

Перспективы модернизации детектора антинейтрино ДАНСС

Дмитрий Свирида от коллаборации ДАНСС

НАУЧНАЯ СЕССИЯ
СЕКЦИИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК РАН,
посвящённая 300-летию Российской академии наук



Дубна
ОИЯИ
1–5
апреля
2024 г.



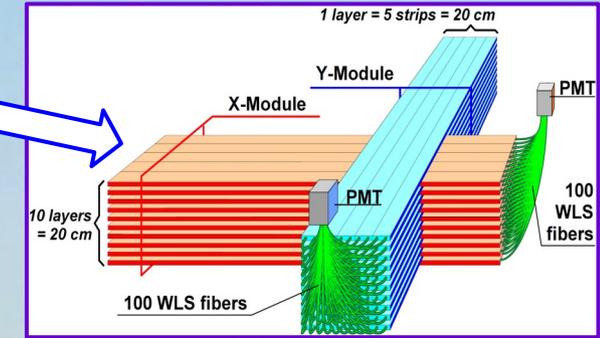
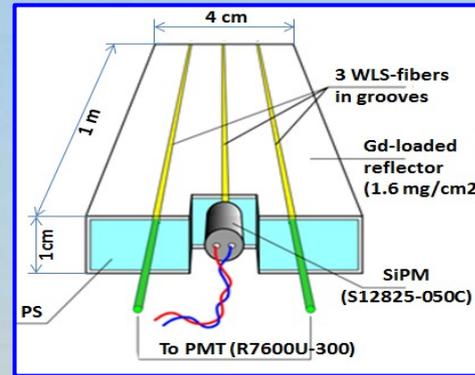
DANSS — Detector of reactor Anti-Neutrino based on Solid-state Scintillator

Уникальное расположение

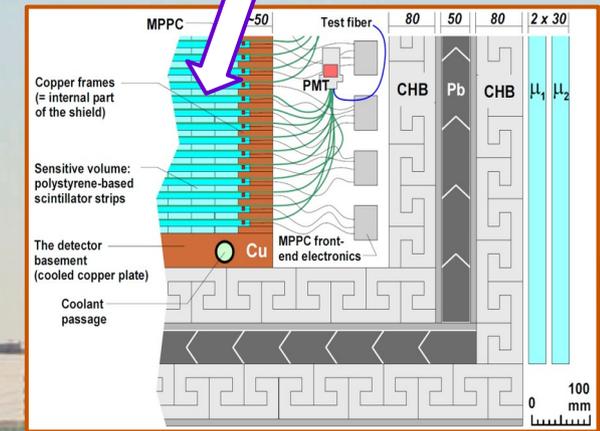
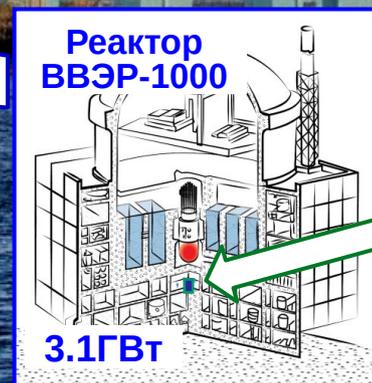
- ✓ 10.9 – 12.9 m от центра АЗ
 - ✓ Экранировка космики 50 м.в.э.
 - ✓ Еженедельное перемещение
- ## Безопасность и сегментация
- ✓ 1 м³ сцинтилляционных стрипов из полистирола 10x40x1000 мм³ с Gd-покрытием и светосбором по 3 спектросмещающим волокнам
 - ✓ 100 слоев с чередованием направления, 25 стрипов в слое
 - ✓ Среднее волокно – КФУ, 2500 каналов
 - ✓ Два крайних волокна от 50 стрипов одного направления – ФЭУ, 50 шт.

Многослойная герметичная защита

- ✓ Cu (5 см) + CHB (8 см) + Pb (5 см) + CHB (8 см) пассивная защита
 - ✓ 2-слойное μ -вето на 5 сторонах
- ## Гибкая система DAQ
- ✓ Оцифровщики формы сигнала 125 МГц



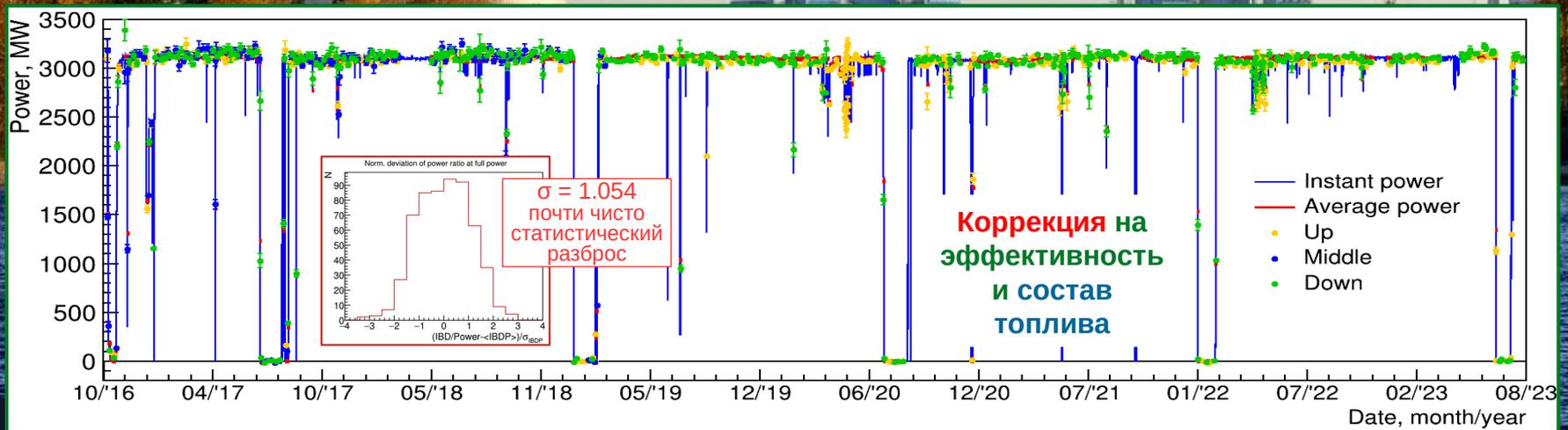
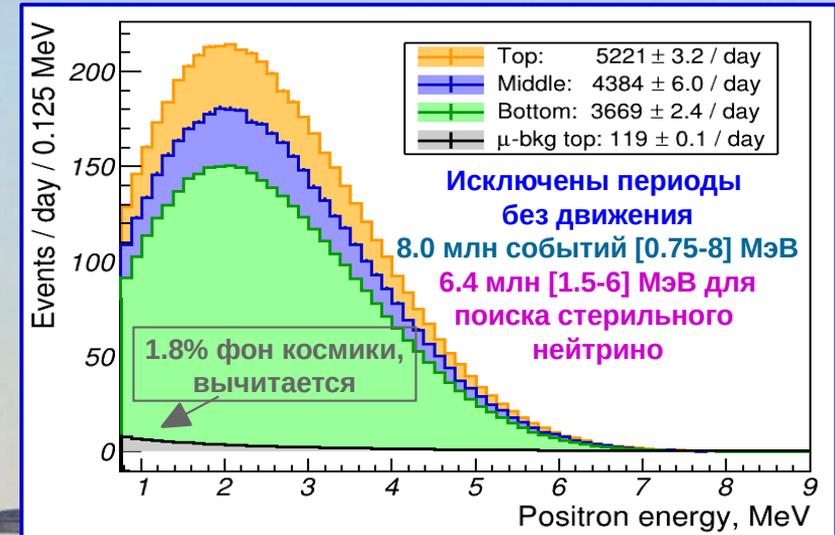
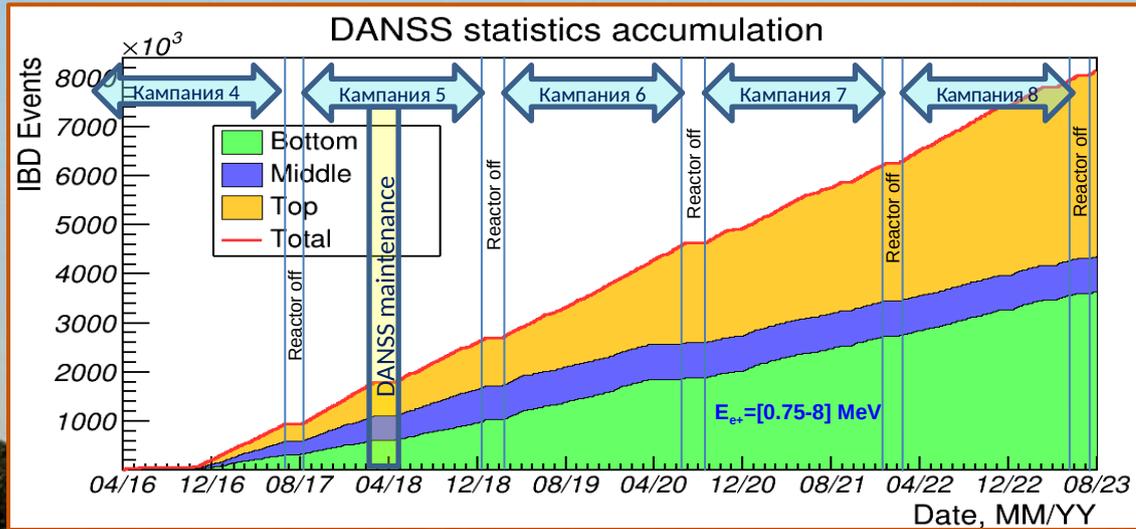
Калининская АЭС
4 блок



JINST 11 (2016) P11011

Впереди Планеты Всея

- ✓ **8 лет** стабильной и почти непрерывной работы, **> 8 млн.** нейтринных событий обработано
- ✓ **> 5000** событий/день в верхнем положении, **> 50:1** отношение сигнал/фон
- ✓ Мониторирование мощности реактора лучше **1.5%** за 2 дня, **4** полных кампании, **5** выключений
- ✓ Изменения абсолютной эффективности известны лучше **1%** за более, чем 7 лет
- ✓ Зависимость спектра и счета ОБР от состава топлива хорошо заметна ... и **много чего еще**



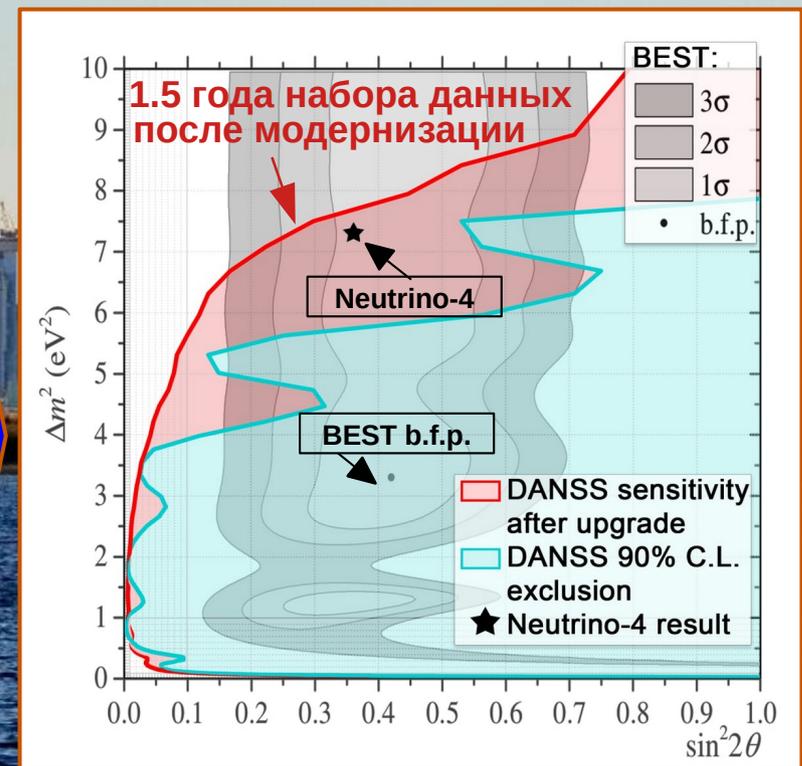
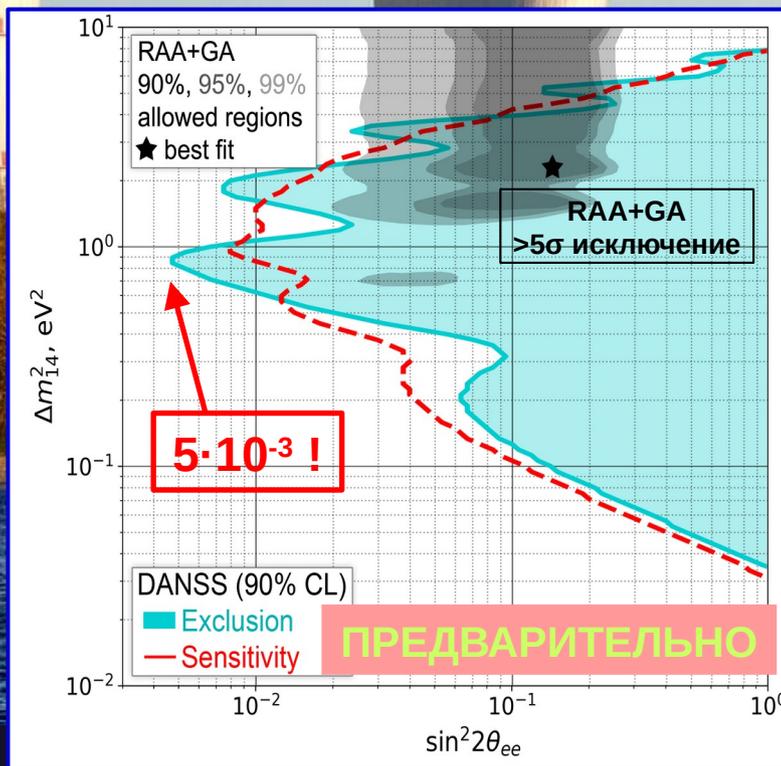
Модернизация – Зачем ?

Почти единственный, но существенный недостаток:

- ✓ Энергетическое разрешение **34% @ 1 МэВ**
- ✓ **18.9 (КФУ) + 15.3 (ФЭУ) = 34.2 ф.э./МэВ**, неравномерность светосбора **8% r.m.s.**
- ✓ Прочие неоднородности, например разброс толщины Gd-содержащего покрытия
- ✓ Для событий с одним хитом (~30%) невозможно скорректировать затухание
- ✓ Ограничивает чувствительность к стерильному нейтрино !

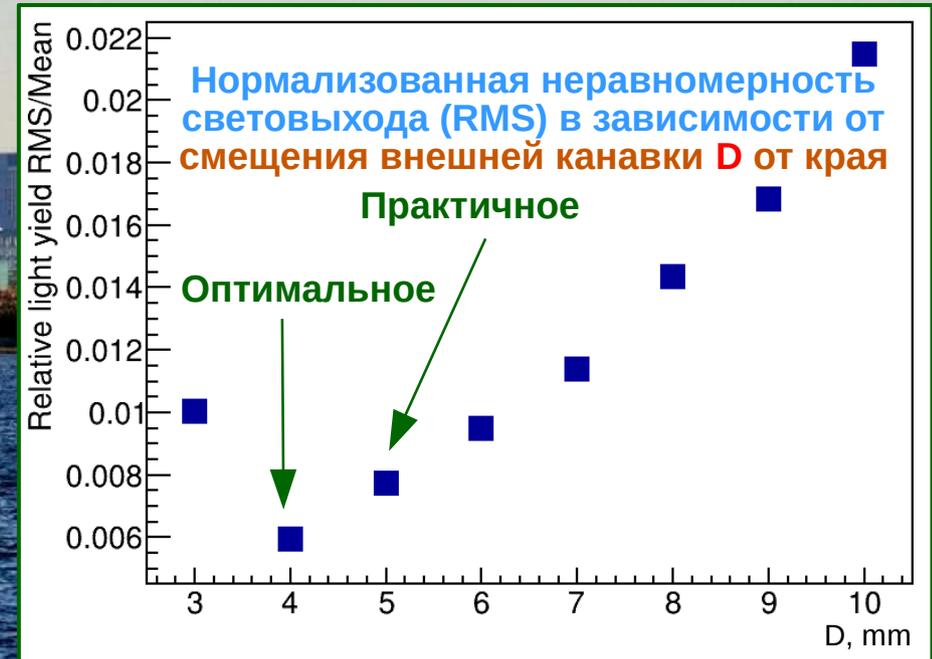
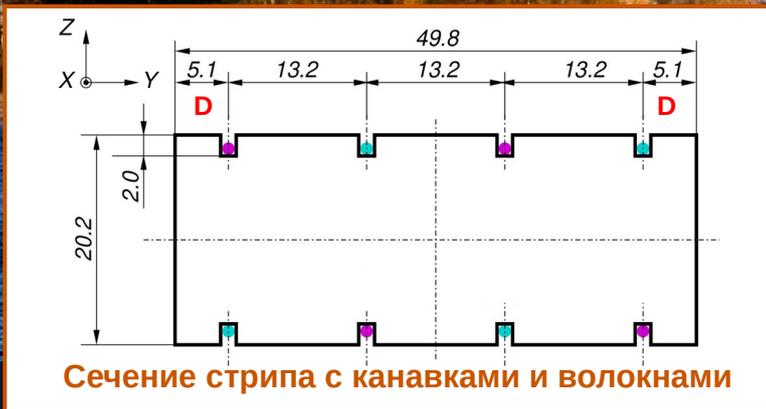
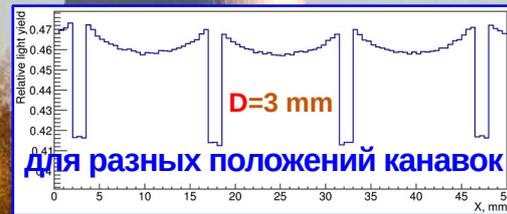
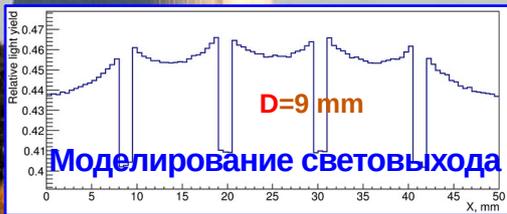
Цели и ожидания:

- ✓ Улучшить энергетическое разрешение до **12% @ 1 МэВ** – продвижение в большие Δm^2
- ✓ Увеличить чувствительный объем – почти **удвоение** скорости счета
- ✓ Продольная координата из измерения времени – истинная **3D** геометрия
- ✓ Проверить результаты **Neutrino-4** и **BEST** уже через **1.5** года набора статистики



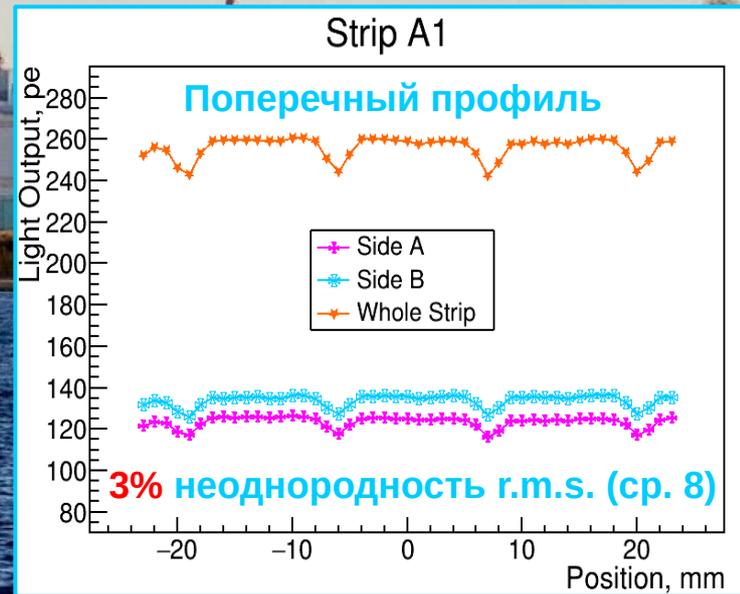
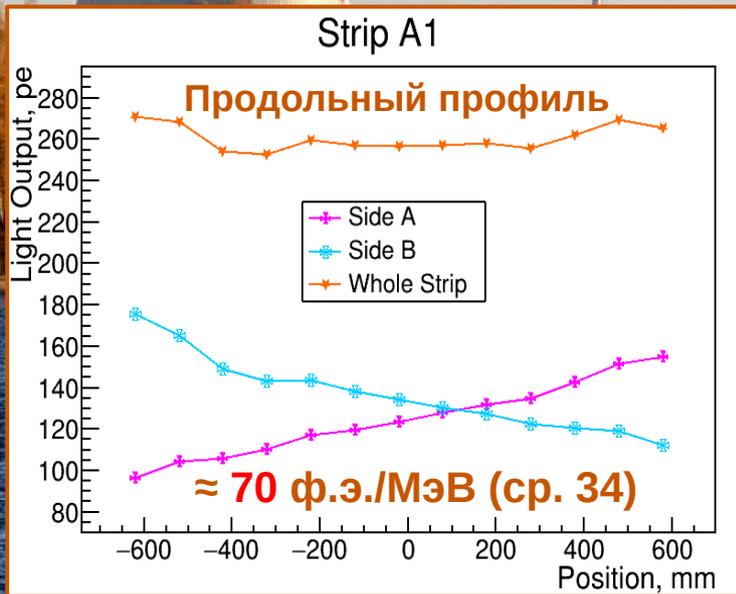
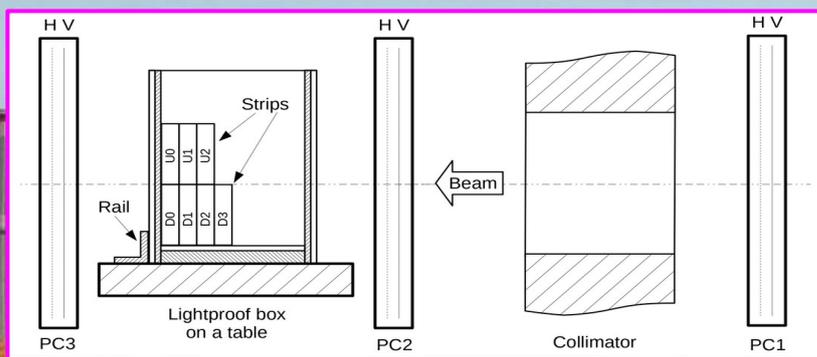
Модернизация – Как ?

- ✓ Новые стрипы – полистирол объемной полимеризации (ИФТП, Дубна) – выше световыход
- ✓ 8 волокон на обеих сторонах, оптимизированные положения канавок (МК) – однородность
- ✓ Химическое вспенивание поверхности для отражения – минимальный мертвый слой
- ✓ Гадолиний в отдельной полиэтиленовой пленке между слоями – постоянная толщина
- ✓ 60 слоев по 24 стрипа $20 \times 50 \times 1200$ мм³ – куб (120 см)³ – 70% к чувствительному объему
- ✓ Отказ от ФЭУ – КФУ на каждом волокне с двух концов
- ✓ Продольная координата по разности времен, даже для единственного хита
- ✓ Бестриггерная DAQ – все события с сигналами на обоих концах стрипа
- ✓ Новая малопотребляющая электроника внутри защиты – охлаждение КФУ до 10°C
- ✓ Неизменные каркас, подъемник, пассивная защита
- ✓ Обсуждается новая вето-система как стадия II модернизации, пока сохраняем старую



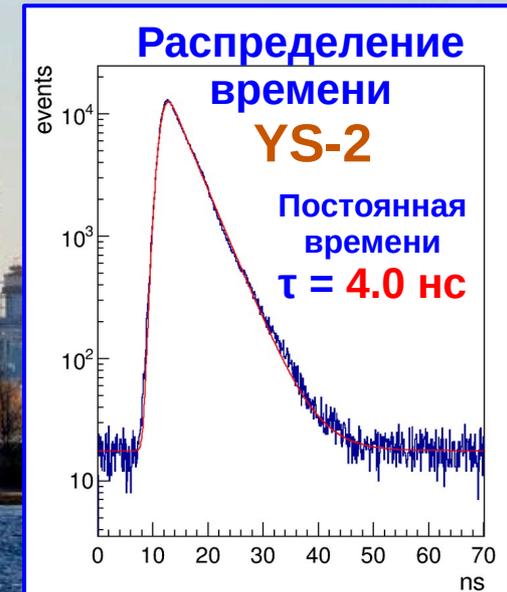
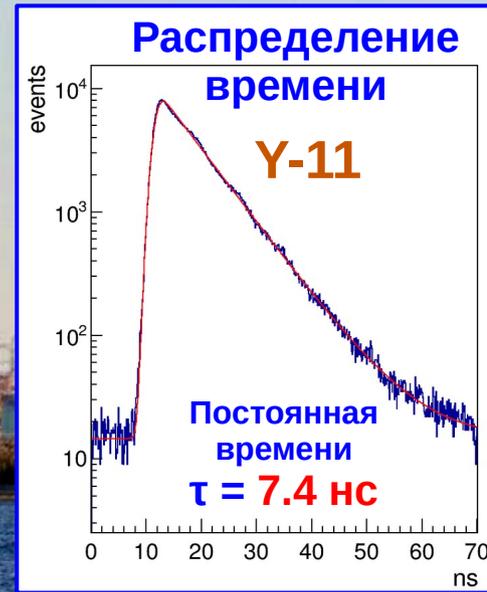
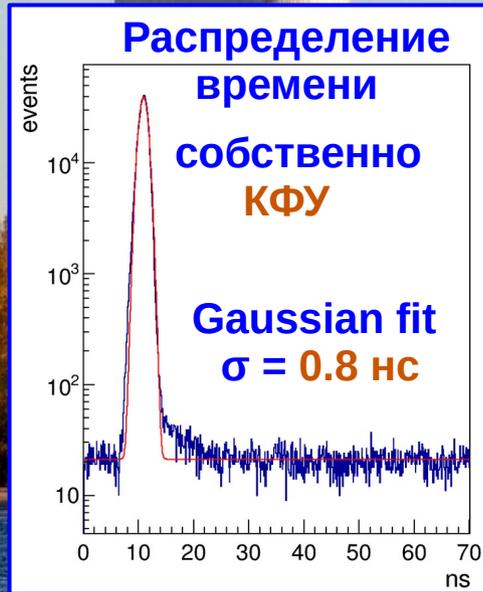
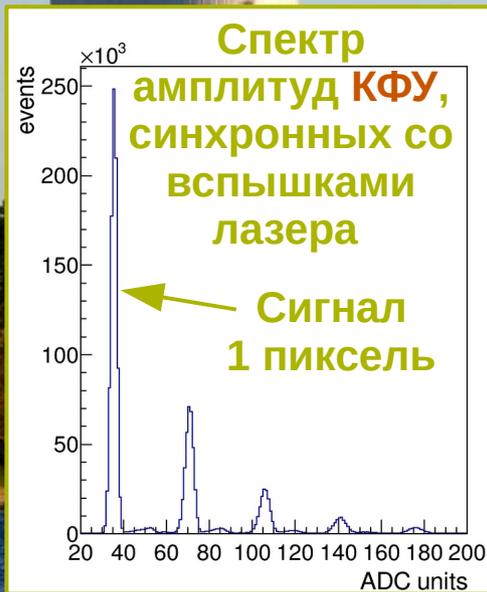
Первая Попытка: КФУ с Одного Конца

- ✓ 730 МэВ/с пионный пучок циклотрона СЦ-1000 ПИЯФ
- ✓ Двухкоординатные 1 mm пропорциональные камеры
- ✓ 4 КФУ на каждом конце стрипа, чередование волокон
- ✓ Можно использовать время и амплитуду для продольной координаты
- ✓ Многообещающий результат !



Еще Лучше: Kuraray YS-2

- ✓ Сравнение нового волокна KURARAY YS-2 и широко используемого Y-11
- ✓ Световойход и затухание по крайней мере не хуже, чем у Y-11 – тесты на космических мюонах и β -источнике ^{90}Sr **JINST 17 (2022) P01031**
- ✓ Импульсный УФ лазер освещал волокна или КФУ с интенсивностью ~ 1 ф.э. в импульсе
- ✓ Только **однопиксельные** события отбирались для временных распределений
- ✓ Постоянная амплитуда исключает искажения времени и другие систематические эффекты
- ✓ Фиты распределений включают аппаратное разрешение и время высвечивания волокон
- ✓ YS-2 почти в **два раза** быстрее Y-11 и предпочтительнее для временных измерений



Фитирующая функция для случая Гауссова аппаратного отклика и экспоненциального времени высвечивания

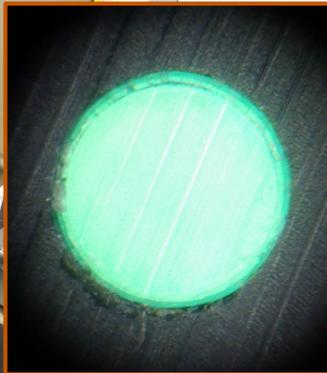
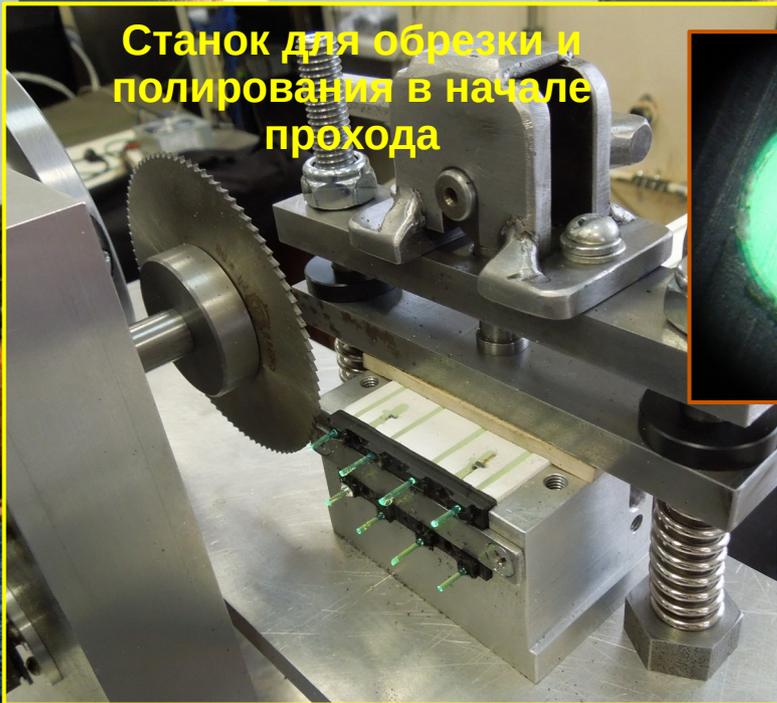
$$N(t) = C \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t - t_0 - \sigma^2/\tau}{\sqrt{2}} \right) \right) e^{-(t-t_0)/\tau}$$

Двухстороннее Считывание

Волокна, вклеенные в оптический разъем



Станок для обрезки и полирования в начале прохода



Торец волокна после обрезки под микроскопом

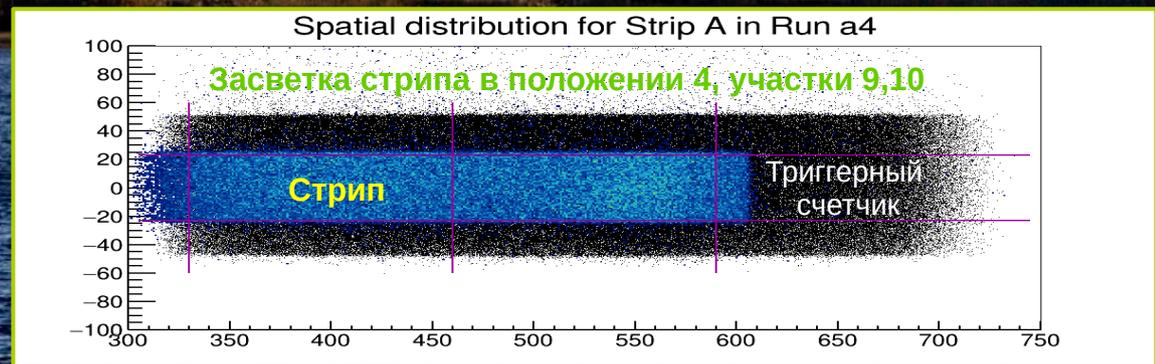
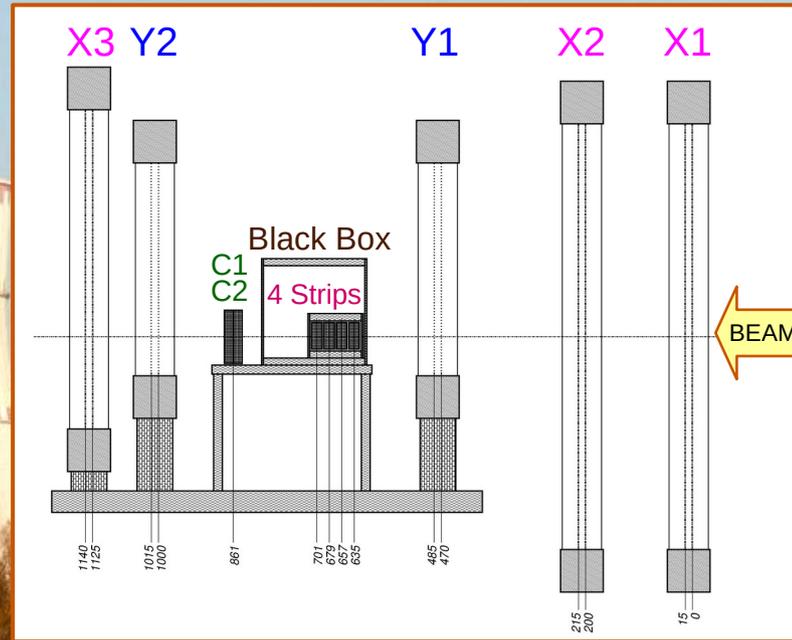
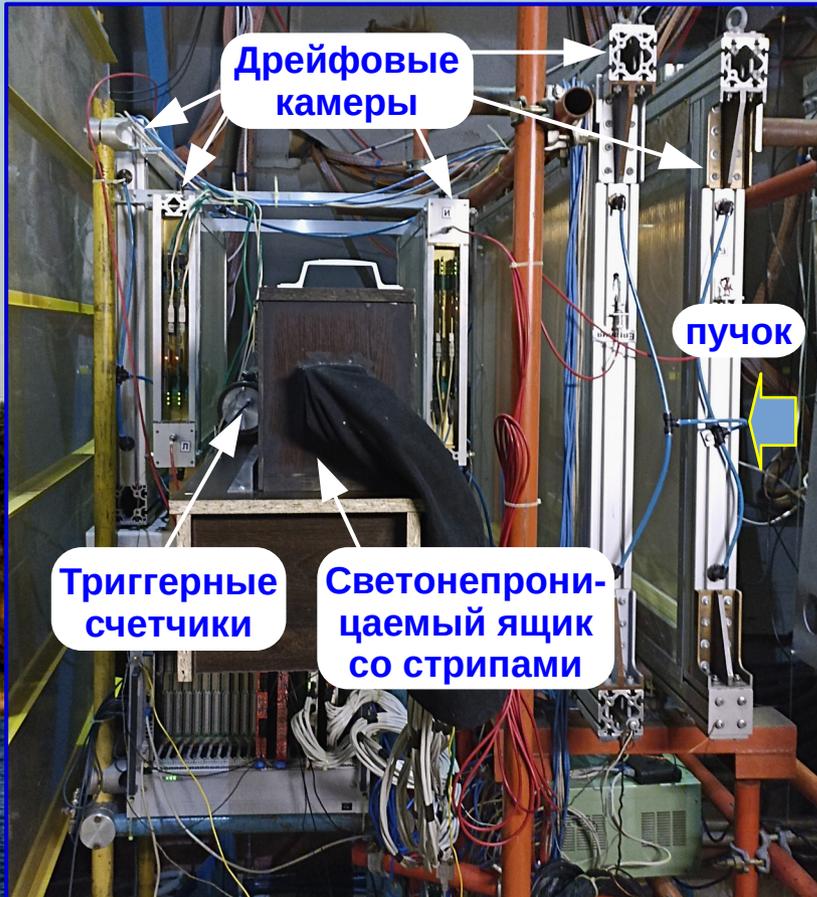
- ✓ Считывание каждого волокна с обоих концов удваивает светосбор (ожидали 30-40%)
- ✓ Главная проблема – обрезать все 8 волокон до одинаковой длины для сопряжения с 2x8 КФУ
- ✓ Решение: вклеить волокна в “оптический разъем” и плоско срезать единым проходом инструмента
- ✓ Платы с КФУ совмещаются с оптическим разъемом направляющим приспособлением
- ✓ Точность совмещения лучше 50 мкм
- ✓ Всего 16 КФУ на стрип с индивидуальной подстройкой питания
- ✓ 8 КФУ на каждом конце объединяются аналогово в один канал оцифровки



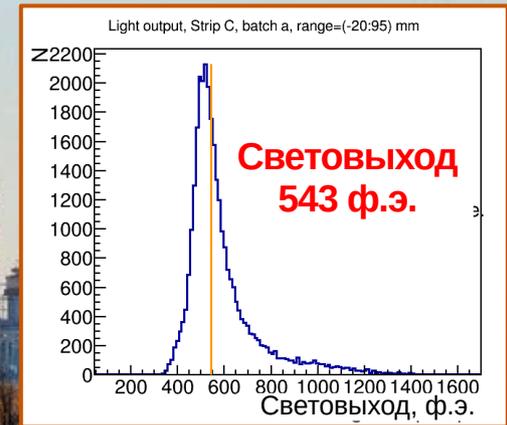
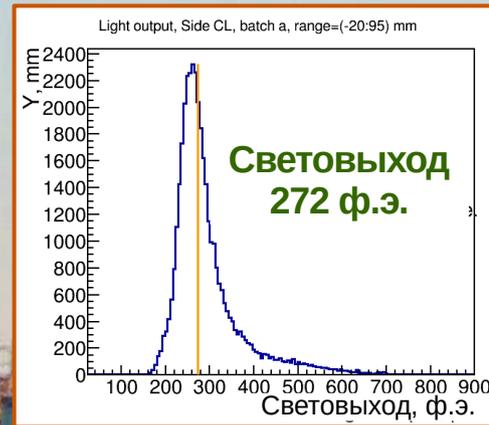
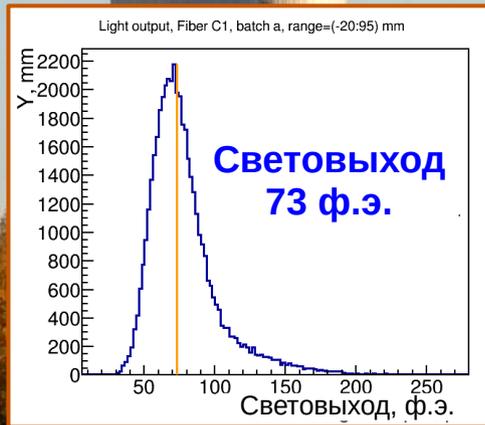
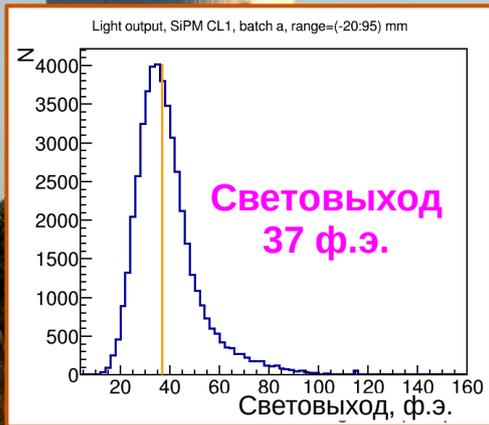
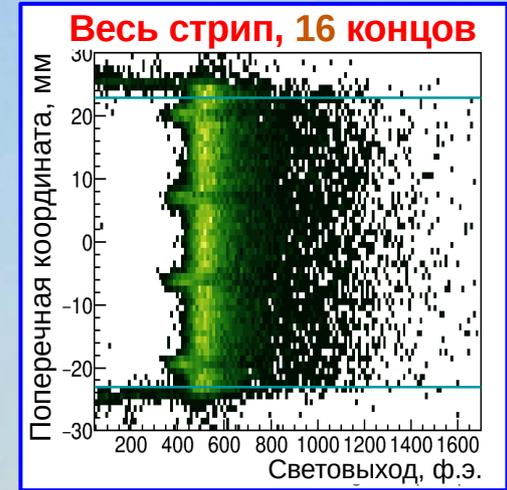
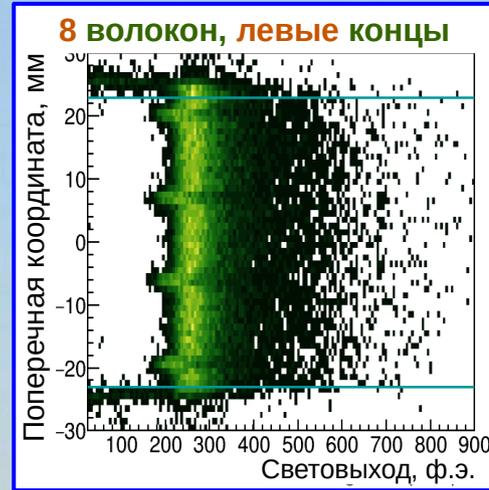
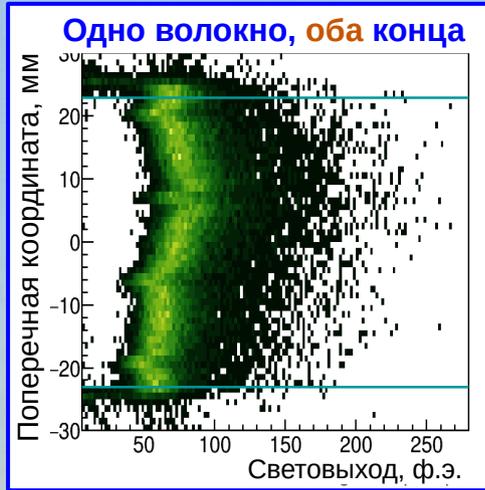
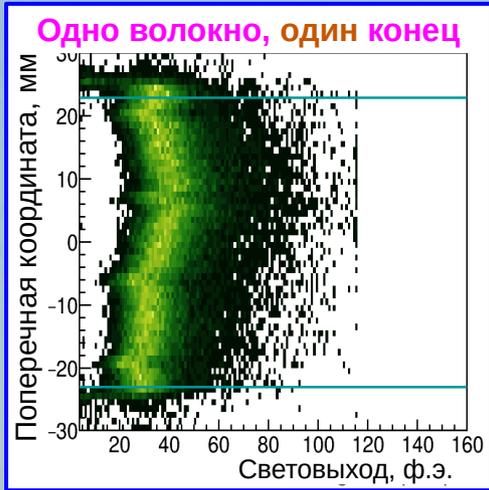
Направляющее приспособление и плата с 8 КФУ и термометром

Новые Испытания на У-70

- ✓ Первые **10 стрипов** полностью изготовлены по двухсторонней технологии
- ✓ Тесты проведены в **ноябре 2022** на пучке пионов(мюонов) **25 ГэВ** на канале 14 синхротрона **У-70 ИФВЭ, Протвино**
- ✓ Проволочные дрейфовые камеры с гексагональной ячейкой, точность **300 мкм**
- ✓ Дефокусированный пучок, **4** положения стрипов, **10** продольных участков



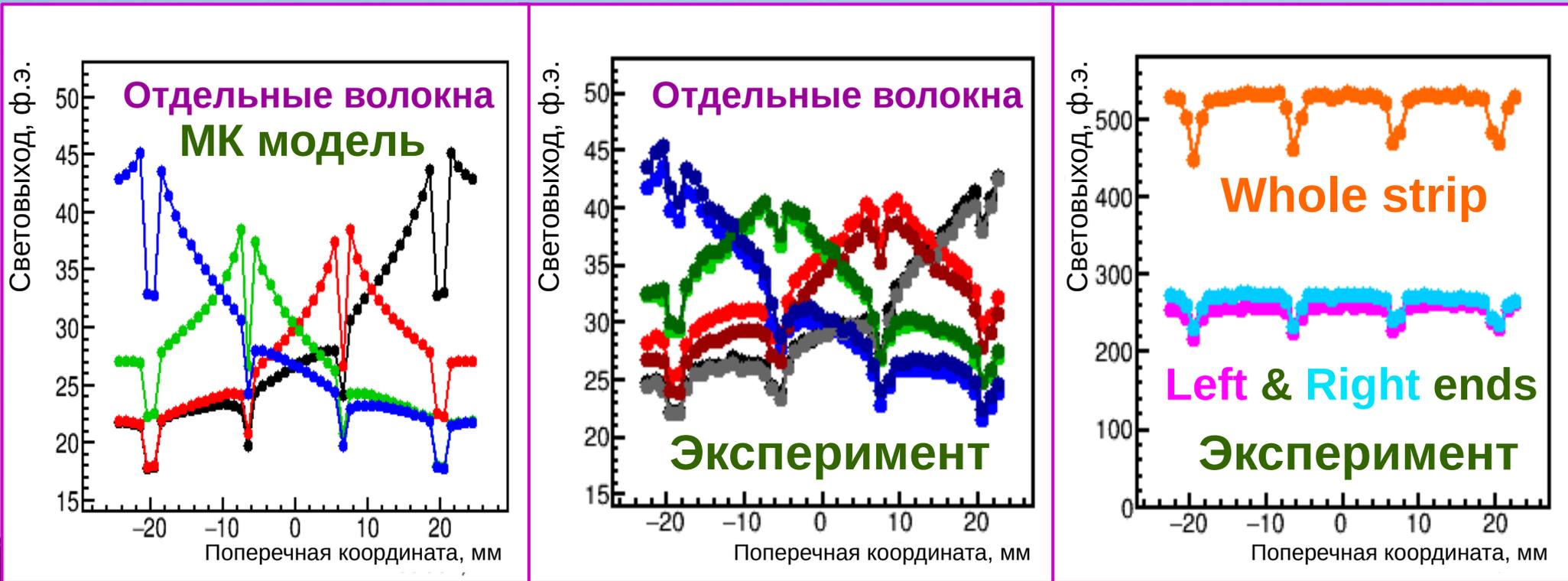
Измерение Световыхода



- ✓ Каждый продольный участок разделен на **1мм** поперечные полоски
- ✓ Распределения световыхода для полосок и их сумм, комбинаций волокон и их концов
- ✓ Распределения разной формы, **медиана** — подходящая мера
- ✓ При толщине стрипа 2 см, **MIP** выделяет **3.7 МэВ** в терминах медианы

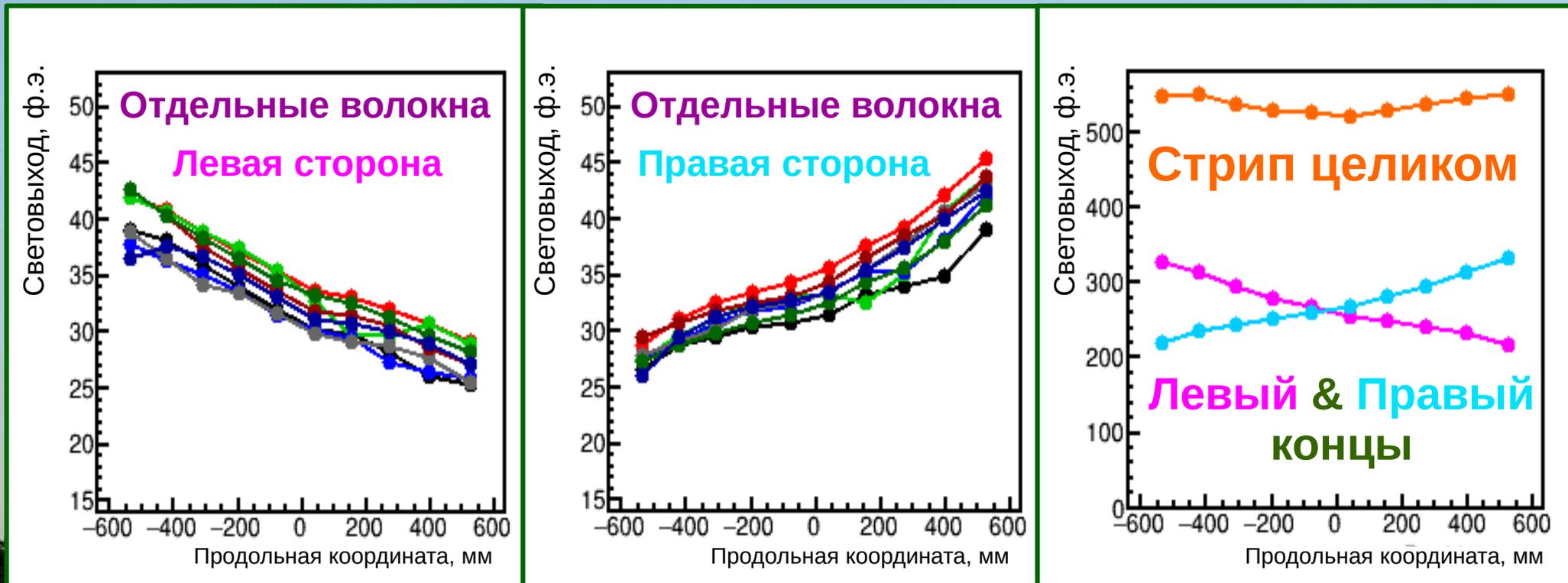
543 ф.э. = 147 ф.э./МэВ

Поперечные Профили



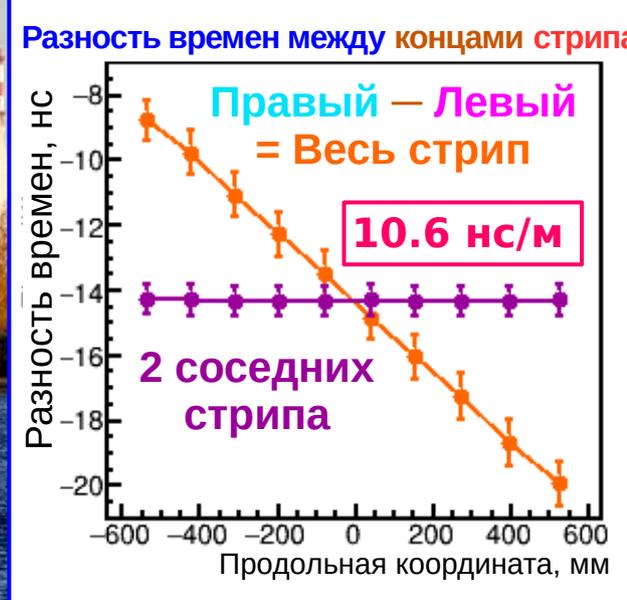
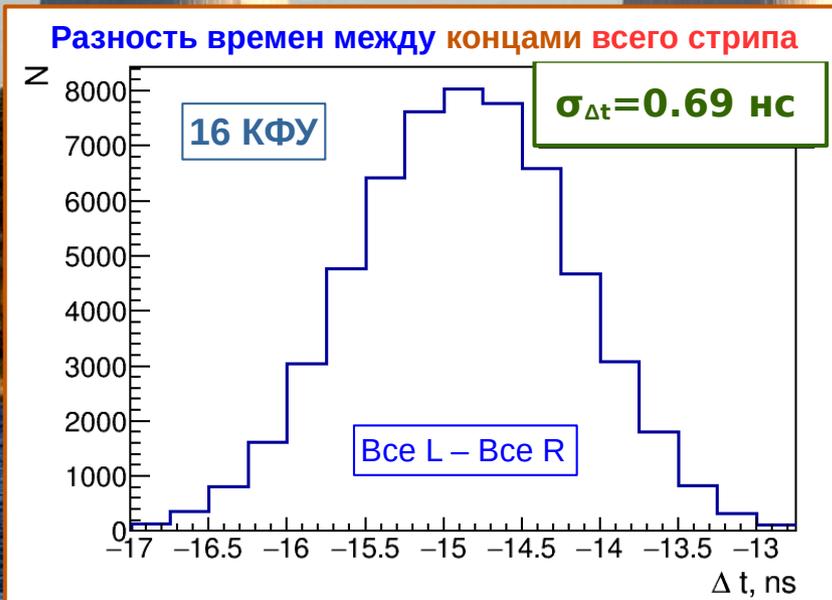
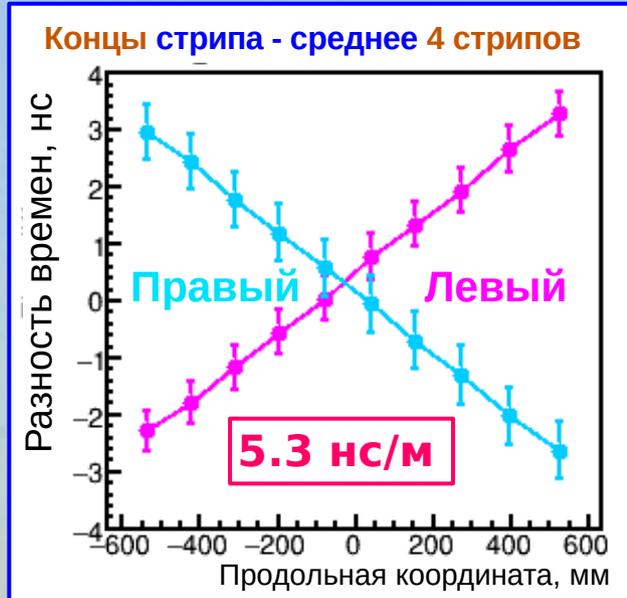
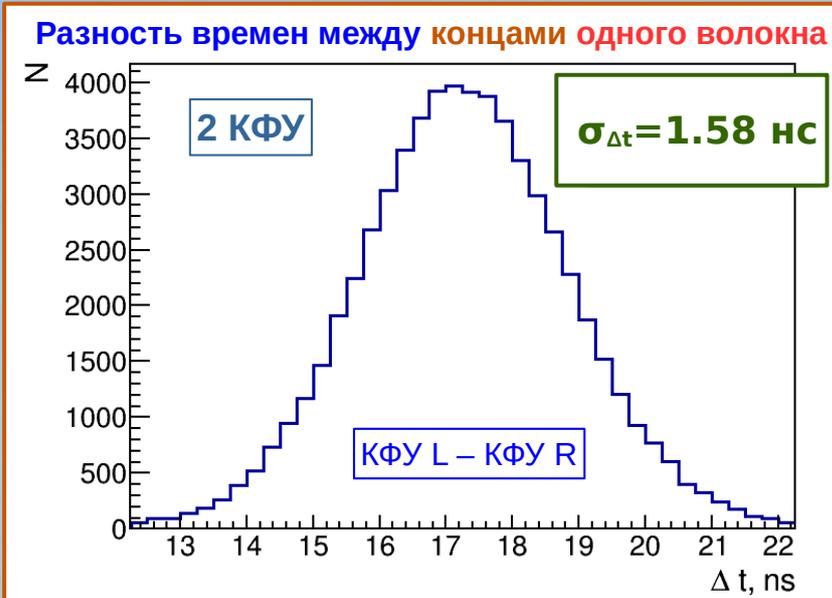
- ✓ МК модель не в точности совпадает с экспериментом, но отражает основные свойства
- ✓ По измерениям: волокна лучше собирают свет из далеких областей
- ✓ Канавки выглядят менее глубокими из-за координатного разрешения
- ✓ ДАНСС не будет измерять поперечную координату – канавки только ухудшают энергетическое разрешение: неоднородность **R.M.S. $\sim (3.5 - 4)\%$**

Продольные Профили



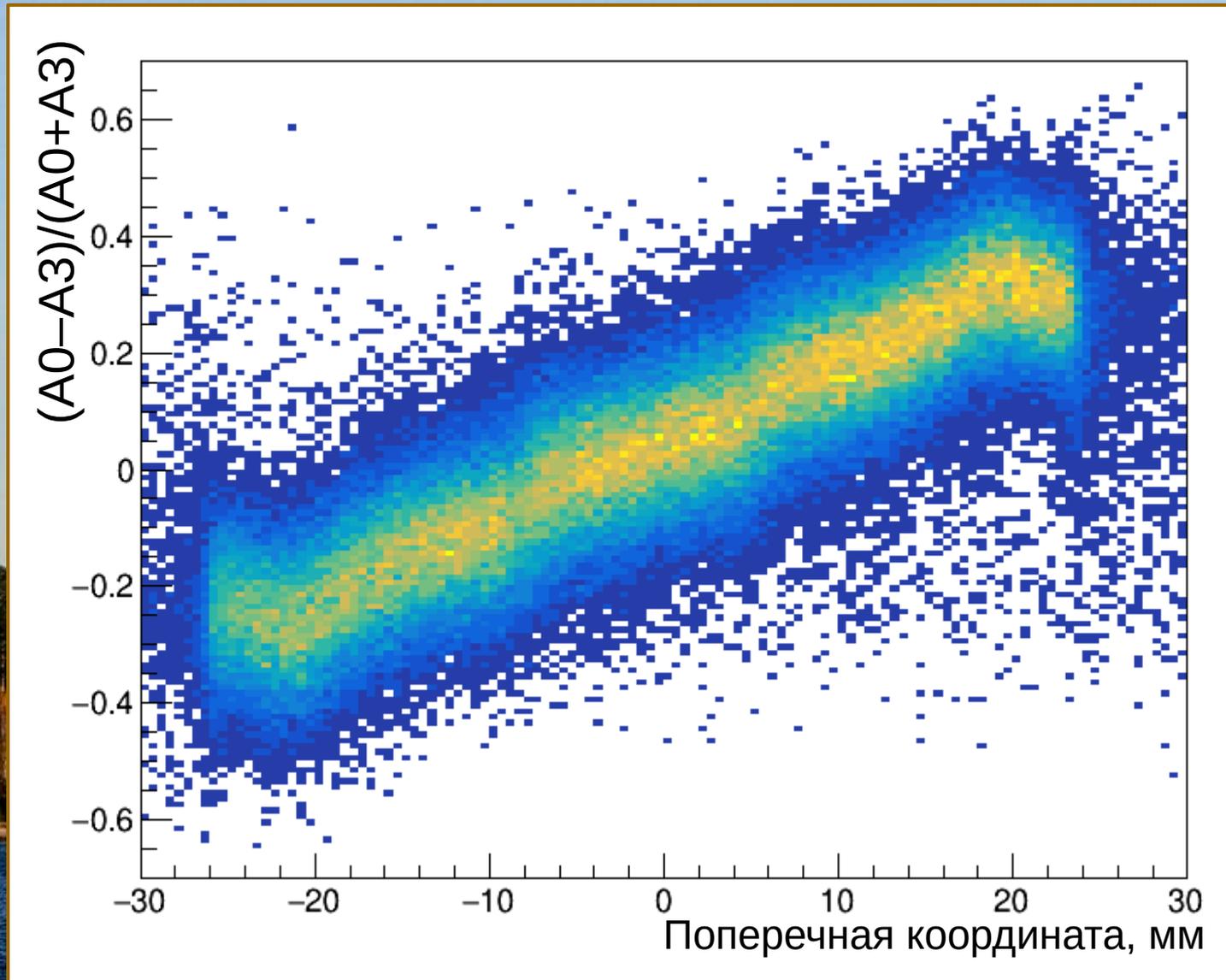
- ✓ Неплохой разброс по волокнам и КФУ
- ✓ Затухание $\sim 30-35\%$ на длине 1.2 м для YS-2 в реальном применении
- ✓ Затухание приблизительно линейно
- ✓ Только $\leq \pm 3\%$ продольной неравномерности без координатной коррекции
- ✓ Затухание можно измерить и скорректировать

Продольная Координата по Времени



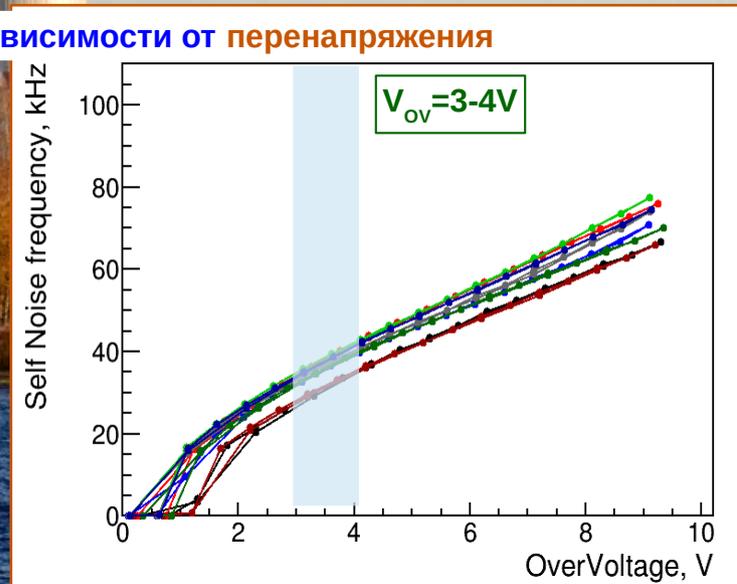
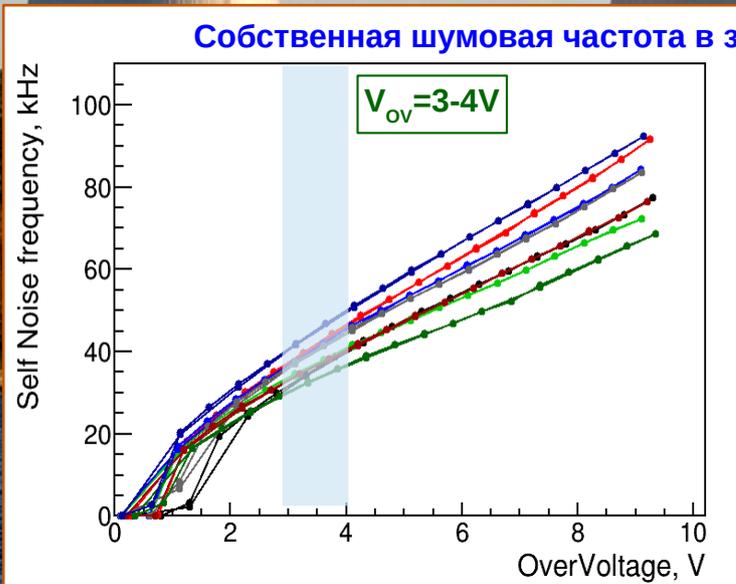
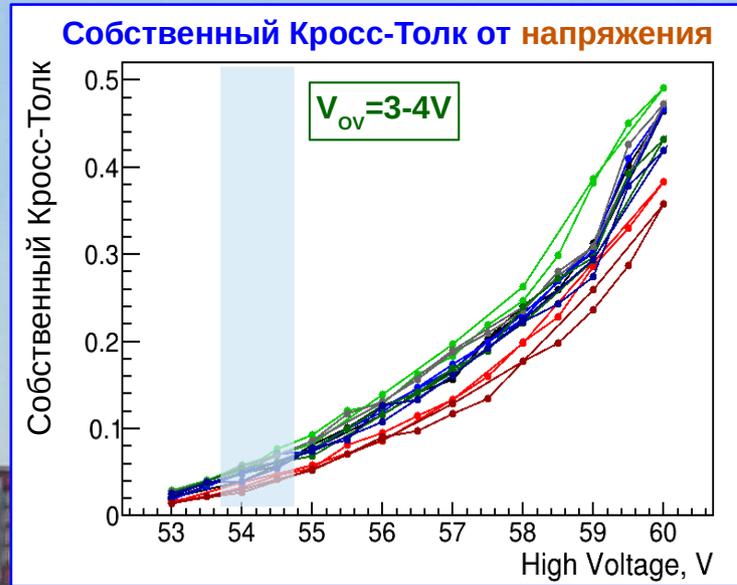
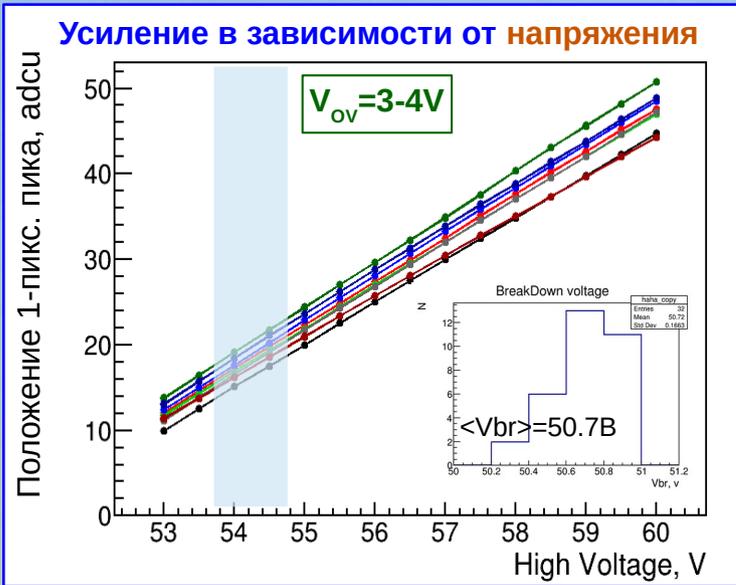
- ✓ Временное разрешение улучшается $\sim \sqrt{N_{\text{p.e.}}}$
- ✓ Если учесть размер участка, для всего стрипа:
 - $\sigma_{\Delta t} = 0.59 \text{ нс}$
 - $\sigma_L = 5.6 \text{ см}$
- ✓ В 2 раза лучше, чем Y-11 через один
- ✓ Задержка в точности как у полистирола ($n=1.59$) – можно подозревать остаточный time walk
- ✓ Временная зависимость линейна и измеряема

Можно ожидать $\sigma_L = 11 \text{ см}$ для частицы 1 МэВ



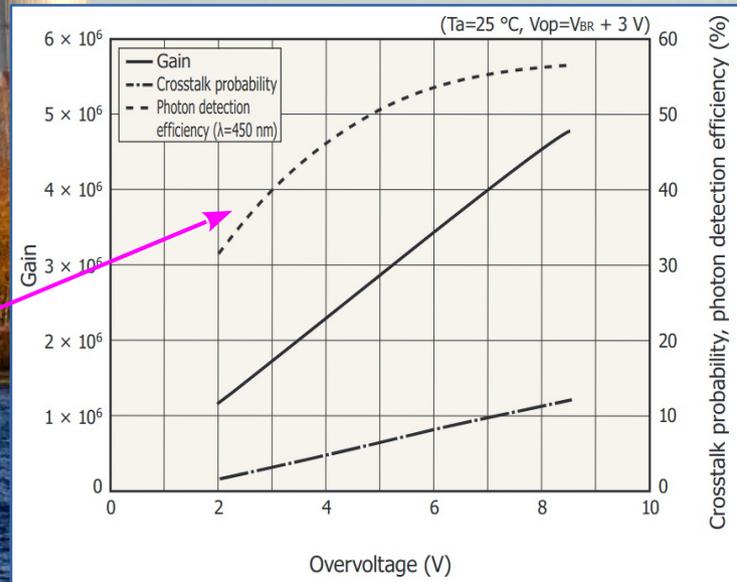
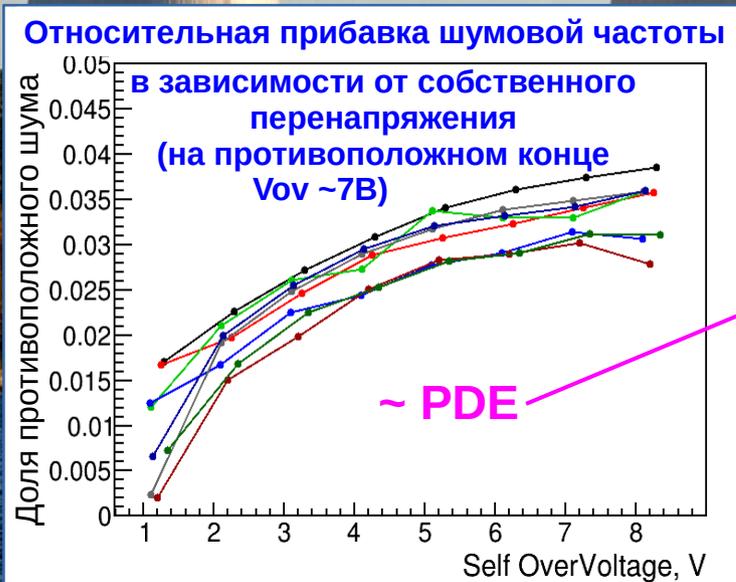
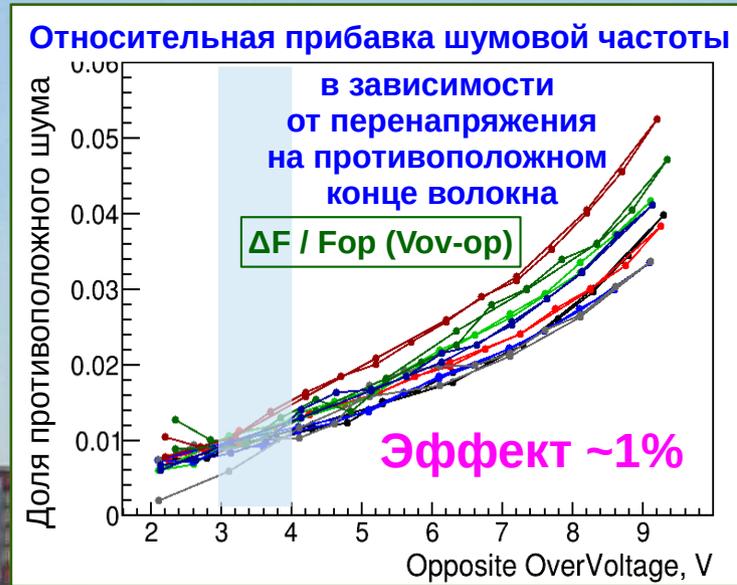
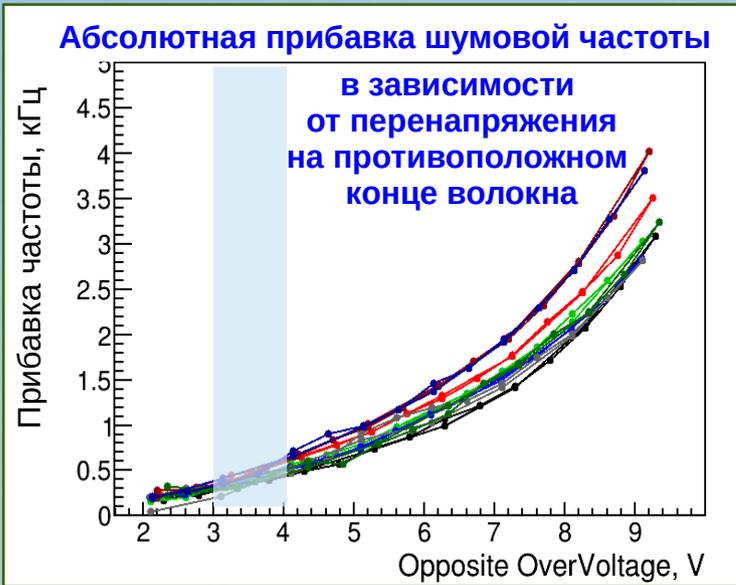
- ✓ Если есть возможность делать оцифровку отдельных волокон (ДАНСС не может так делать)
- ✓ Простая асимметрия между крайними волокнами уже дает точность **3-5 мм**
- ✓ Можно значительно улучшить, если учитывать все **8 волокон**, подходящая задача для ИИ !

Взаимовлияние Противоположных Концов



- ✓ **НАМАМАТСУ S13360-1350PE**
- ✓ **2 стрипа, 8 пар КФУ в каждом**
- ✓ **Длительный прогрев при комнатной температуре**
- ✓ **Вычитание соседних “нулевых” точек**
- ✓ **V_{BR} в пределах $\pm 0.5V$**
- ✓ **Рабочая область в начале исследуемого интервала**
- ✓ **Собственный кросс-толк 4-6% @ $V_{ov} = 3-4 V$**
- ✓ **30-50 кГц собственной шумовой частоты (90 кГц по паспорту)**

Взаимовлияние Противоположных Концов



- ✓ Пиксель КФУ, сработавший на одном конце волокна, освещает ультрафиолетом волокно, которое переизлучает его и транспортирует на противоположный конец, вызывая срабатывание КФУ
 - ✓ Можно ожидать, что вероятность срабатывания пропорциональна интенсивности лавины и PDE
- $\Delta F \sim F_{op} \cdot V_{ov-op} \cdot PDE$
- ✓ Не наблюдается строгой пропорциональности
 - ✓ Прибавка 0.2-0.3 кГц к собственной частоте 30-50 кГц
 - ✓ Эффект невелик в рабочей области, но заметно возрастает с ростом V_{ov}

Статус и Планы

- ✓ Подготовка к модернизации ДАНССа идет полным ходом
- ✓ Двухстороннее считывание удваивает количество света и существенно улучшает временное разрешение с YS-2 волокном
- ✓ Технология полностью отработана и первые образцы испытаны
- ✓ Планируемое улучшение энергетического разрешения **12% @ 1 MeV** достижимо с измеренными характеристиками
- ✓ Механическая и химическая обработка новых стрипов завершены
- ✓ Массовое оснащение новых стрипов начинается в этом году
- ✓ Новая электроника внутри защиты, несущий контур защиты, система охлаждения -- в стадии технической проработки
- ✓ Ждем новых удивительных результатов от улучшенного детектора !

Спасибо за внимание !

Грант РФФИ <https://rscf.ru/project/23-12-00085/>

Дмитрий Свирида (НИЦ КИ) от коллаборации ДАНСС