

# Счетчик АШИФ с Кремниевыми ФЭУ для детектора СНД

Овтин И.В.

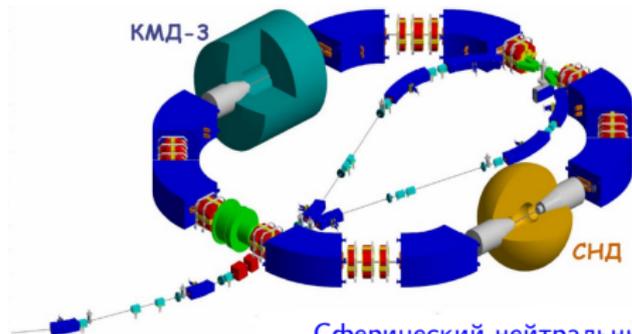
Институт Ядерной Физики СО РАН, г. Новосибирск

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

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,  
г. Новосибирск,  
10-13 марта 2026 г.

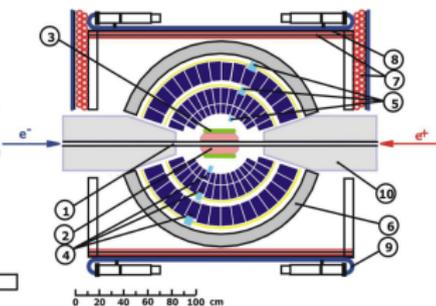
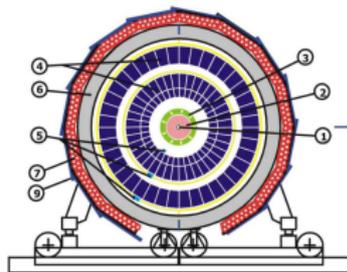
- 1 Детектор СНД на ВЭПП-2000
- 2 Метод идентификации частиц АШИФ
- 3 Модернизация счетчика АШИФ: ФЭУ с МКП → КФЭУ
- 4 Прототип счетчика АШИФ с КФЭУ
- 5 Калибровка КФЭУ
- 6 Испытание прототипа счетчика АШИФ с КФЭУ на пучке электронов
- 7 Параметры системы АШИФ с ФЭУ МКП детектора СНД
- 8 Сравнение качества разделения АШИФ с ФЭУ МКП и АШИФ с КФЭУ
- 9 Макет с КФЭУ внутри детектора СНД
- 10 Заключение

## 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)

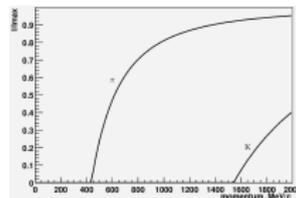
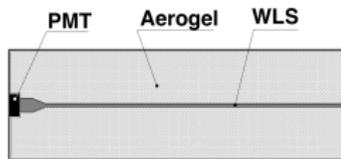


- 1 вакуумная камера
- 2 трековая система
- 3 черенковские счётчики
- 4 кристаллы NaI(Tl)
- 5 вакуумные фототриоды
- 6 железный поглотитель
- 7 пропорциональные трубки
- 8,9 сцинтилляционные счётчики
- 10 соленоиды ВЭПП-2000

Модернизация системы идентификации на основе аэрогелевых черенковских счетчиков (АЧС) выполненная по методу АШИФ

# 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).

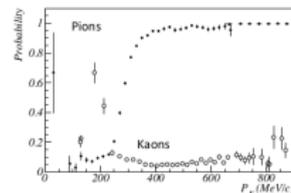
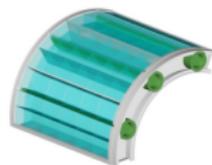
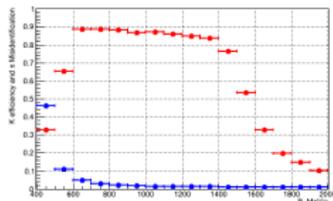
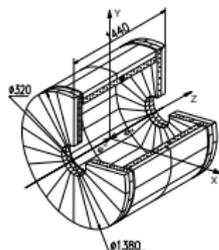
ПММА пластина с добавкой ВВQ работает как световод со смещением спектра.

- 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)

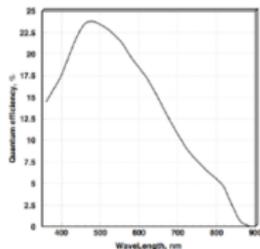
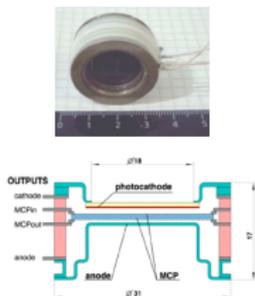


- 160 счетчиков (2 слоя),  $0.97 \times 4\pi$
- $n=1.05$  (1000 л)
- Толщина 1 слоя  $\sim 70$  мм
- ФЭУ с МКП ( $\varnothing$ ФК=18 мм)

- 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 ( $\varnothing$ ФК=18 мм)

# Модернизация счетчика АШИФ: ФЭУ с МКП → КФЭУ

## ФЭУ с МКП

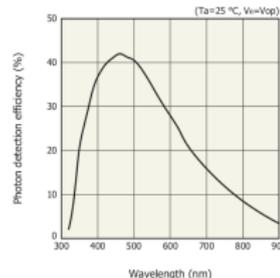


- Производитель: "Экран ФЭП" (Новосибирск)
- Окно из боросиликатного стекла
- Мультищелочной (Sb-Na-K-Cs) фотокатод
- МКП с диаметром канала 7 мкм
- Максимальное QE=23% при  $\lambda=500$  нм
- Коэффициент сбора фотоэлектронов  $\sim 0.6$
- $PDE=QE*CE=23*0.6 \approx 14\%$
- Осевое магнитное поле
- Электропитание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

Переход на КФЭУ (SiPM) должен увеличить количество обнаруживаемых фотоэлектронов:  
 $6 \div 8 \text{ ф.э.} \Rightarrow 15 \div 20 \text{ ф.э.}$

Улучшение качества разделения частиц!

## 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 (55 кГц/мм<sup>2</sup>)

# Прототип счетчика АШИФ с КФЭУ

Сегмент прототипа



Счетчик 1, Аэрогель  $n=1.05$



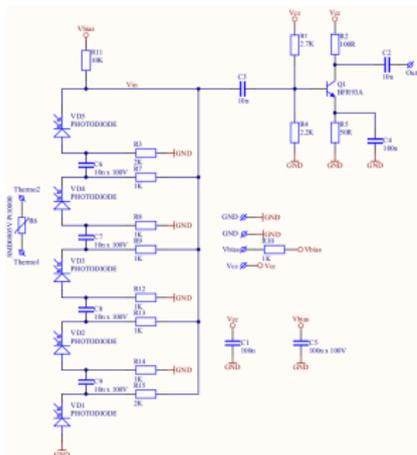
Счетчик 2, Аэрогель  $n=1.12$



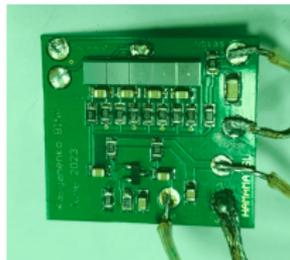
- Использовался сегмент системы АШИФ с ФЭУ МКП детектора СНД
- Сегмент состоит из трех черенковских счетчиков:
  - ▶ Использовались два счетчика из сегмента:
    - ★ 1 счетчик: аэрогель с показателем преломления 1.05 и толщиной 30 мм
    - ★ 2 счетчик: аэрогель с показателем преломления 1.12 и толщиной 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 КФЭУ

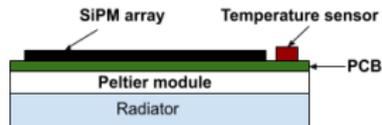
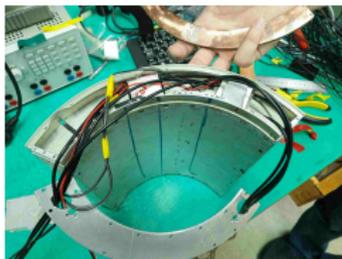
## Схема подключения КФЭУ



- Последовательное соединение КФЭУ с параллельным распределением напряжения смещения



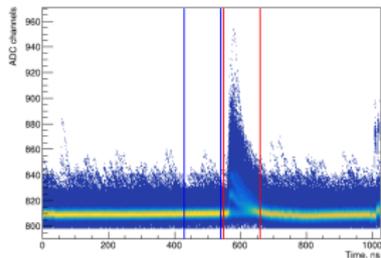
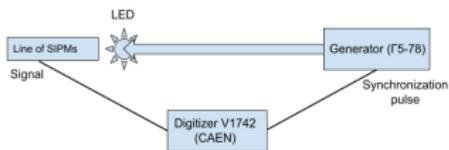
## Система термостабилизации



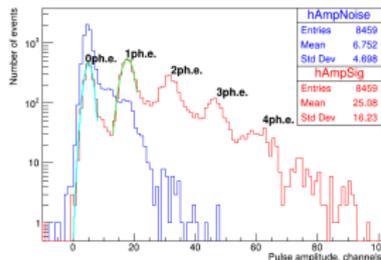
- Платиновый датчик температуры на плате электроники (SMD0805V Pt1000)
- Термоэлектрический Модуль Пельтье (30×30 мм)
- Воздушный медный радиатор

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

- точка росы в июне  $11^{\circ}\text{C}$



Распределение максимальной амплитуды импульса



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

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

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

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

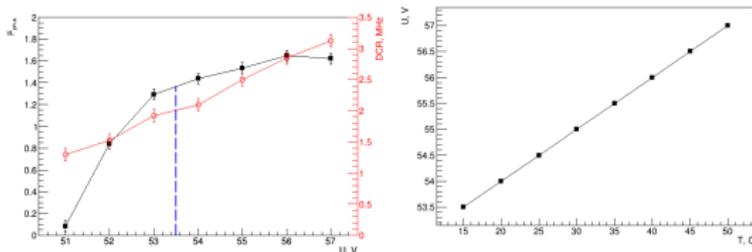
где  $n$  – число фотоэлектронов,  $\mu$  – среднее число фотоэлектронов за импульс.

Вероятность отсутствия фотоэлектрона:

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

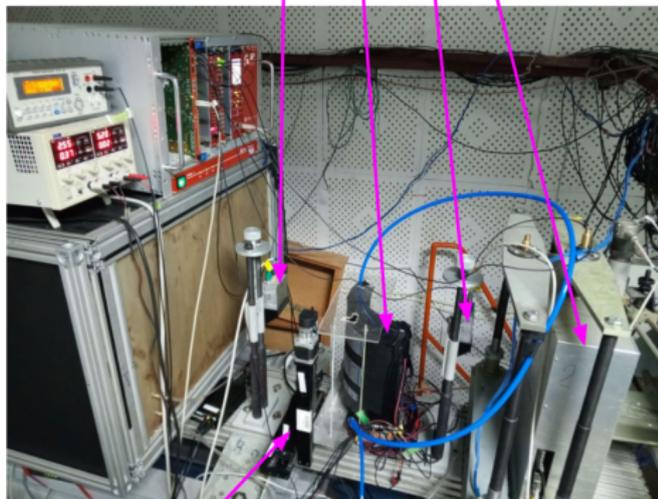
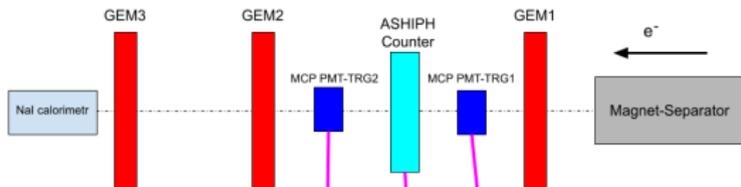
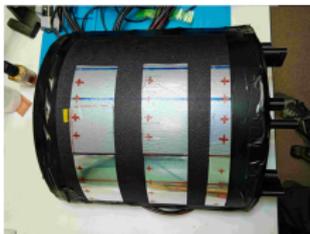
где  $N^{sig}$  – общее число событий в сигнальном спектре,  $N^{noise}$  – общее число событий в шумовом спектре,  $N_{ped}^{sig}$  – число событий в пьедестале сигнального спектра,  $N_{ped}^{noise}$  – число событий в пьедестале шумового спектра.

$T = 15^\circ C$



# Испытание прототипа счетчика АШИФ с КФЭУ на пучке электронов

- Энергия электронов – 2.5 ГэВ;
- Трекинг 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 (1 В, 12 бит, 1 ГГц);
- Набор производился в 12 различных геометрических областях счетчика, при температуре 15°C. В каждой точке набиралось 50000 событий.



2D mover



# Испытание прототипа счетчика АШИФ с КЭФУ на пучке электронов

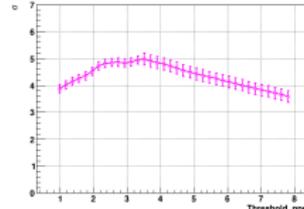
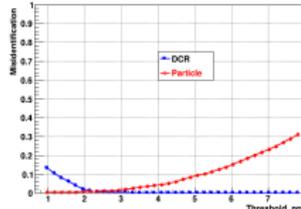
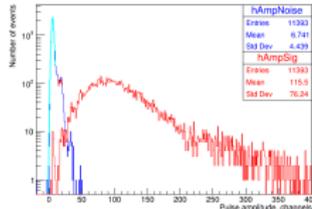
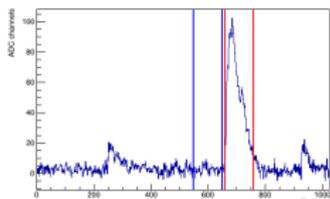
● Допороговая эффективность в основном определяется собственным DCR КЭФУ

▶ Другие источники:

- ★ Черенковский свет от  $\delta$ -электронов в аэрогеле
- ★ Сцинтилляции в тефлоне
- ★ Черенковский свет в тефлоне

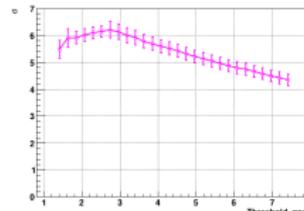
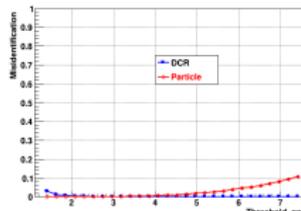
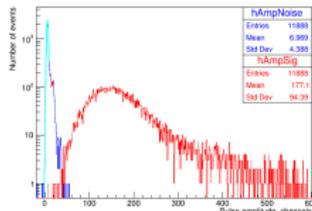
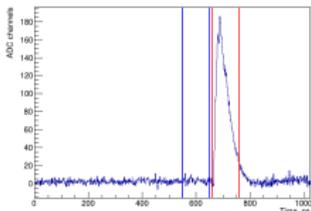
Прототип счетчика АШИФ с  $n=1.05$  аэрогеля

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



Прототип счетчика АШИФ с  $n=1.12$  аэрогеля

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

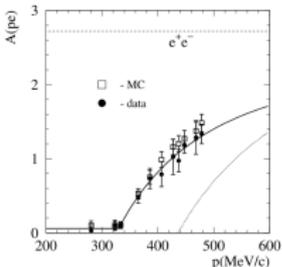


$$K[\sigma] = \sqrt{2} \cdot (\text{erf}^{-1}(1 - 2\varepsilon_1) + \text{erf}^{-1}(1 - 2 \cdot (1 - \varepsilon_2))),$$

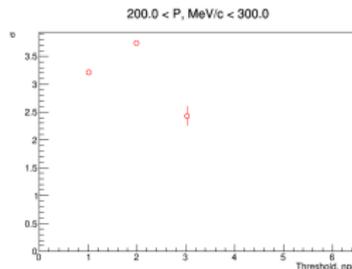
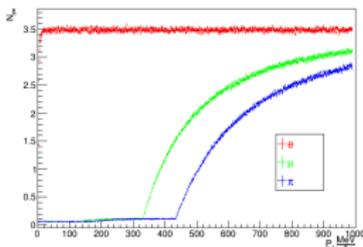
$\varepsilon_1 = N_{sub}^{thr.} / N_{sub}^{tot.}$  – допороговая эффективность,  $\varepsilon_2 = 1 - N_{particle}^{thr.} / N_{particle}^{tot.}$  – эффективность регистрации частицы

Результаты из статей описываются параметрическим моделированием

## Система с n=1.05 аэрогеля



$$\mu = \mu_0 + \mu_{max} \cdot \frac{p^2 - p_{th}^2}{p^2}$$

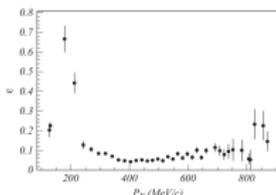
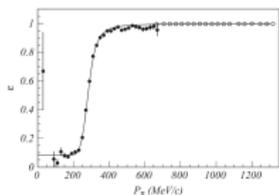


$e/\pi$  разделение

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  $\sim 3\%$

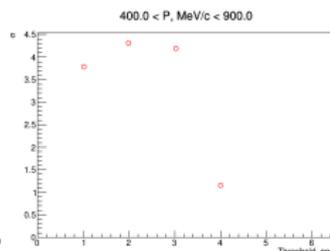
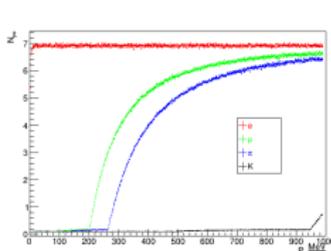
## Система с n=1.13 аэрогеля



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

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

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



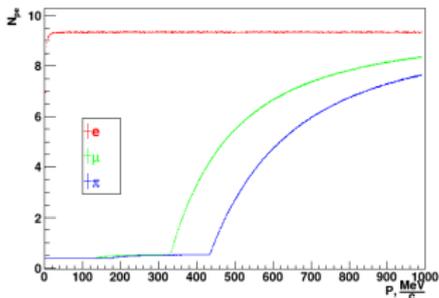
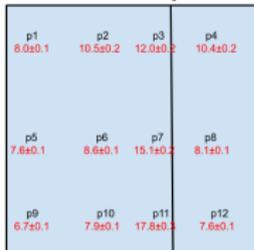
$\pi/K$  разделение

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

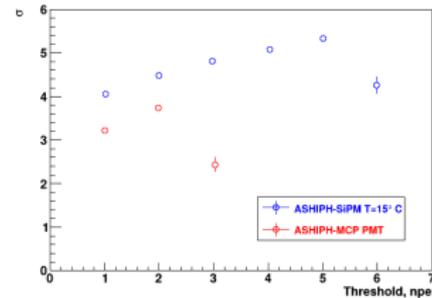
# Сравнение качества разделения АШИФ с ФЭУ МКП и АШИФ с КФЭУ

Прототип счетчика АШИФ с  $n=1.05$  аэрогеля –  $N_{ph.e.} \simeq 9.2$

Карта неоднородности светостобра



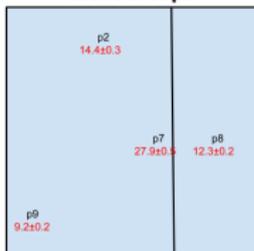
200.0 < P, MeV/c < 300.0



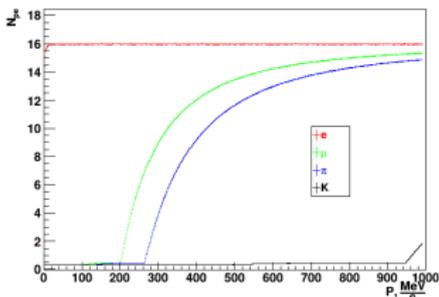
$e/\pi$  разделение

Прототип счетчика АШИФ с  $n=1.13$  аэрогеля –  $N_{ph.e.} \simeq 12.0 \times 1.32 = 15.8$

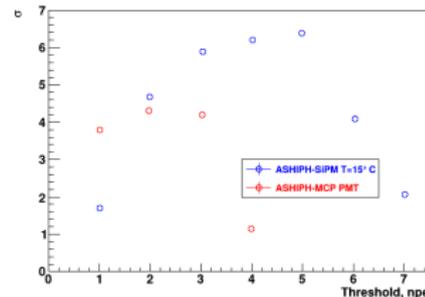
Карта неоднородности светостобра



$n=1.12$



400.0 < P, MeV/c < 900.0



$\pi/K$  разделение

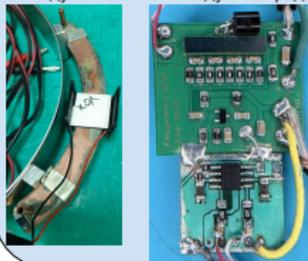
# Макет с КФЭУ внутри детектора Снд

Проверка в условиях эксперимента (4 суток):

- возможности считывания существующей электроникой системы АШИФ с ФЭУ МКП
- работы системы термостабилизации, достижение температуры  $15^{\circ}\text{C}$ 
  - ▶ Температура корпуса АЧС в Снд около  $35^{\circ}\text{C}$  (при обдуве сжатым воздухом электроники calorиметра)



Плата электроники с КФЭУ + модуль Пельтье + воздушный радиатор



Подача воздуха к макету

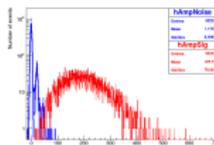
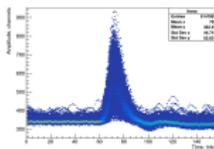


Запись событий от калибровочного генератора ( $\sim 3$  Гц) синхронизованного с первичным триггером Снд, и осуществляющего запуск светодиода для засветки КФЭУ по оптоволокну

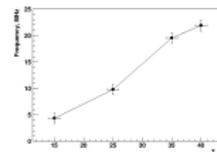
Источники питания и генератор



Оцифровка сигнала с КФЭУ с помощью Z200 (12 бит, 1 ГГц)



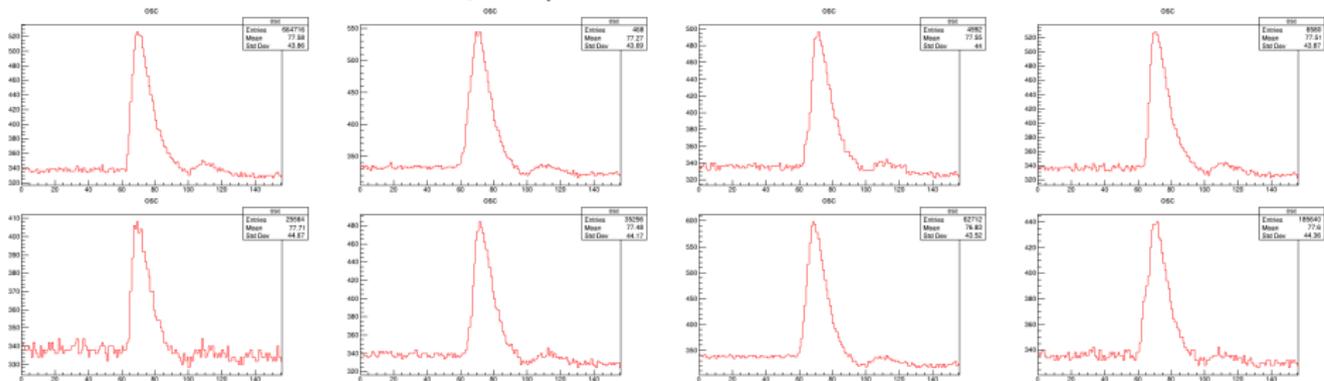
DCR & Температура



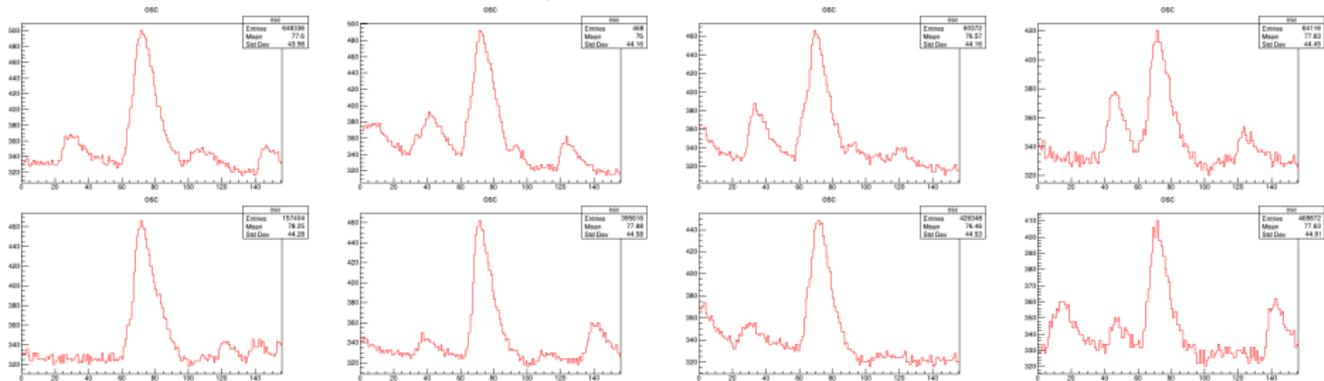
Изменения в схеме с КФЭУ:

- Термодатчик (LM135,  $10 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$ )
- Дифференциальный сигнал – для подавления наводок

## Осциллограммы с КФЭУ – T=15°C

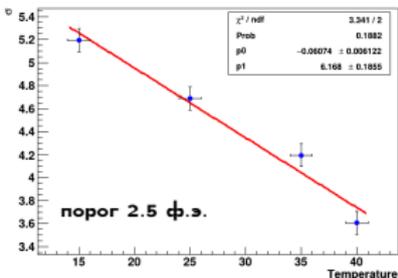
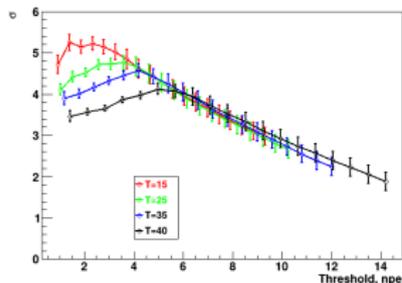


## Осциллограммы с КФЭУ – T=40°C

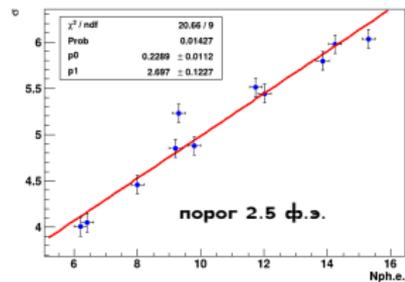


# Макет с КФЭУ внутри детектора Снд

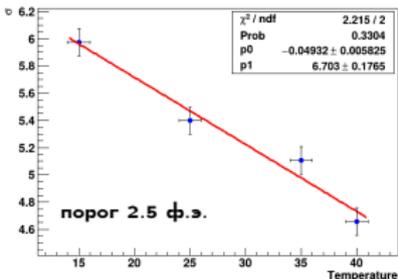
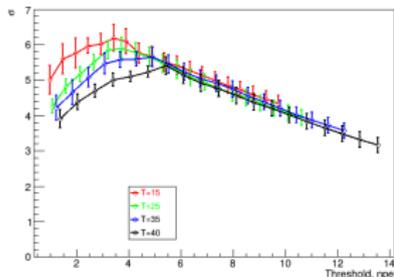
Качество разделения ( $\sigma$ ) – имитация сигнала прототипа счетчика АШИФ с  $n=1.05$  аэрогеля:  $N_{ph.e.} \approx 9.2$



Изменение уровня засветки генератора, температура 15<sup>o</sup>С, порог 2.5 ф.э.



Качество разделения ( $\sigma$ ) – имитация сигнала прототипа счетчика АШИФ с  $n=1.13$  аэрогеля:  $N_{ph.e.} \approx 12.0 \times 1.32 = 15.8$



# 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 9.2.
    - ★ Неоднородность светосбора составляет  $\pm 30\%$ .
    - ★ Качество разделения  $5\sigma$
  - ▶ Аэрогель  $n=1.12$ :
    - ★ Среднее число зарегистрированных фотоэлектронов 12.0.
    - ★ Неоднородность светосбора составляет  $\pm 25\%$ .
    - ★ Качество разделения  $6\sigma$
- Представлено сравнение параметров счетчиков АШИФ-КФЭУ и АШИФ-ФЭУ МКП детектора Снд:
  - ▶ Аэрогель  $n=1.05$ :
    - ★ АШИФ с ФЭУ МКП,  $N_{ph.e.} = 3.5$ .
    - ★  $N_{ph.e.}(\text{АШИФ-КФЭУ})/N_{ph.e.}(\text{АШИФ-ФЭУ МКП}) \approx 2.5$
    - ★  $3.7\sigma(\text{АШИФ-ФЭУ МКП}) \rightarrow 5.0\sigma(\text{АШИФ-КФЭУ, } T=15^\circ\text{C})$
  - ▶ Аэрогель  $n=1.13$ :
    - ★ АШИФ-КФЭУ с  $n=1.13$ , 30 мм:  $N_{ph.e.} \approx 12.0 \times 1.32 = 15.8$
    - ★ АШИФ с ФЭУ МКП,  $N_{ph.e.} = 6 \div 8$ .
    - ★  $N_{ph.e.}(\text{АШИФ-КФЭУ})/N_{ph.e.}(\text{АШИФ-ФЭУ МКП}) \approx 2.2$
    - ★  $4.3\sigma(\text{АШИФ-ФЭУ МКП}) \rightarrow 6.0\sigma(\text{АШИФ-КФЭУ, } T=15^\circ\text{C})$
- Проведенные тесты с КФЭУ внутри детектора Снд показали:
  - ▶ возможность использования оцифровывающей электроники системы АШИФ-ФЭУ МКП
  - ▶ возможность обеспечения температуры  $15^\circ\text{C}$ , для получения высокого качества разделения
  - ▶ работоспособность электроники с КФЭУ в условиях эксперимента
- Корпуса системы АШИФ-КФЭУ в изготовлении – готовность системы – лето 2026 г.

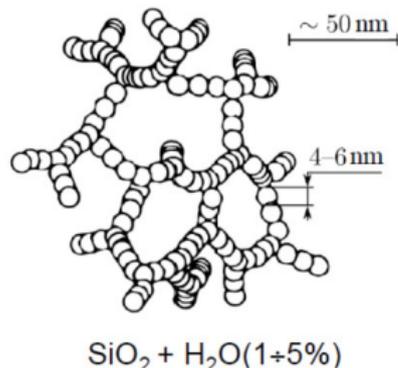
Спасибо за внимание!

# BACKUP

# Аэрогель

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

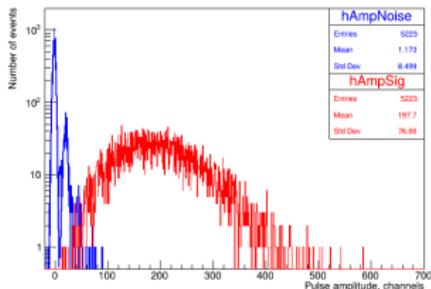
- Аэрогель – пористый диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) с показателем преломления в промежутке между газами, с одной стороны, и твердыми и жидкими веществами, с другой
- Основные производители для ФВЭ: ИК СО РАН (Новосибирск) и Matsushita (Япония)
- Показатель преломления  $n^2 = 1 + 0.438 \cdot \rho$ 
  - ▶  $n=1.006\dots 1.070$  – 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)



# Амплитудные спектры

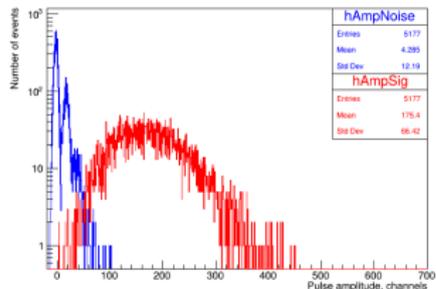
Имитация сигнала прототипа счетчика АШИФ с  $n=1.05$  аэрогеля:  $N_{ph.e.} \simeq 9.2$  ф.э.

T=15°C, Run=89672



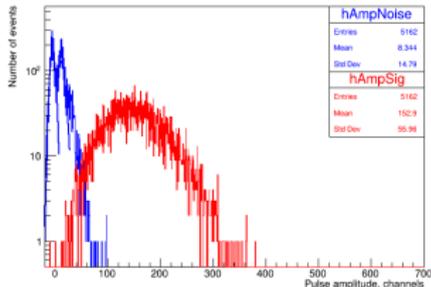
9.3 ф.э.

T=25°C, Run=89679



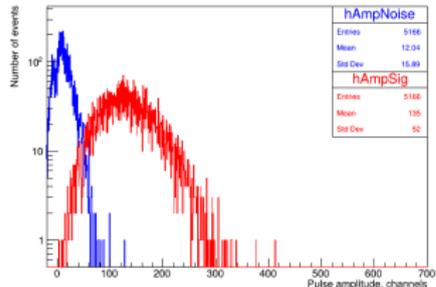
9.2 ф.э.

T=35°C, Run=89682



10.2 ф.э.

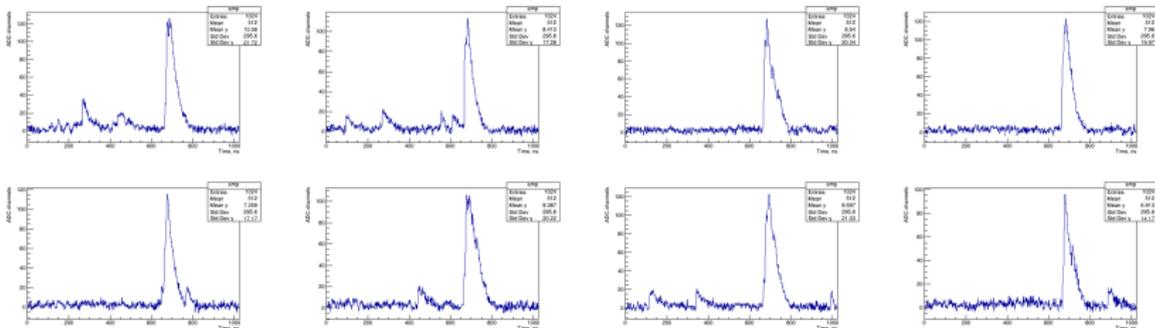
T=40°C, Run=89684



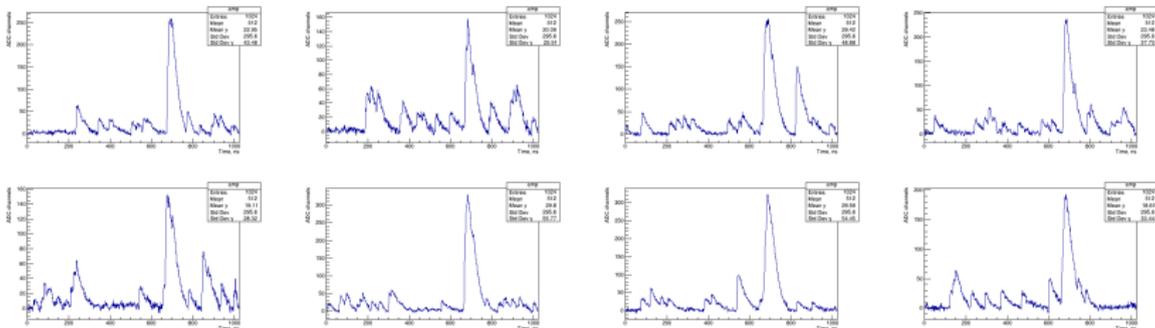
9.9 ф.э.

# Испытание прототипа счетчика АШИФ с КЭФУ на пучке электронов

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

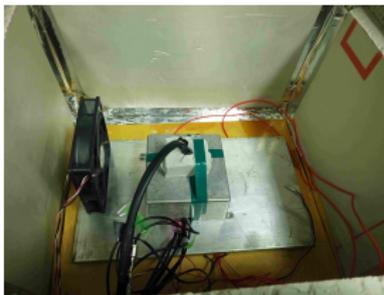
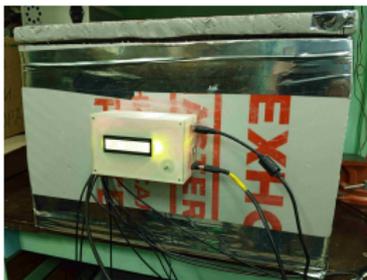


## Примеры записанных осциллограмм при $T=45^{\circ}\text{C}$

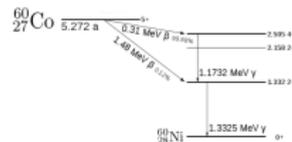
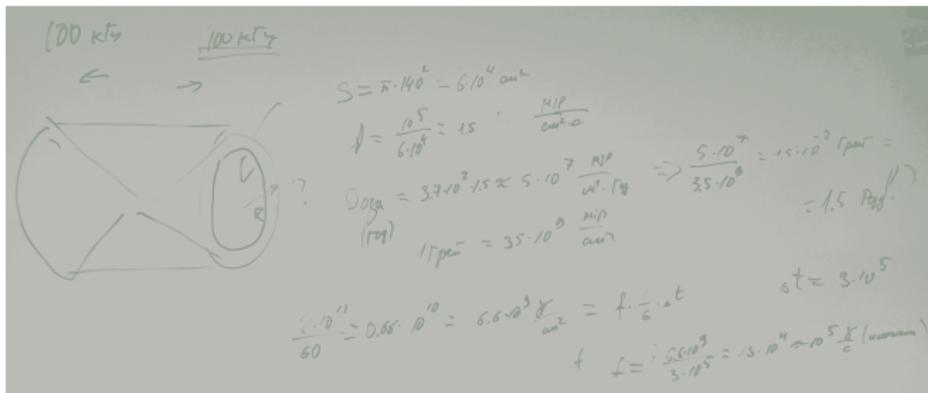


# Температурные и радиационные испытания электроники КФЭУ

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

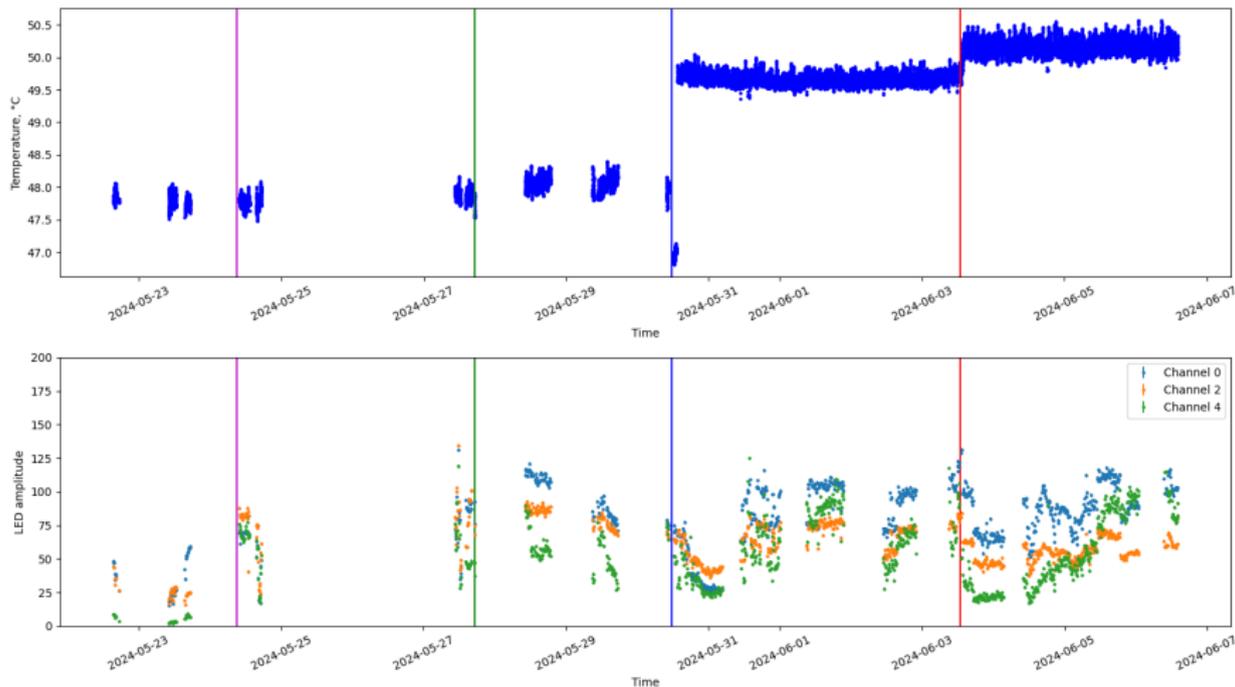


## Оценка радиационной загрузки



# 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