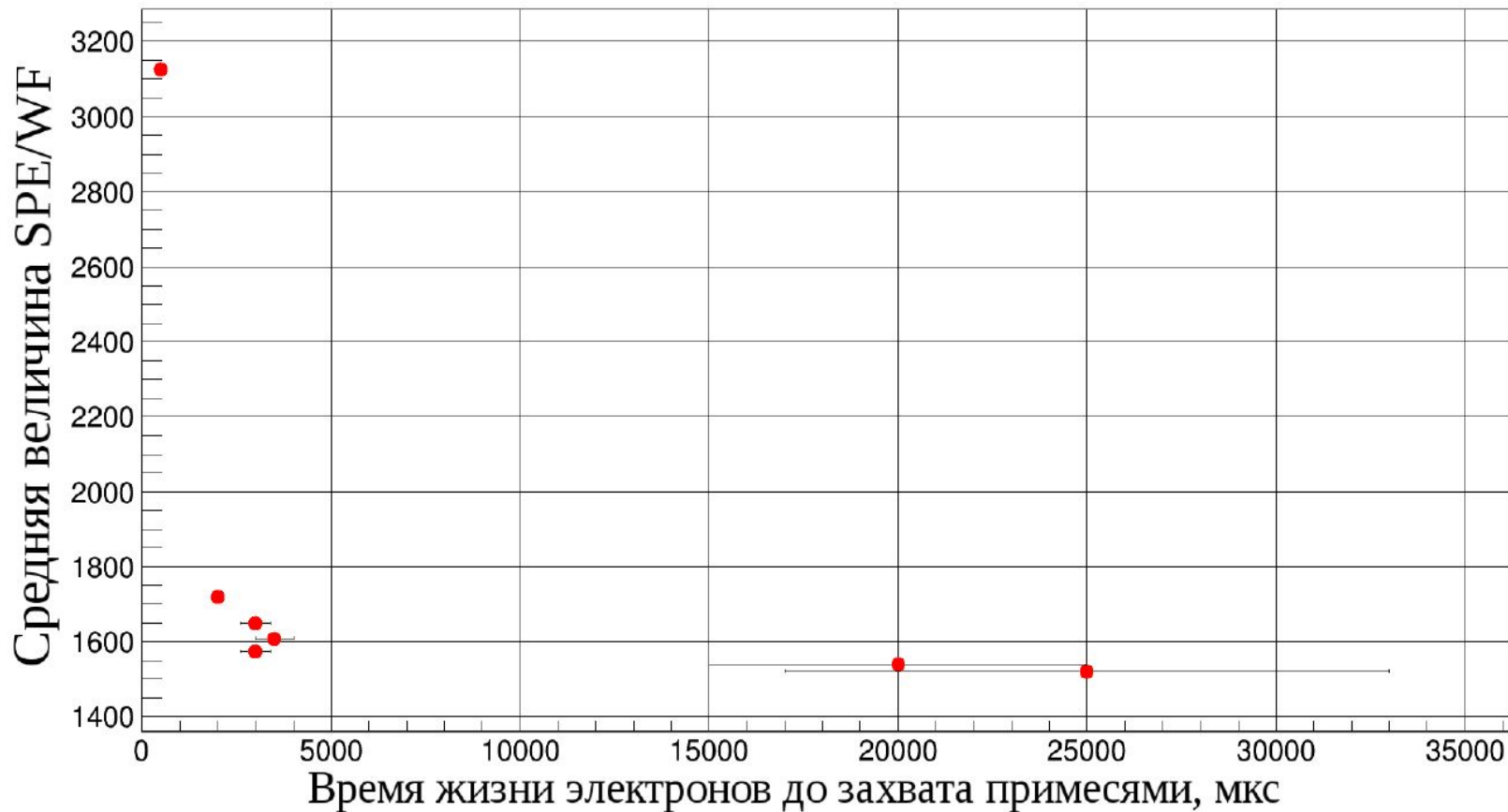
Мюонный сигнал

t

Фоновые SE



Наблюдается спад скорости счёта фоновых SE с увеличением чистоты Хе

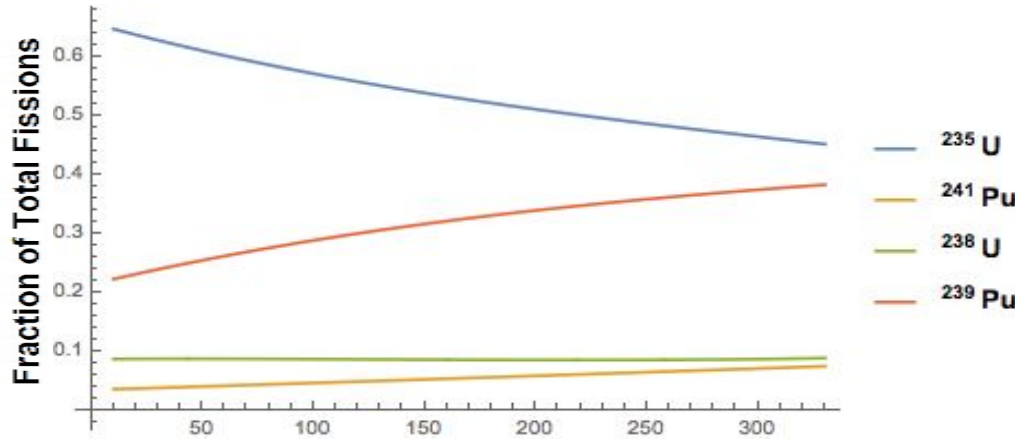


## Заключение

1. Коллаборацией РЭД (МИФИ+ИТЭФ/КИ) создан детектор РЭД-100 для регистрации УКРН на ядрах ксенона в условиях АЭС.
2. Разработана методика очистки массивных (~100 кг) образцов ксенона, обеспечивающая время жизни электронов до захвата ЭО примесями в несколько раз превышающее время собирания электронов из рабочего объёма ж.Хе толщиной 40см.
3. Обнаружено, что мюоны высоких энергий ( $> 1$  ГэВ) создают в ж.Хе массой ~100кг долгоживущие (~1 мсек) возбуждённые состояния, которые разряжаются путём испускания электронов.
4. Наблюдённый эффект существенно увеличивает фон SE событий, которые имитируют полезные сигналы от УКРН на ядрах ксенона, что диктует увеличение порога регистрации  $>4e$ .
5. Стоит задача идентифицировать природу долгоживущих возбуждённых состояний и понизить порог регистрации УКРН.

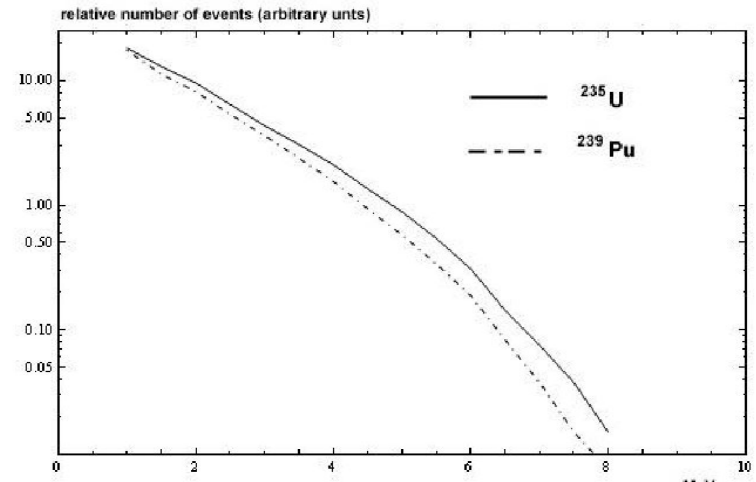
# Что же можно видеть детектором типа РЭД-100?

## Мониторинг состава топлива



201.7 МэВ/дел.  $^{235}\text{U}$

210.0 МэВ/дел.  $^{239}\text{Pu}$



$\tilde{\nu}$  энерг. спектр для  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$

Это приводит к уменьшению (при постоянной мощности)  $\tilde{\nu}$   
потока на  $\sim 0.15\%$  /10 сут  
и скорости счета на  $\sim 0.2\%$  /10 сут

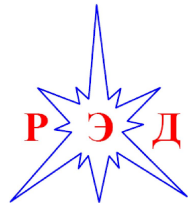
$N_e \geq 2$ :  $4 \cdot 10^5$  /10 сут => статистическая точность  $\sim 0.16\%$



**МОЖНО** видеть изменение потока  $\tilde{\nu}$  вследствие  
выгорания топлива в режиме реального времени



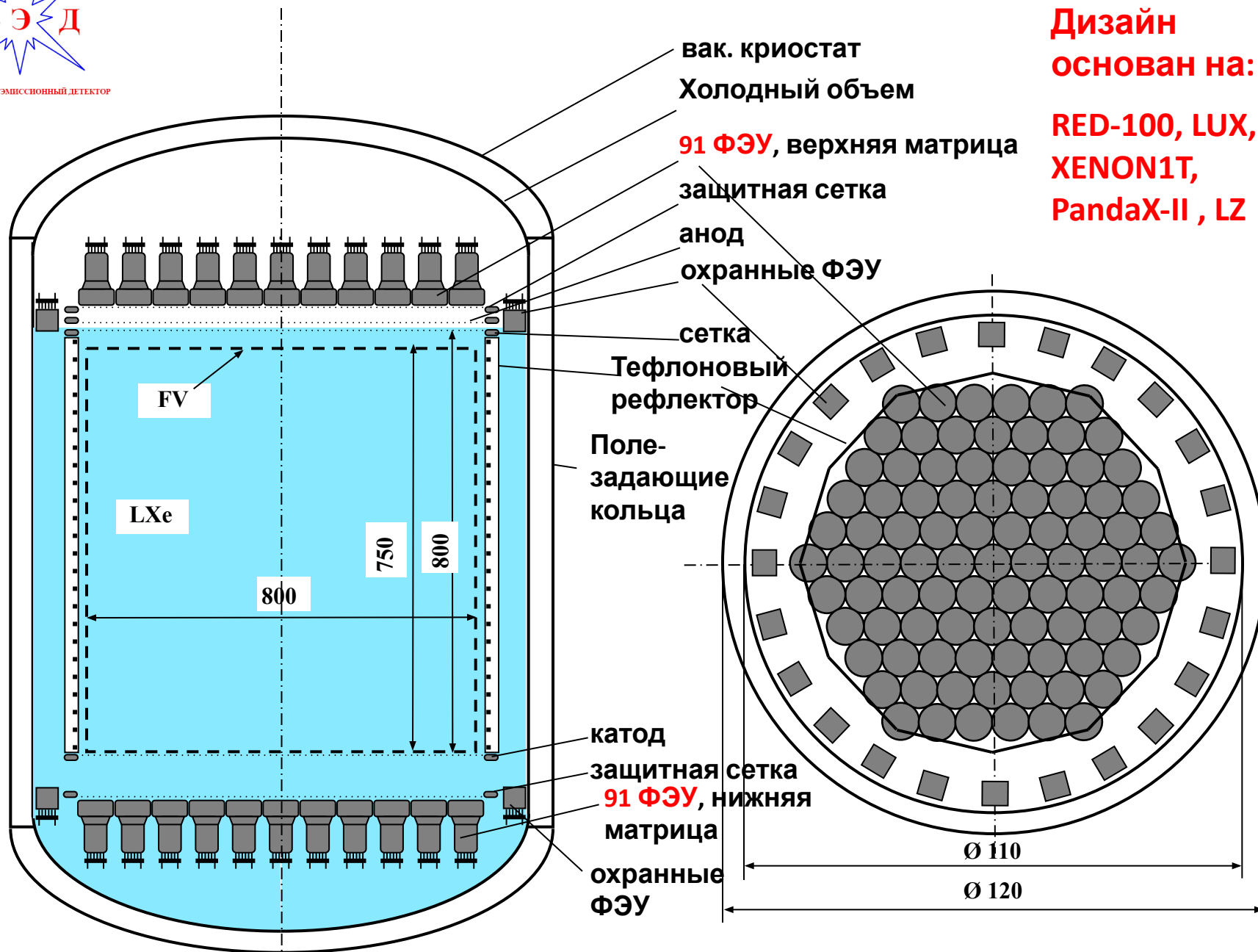
Посещение ЛЭЯФ НИЯУ МИФИ заместителем генерального директора МАГАТЭ по безопасности Теро Варьоранта, отметившем важность разработки РЭД-100 для международных программ нераспространения ядерного оружия (19 мая 2015 года)

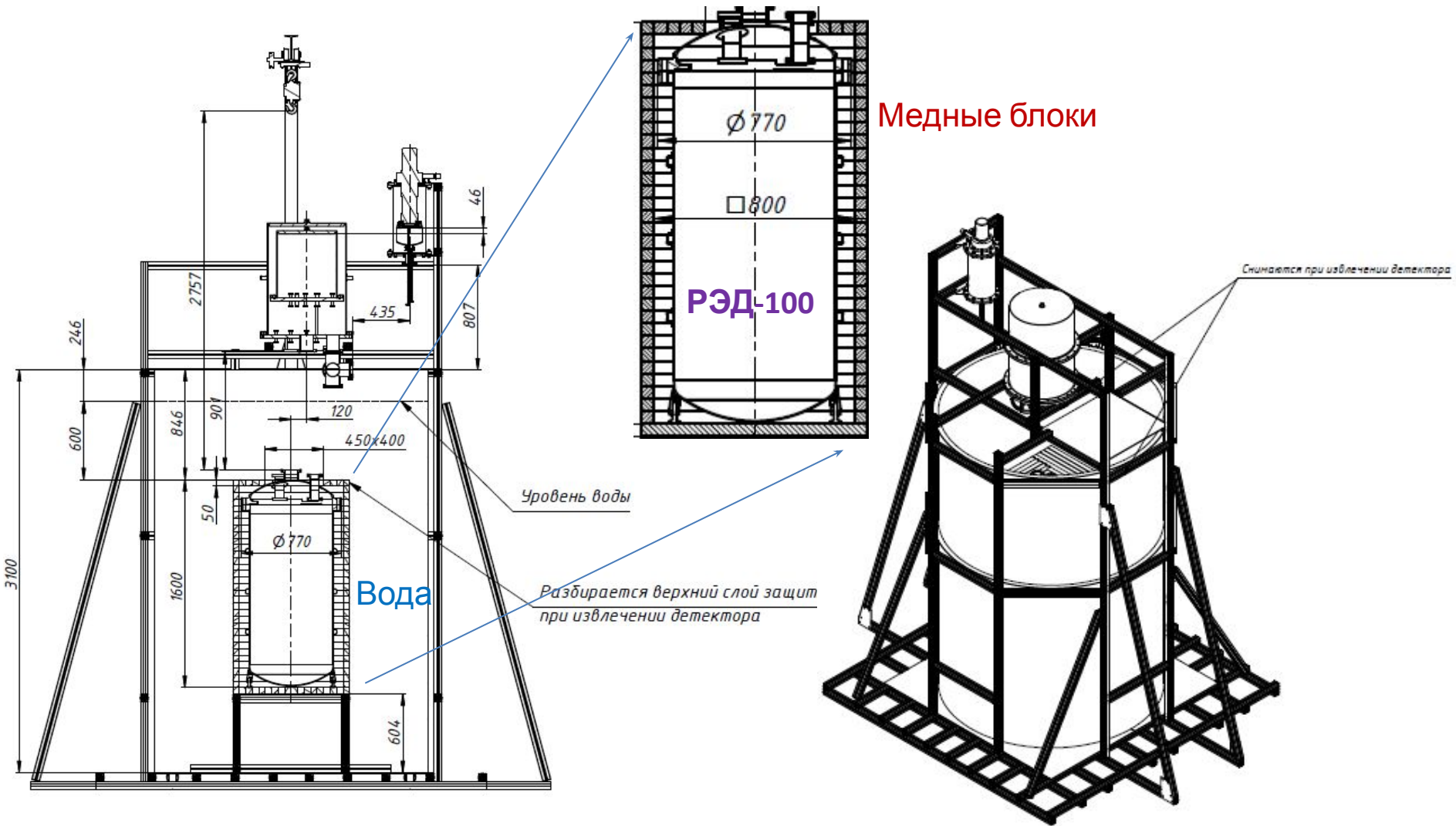


# РЭД-1000 (~1000 кг LXe в FV)

Дизайн  
основан на:

RED-100, LUX,  
XENON1T,  
PandaX-II, LZ





Сборка детектора РЭД-100 с пассивной защитой