

# Статус модернизации счетчиков АШИФ для детектора СНД

Овтин И.В.

Институт Ядерной Физики СО РАН, г. Новосибирск

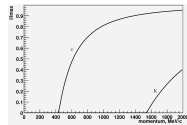
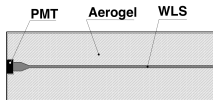
*I.V.Ovtin@inp.nsk.su*

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,  
посвященная 70-летию В.А. Рубакова,  
г. Москва,  
17-21 февраля 2025 г.

- 1 Метод идентификации частиц АШИФ
- 2 Модернизация счетчика АШИФ: ФЭУ с МКП → КФЭУ
- 3 Прототип счетчика АШИФ с КЭФУ
- 4 Калибровка КФЭУ
- 5 Испытание прототипа счетчика АШИФ с КЭФУ на пучке электронов
- 6 Параметры системы АШИФ с ФЭУ МКП детектора СНД
- 7 Сравнение качества разделения АШИФ-МКП/АШИФ-КФЭУ
- 8 Заключение

# Метод идентификации частиц АШИФ

АШИФ (Аэрогель, ШИфтер, Фотоумножитель)



$$P_{thr} = \frac{mc}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

Предложен в ИЯФ СО РАН (А. Onuchin et al. NIM A315, 1992, 517-520).

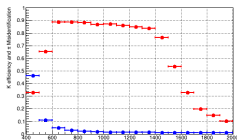
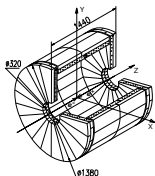
ПММА пластина с добавкой ВВQ работает как световод со спектросмещением.

- Метод позволяет значительно уменьшить площадь фотокатода ФЭУ, и соответственно стоимость системы.

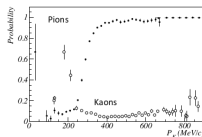
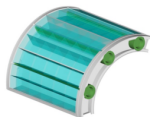
Системы АШИФ в ИЯФ СО РАН (Новосибирск):

КЕДР эксперимент на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-4М (2E=2÷10 ГэВ)

СНД эксперимент на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-2000 (2E=0.3÷2 ГэВ)



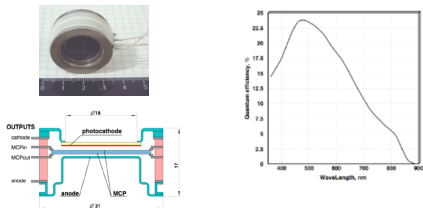
- 160 счетчиков (2 слоя),  $0.97 \times 4\pi$
- $n=1.05$  (1000 л)
- ФЭУ с МКП ( $\varnothing_{\text{ФК}}=18$  мм)



- 9 счетчиков (1 слой, 9 л),  $0.6 \times 4\pi$
- $n=1.13$  ( $\pi/K$  разделение,  $\sqrt{s} > 1$  ГэВ)
- $n=1.05$  ( $e/\pi$  разделение,  $\sqrt{s} < 1$  ГэВ)
- Толщина  $\sim 30$  мм
- ФЭУ с МКП ( $\varnothing_{\text{ФК}}=18$  мм)

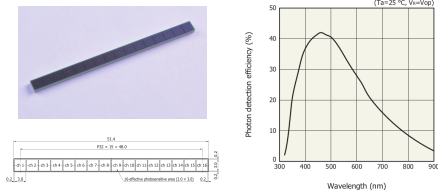
# Модернизация счетчика АШИФ: ФЭУ с МКП → КФЭУ

## ФЭУ с МКП



- Производитель: "Экран ФЭП" (Новосибирск)
- Окно из боросиликатного стекла
- Мультищелочной (Sb-Na-K-Cs) фотокатод
- МКП с диаметром канала 7 мкм
- Максимальное QE=23% при  $\lambda=500$  нм
- Коэффициент сбора фотоэлектронов  $\sim 0.6$
- $PDE=QE*CE=23*0.6\sim 14\%$
- Осевое магнитное поле
- Электропитание 3÷4 кВ

## MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) S13363-3050NE-16



- Производитель: "Hamamatsu"
- Эффективная светочувствительная площадь/канал 3×3 мм
- Количество пикселей/канал 3584
- PDE=40% при  $\lambda=500$  нм
- Магнитное поле любого направления
- Источник питания <100 В (тип.  $V_{BR}=53$  В)
- **Высокий уровень темновых шумов (0.5 Мкпс)**

Переход на КФЭУ (SiPM) должен увеличить количество обнаруживаемых фотоэлектронов.  
**8 ÷ 10 ф.э. ⇒ 20 ÷ 30 ф.э.**



# Прототип счетчика АШИФ с КЭФУ

Сегмент прототипа



Счетчик 1, Аэрогель n=1.05



Счетчик 2, Аэрогель n=1.12

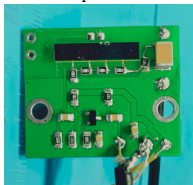


- Использовался сегмент ситемы АШИФ детектора СНД
- Сегмент состоит из трех черенковских счетчиков:
  - Использовались два счетчика из сегмента:
    - 1 счетчик: аэрогель с показателем преломления 1.05 и толщиной 30 мм
    - 2 счетчик: аэрогель с показателем преломления 1.12 и толщиной 25 мм (счетчик заполнен не полностью)
- Размеры счетчика:  $R=105\div 141$  мм, длина 260 мм, ширина 80 мм
- Аэрогель обернут в тефлон с коэффициентом отражения  $\sim 98\%$
- Массив из 5 КФЭУ снимает сигнал с WLS с размером  $17\times 3$  мм<sup>2</sup>

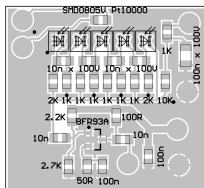
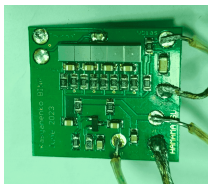
# Прототип счетчика АШИФ с КЭФУ

## Схемы подключения КФЭУ

Версия 1



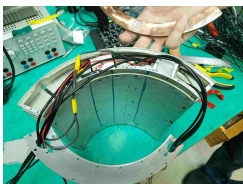
Версия 2



## Status and R&D of ASHIPH-SiPM option for PID, Int.J.Mod.Phys.A 39 (2024)

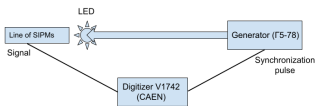
- B1: Последовательное соединение КФЭУ с делителем напряжения смещения;
- B2: Последовательное соединение КФЭУ с параллельным распределением напряжения смещения – сейчас основной вариант.

## Система термостабилизации



- Платиновый датчик температуры на плате электроники (SMD0805V Pt1000)
- Термоэлектрический Модуль Пельтье (30×30 мм)
- Воздушный медный радиатор

Позволяет термостабилизировать температуру в  $15^{\circ}\text{C}$  на КФЭУ, при внешней температуре  $45^{\circ}\text{C}$



Число ф.э. при малой засветке описывается распределением Пуассона:

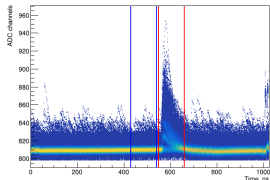
$$P(n, \mu) = \frac{e^{-\mu}}{n!} \mu^n, \quad \mu = -\ln P(0, \mu),$$

где  $n$  – число фотоэлектронов,  $\mu$  – среднее число фотоэлектронов за импульс.

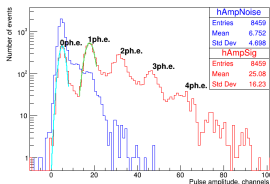
Вероятность отсутствия фотоэлектрона:

$$P(0, \mu) = \frac{N_{ped}^{sig}}{N^{sig}} \cdot \frac{N^{noise}}{N_{ped}^{noise}},$$

где  $N^{sig}$  – общее число событий в сигнальном спектре,  $N^{noise}$  – общее число событий в шумовом спектре,  $N_{ped}^{sig}$  – число событий в пьедестале сигнального спектра,  $N_{ped}^{noise}$  – число событий в пьедестале шумового спектра.



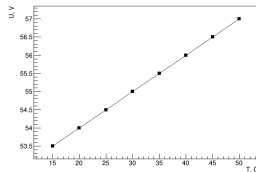
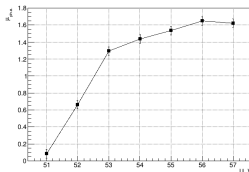
Распределение максимальной амплитуды импульса



$A_{1ph.e.}$  – из расстояния между пиками

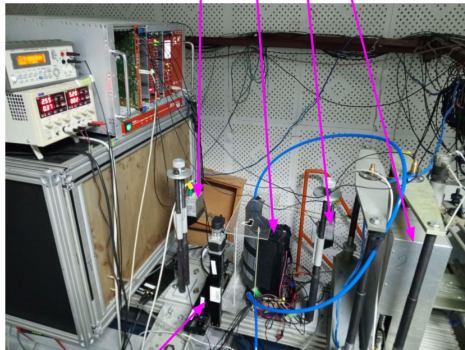
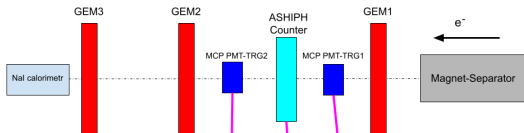
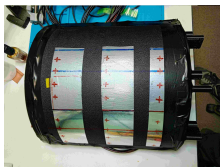
$$N_{ph.e.} = (A_{sig} - A_{ped}) / A_{1ph.e.}$$

$T = 15^\circ\text{C}$



# Испытание прототипа счетчика АШИФ с КЭФУ на пучке электронов

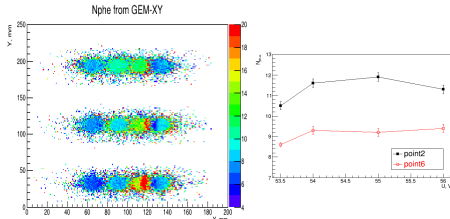
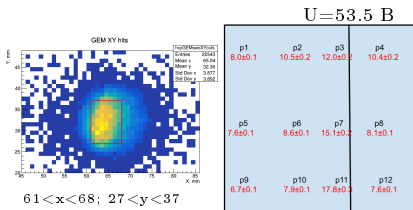
- Энергия электронов – 2.5 ГэВ;
- Трекингвая система основана на 3-х координатных GEM-детекторах ( $\sigma_x=70$  мкм,  $\sigma_y=200$  мкм) и NaI-калориметре;
- Триггер формируется из совпадения двух счетчиков на основе ФЭУ с МКП;
- Сигналы со счетчиков и прототипа оцифровываются V1742 CAEN;
- Набор производился в 12 различных геометрических областях счетчика, при температурах 15°C и 45°C, и при различных напряжениях смещения на КЭФУ. В каждой точке набиралось 50000 событий.



2D mover

## Прототип счетчика АШИФ с $n=1.05$ аэрогеля

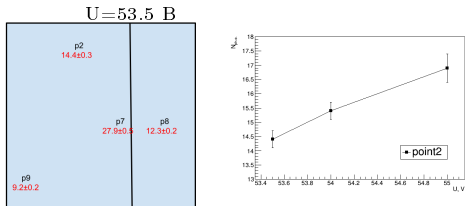
### Число фотоэлектронов в различных геометрических точках счетчика



- Среднее число фотоэлектронов на счетчик  $N_{ph.e.} \approx 8.6$  ( $(p2+p9)/2$ )
- Неоднородность светосбора составила  $\sim \pm 22\%$

## Прототип счетчика АШИФ с $n=1.12$ аэрогеля

- Прототип не полностью заполнен аэрогелем (до 30 мм), толщина составляет 25 мм
- АШИФ с ФЭУ МКП детектора СНД содержит аэрогель с  $n=1.13$



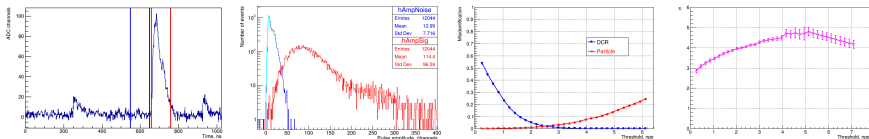
- Среднее число фотоэлектронов на счетчик  $N_{ph.e.} \approx 11.8$ 
  - Для аэрогеля с  $n=1.13$ , 30 мм:  $N_{ph.e.} \approx 11.8 \times 1.3 = 15.3$
- Неоднородность светосбора составила  $\sim \pm 22\%$

# Испытание прототипа счетчика АШИФ с КЭФУ на пучке электронов

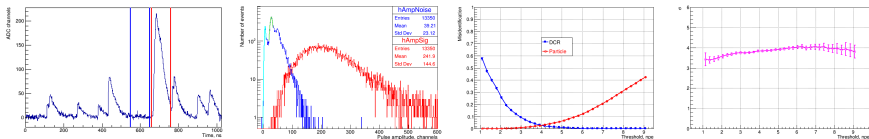
- Допороговая эффективность в основном определяется собственным DCR
  - Другие источники:
    - Черенковский свет от  $\delta$ -электронов в аэрогеле
    - Сцинтилляции в тефлоне
    - Черенковский свет в тефлоне

Прототип счетчика АШИФ с  $n=1.05$  аэрогеля

$T=15^{\circ}\text{C}$ ,  $U=53.5$  В, точка p2



$T=45^{\circ}\text{C}$ ,  $U=57$  В, точка p2



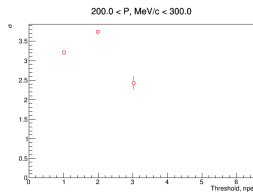
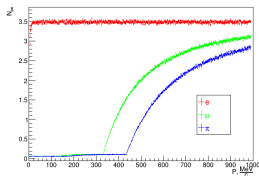
$$K[\sigma] = \sqrt{2} * (\text{erf}^{-1}(1 - 2\varepsilon_K) + \text{erf}^{-1}(1 - 2 * (1 - \varepsilon_\pi)))$$

## Результаты из статей описываются параметрическим моделированием

### Система с n=1.05 аэрогеля

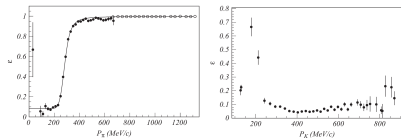
Test results of the threshold aerogel Cherenkov counter system with n=1.05 using electrons and muons at  $p < 500$  MeV/c, JINST 9 C08010, 2014

- Средний сигнал 3.5 ф.э.
- Допороговый сигнал  $\sim 3\%$



$e/\pi$  разделение

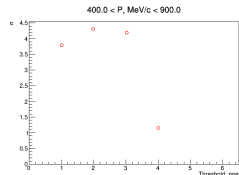
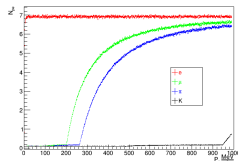
### Система с n=1.13 аэрогеля



$e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0, e^+e^- \rightarrow \mu\mu$

$e^+e^- \rightarrow K^+K^-$

Particle identification system based on dense aerogel, NIMA 732 (2013) 330–332



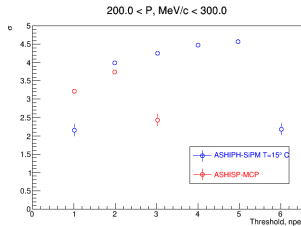
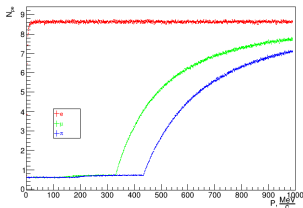
$\pi/K$  разделение

- Средний сигнал  $6 \div 8$  ф.э.
- Допороговый сигнал  $\sim 10\%$

# Сравнение качества разделения АШИФ-ФЭУ МКП и АШИФ-КФЭУ

## Прототип счетчика АШИФ с $n=1.05$ азрогеля

Среднее в точках р2 и р9



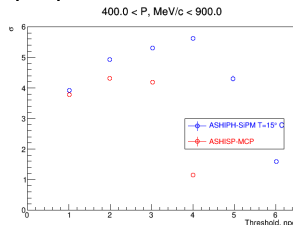
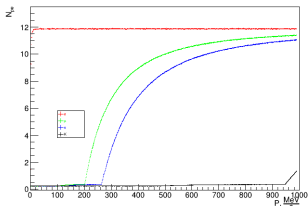
$e/\pi$  разделение

## Прототип счетчика АШИФ с $n=1.13$ азрогеля

Среднее в точках р2 и р9



$n = 1.12$



$\pi/K$  разделение



# Заключение

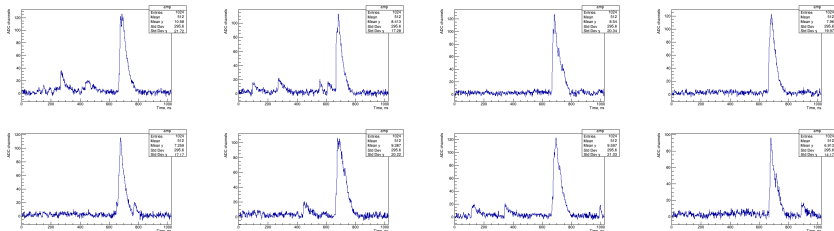
- Сконструирован прототип АШИФ-КФЭУ содержащий два счетчика с аэрогелем  $n=1.05$  и  $n=1.12$ , с системой термостабилизации на основе модулей Пельтье и воздушного радиатора
- Проведены испытания прототипа АШИФ-КФЭУ на электронном пучке в ИЯФ СО РАН:
  - Аэрогель  $n=1.05$ :
    - Среднее число зарегистрированных фотоэлектронов 8.6.
    - Неоднородность светосбора составляет  $\pm 22\%$ .
  - Аэрогель  $n=1.12$ :
    - Среднее число зарегистрированных фотоэлектронов 11.8.
    - Неоднородность светосбора составляет  $\pm 22\%$ .
- Представлено увеличения числа фотоэлектронов и качества разделения частиц между прототипом счетчика АШИФ-КФЭУ и счетчиком АШИФ-МКП детектора СНД:
  - Аэрогель  $n=1.05$ :
    - АШИФ с ФЭУ МКП,  $N_{ph.e.}=3.5$ .
    - $N_{ph.e.}(\text{АШИФ-КФЭУ})/N_{ph.e.}(\text{АШИФ-ФЭУ МКП}) \approx 2.5$
    - $3.7\sigma(\text{АШИФ-ФЭУ МКП}) \rightarrow 4.6\sigma(\text{АШИФ-КФЭУ}, T=15^\circ\text{C})$
  - Аэрогель  $n=1.13$ :
    - АШИФ-КФЭУ с  $n=1.13$ , 30 мм:  $N_{ph.e.} \approx 11.8 \times 1.3 = 15.3$
    - АШИФ с ФЭУ МКП,  $N_{ph.e.}=6 \div 8$ .
    - $N_{ph.e.}(\text{АШИФ-КФЭУ})/N_{ph.e.}(\text{АШИФ-ФЭУ МКП}) \approx 2.2$
    - $4.3\sigma(\text{АШИФ-ФЭУ МКП}) \rightarrow 5.6\sigma(\text{АШИФ-КФЭУ}, T=15^\circ\text{C})$
- Прототип счетчика АШИФ-КФЭУ имеет геометрию реального счетчика и может быть легко интегрирован в детектор СНД:
  - Были успешно проведены калибровки счетчика АШИФ-КФЭУ в электронном канале АШИФ-ФЭУ МКП детектора СНД.

Спасибо за внимание!

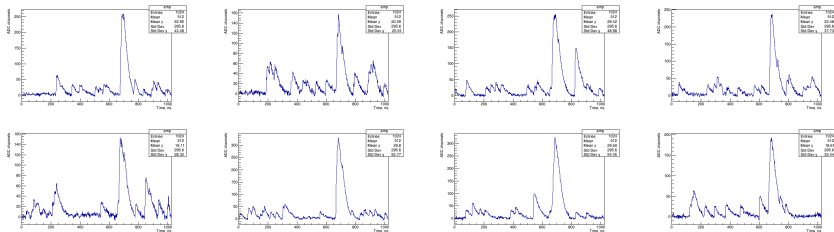
# BACKUP

# Испытание прототипа счетчика АШИФ с КЭФУ на пучке электронов

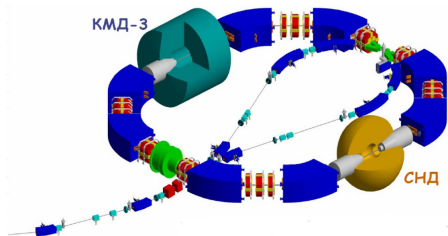
Примеры записанных осциллограмм при  $T=15^{\circ}\text{C}$



Примеры записанных осциллограмм при  $T=45^{\circ}\text{C}$

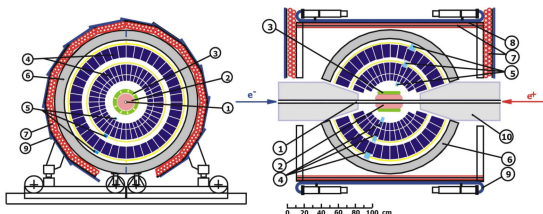


## Комплекс ВЭПП-2000



- $e^+e^-$  коллайдер
- Энергия 160-1000 МэВ
- Светимость  $4 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
- Детекторы: СНД и КМД-3

## Сферический нейтральный детектор (СНД)

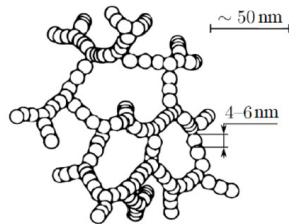


- 1 вакуумная камера
- 2 трековая система
- 3 черенковские счётчики
- 4 кристаллы NaI(Tl)
- 5 вакуумные фототриоды
- 6 железный поглотитель
- 7 пропорциональные трубки
- 9 сцинтилляционные счётчики
- 10 соленоиды ВЭПП-2000

# Аэрогель

S.S.Kistler, "Coherent Expanded Aerogels and Jellies", Nature, 1931, vol. 127, p. 741.

- Аэрогель – пористый диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) с показателем преломления в промежутке между газами, с одной стороны, и твердыми и жидкими веществами, с другой
- Основные производители для ФВЭ: ИК СО РАН (Новосибирск) и Matsushita (Япония)
- Показатель преломления  $n^2 = 1 + 0.438 \cdot \rho$ 
  - $n=1.006\dots 1.070$  – синтез
  - $n=1.070\dots 1.130$  – спекание + синтез
- Важный параметр – длина рассеяния света
  - $L_{sc} \approx 5$  см на 400 нм,  $L_{sc} \sim \lambda^4$
- Размер блоков аэрогеля до  $200 \times 200 \times 50$  мм (ИК СО РАН)

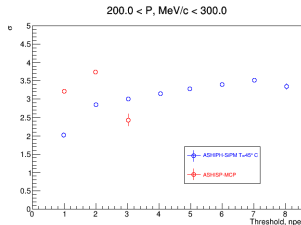
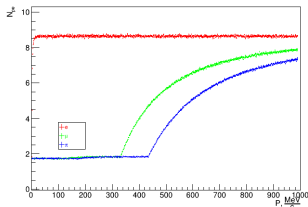


$\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}(1+5\%)$

# Сравнение качества разделения АШИФ-ФЭУ МКП и АШИФ-КФЭУ

## Прототип счетчика АШИФ с $n=1.05$ азрогеля

Среднее в точках р2 и р9



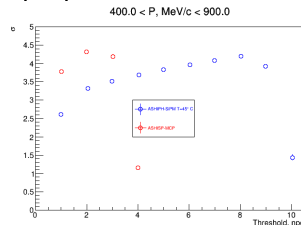
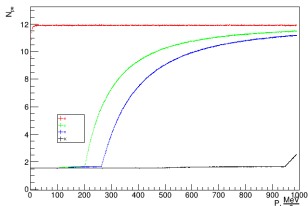
$e/\pi$  разделение

## Прототип счетчика АШИФ с $n=1.13$ азрогеля

Среднее в точках р2 и р9

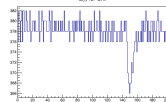
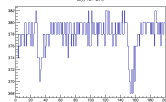
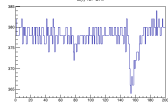
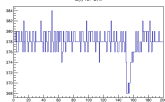
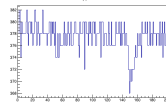
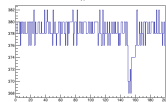
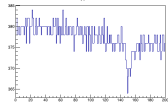
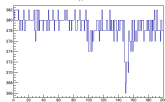
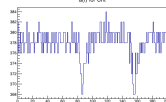
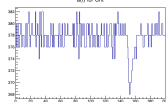
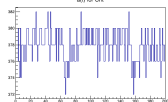
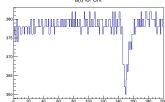
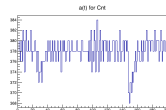
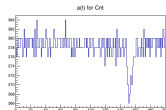
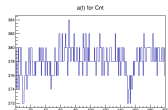
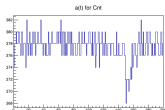


$n = 1.12$



$\pi/K$  разделение

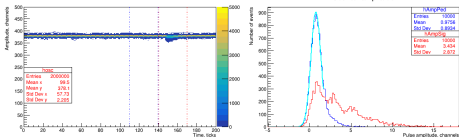
Примеры записанных осциллограмм:  $T=15^{\circ}\text{C}$ ,  $U=54\text{ В}$ , уровень генератора 2.5-12.5%



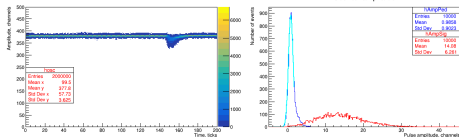


Набранные данные при  $T=15^{\circ}\text{C}$ ,  $U=54\text{ V}$

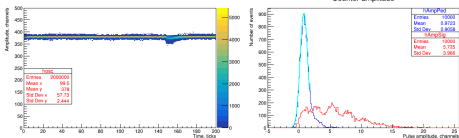
Уровень генератора: 2.5-15% ( $N_{phe}=0.71$ )



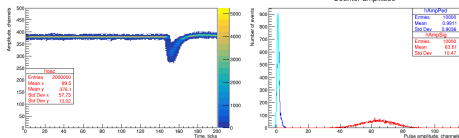
Уровень генератора: 2.5-7.5% ( $N_{phe}=3.57$ )



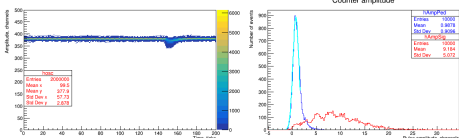
Уровень генератора: 2.5-12.5% ( $N_{phe}=1.33$ )



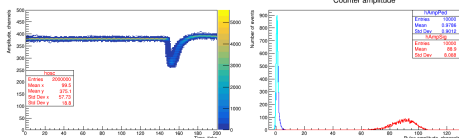
Уровень генератора: 3.2-20% ( $N_{phe}=16.89$ )



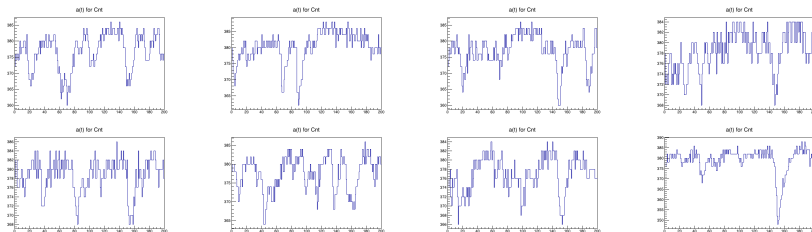
Уровень генератора: 2.5-10% ( $N_{phe}=2.25$ )



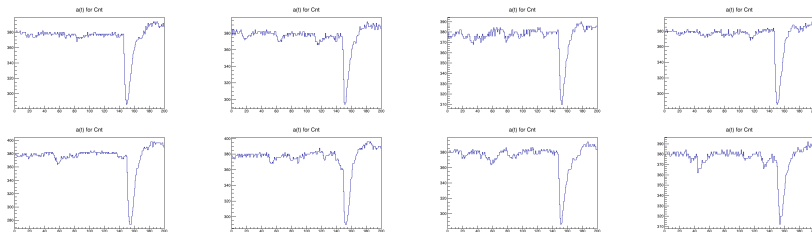
Уровень генератора: 3.2-15% ( $N_{phe}=23.69$ )



Примеры записанных осциллограмм:  $T=45^{\circ}\text{C}$ ,  $U=57\text{ В}$ , уровень генератора 2.5-12.5%

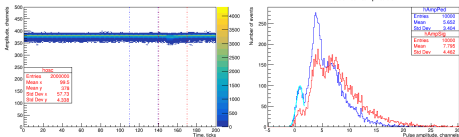


Примеры записанных осциллограмм:  $T=45^{\circ}\text{C}$ ,  $U=57\text{ В}$ , уровень генератора 3.2-20%

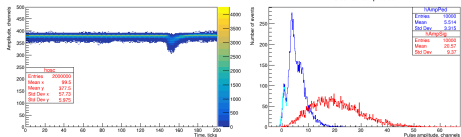


Набранные данные при  $T=45^{\circ}\text{C}$ ,  $U=57\text{ V}$

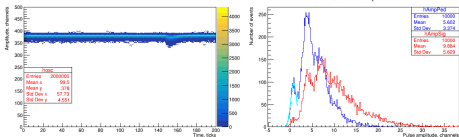
Уровень генератора: 2.5-15% ( $N_{phe}=0.72$ )



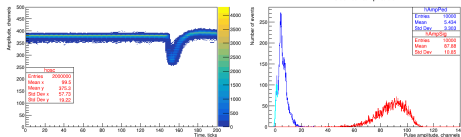
Уровень генератора: 2.5-7.5% ( $N_{phe}=2.92$ )



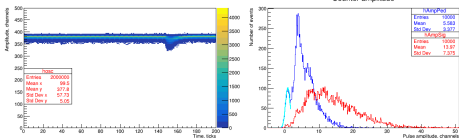
Уровень генератора: 2.5-12.5% ( $N_{phe}=1.34$ )



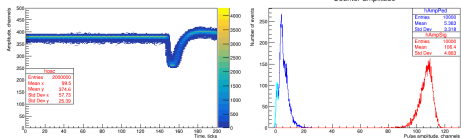
Уровень генератора: 3.2-20% ( $N_{phe}=12.89$ )



Уровень генератора: 2.5-10% ( $N_{phe}=1.95$ )

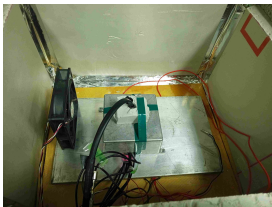
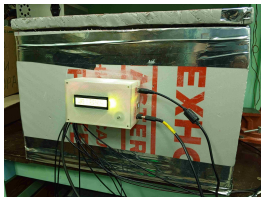


Уровень генератора: 3.2-15% ( $N_{phe}=15.65$ )

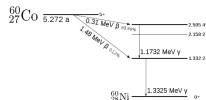
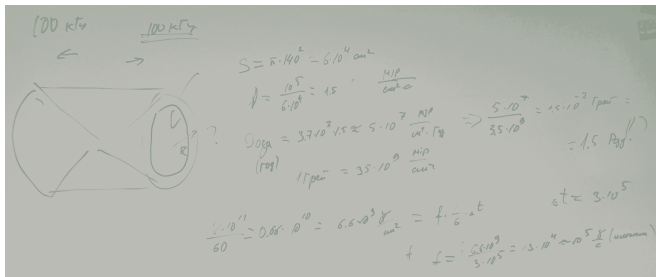


# Температурные и радиационные испытания электроники КФЭУ

- Температура внутри детектора СНД  $\sim 45^\circ\text{C}$
- Имитируются температурные условия в термобоксе

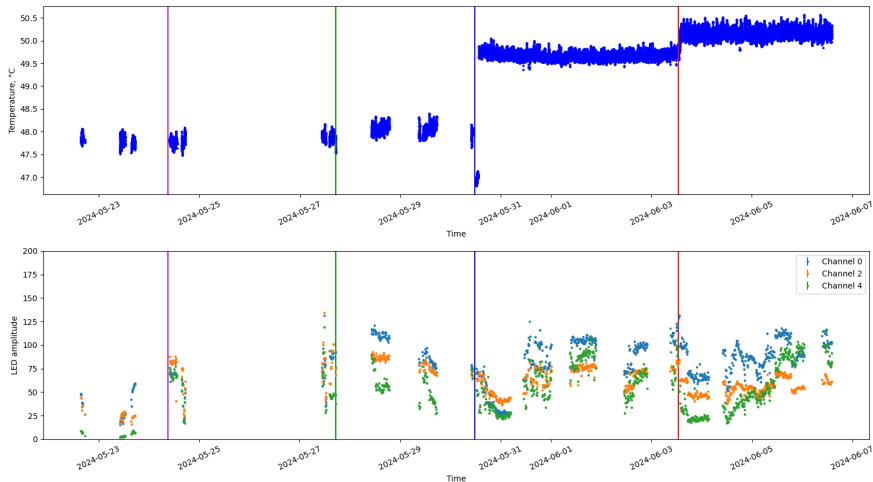


## Оценка радиационной загрузки



# Температурные и радиационные испытания электроники КФЭУ

При температуре  $\sim 50^{\circ}\text{C}$  платы электроники находились 212 часов  $\sim 8.8$  суток;  
– из них 72 часа одна плата электроники облучалась изотопом  $^{60}\text{Co}$



Проведенные калибровки КФЭУ (сравнение уровня сигнала с реперным КЭФУ) до и после тестов указывают на отсутствие деградации