

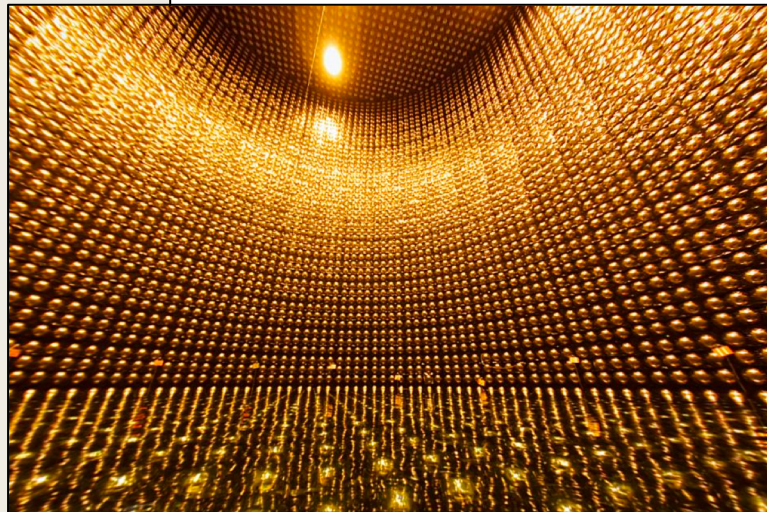
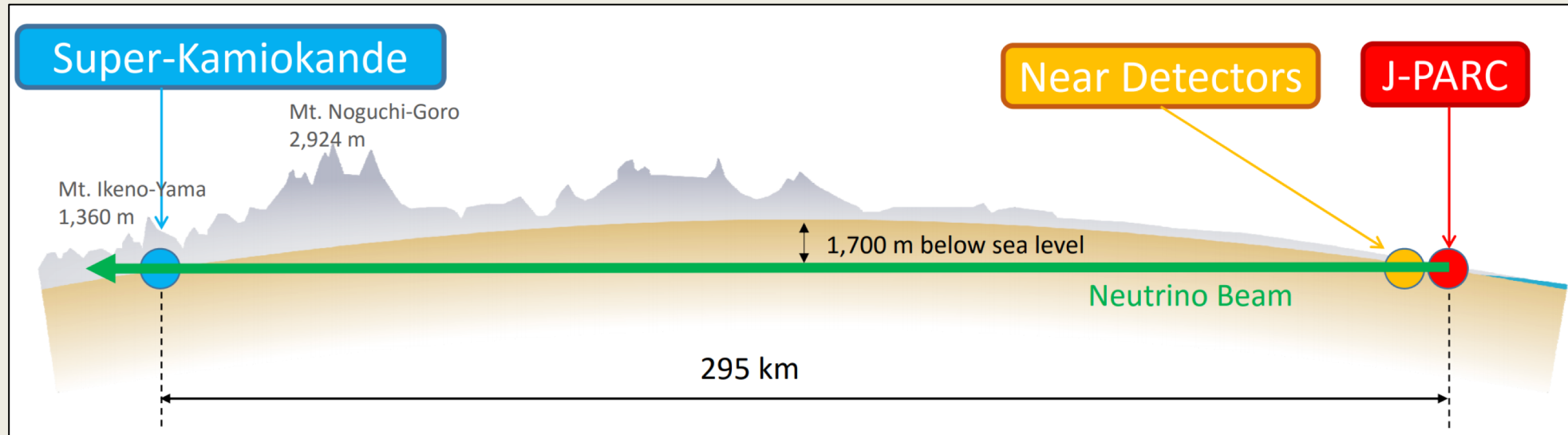
Новый высокосегментированный детектор SuperFGD для эксперимента T2K

Федотов С.А.

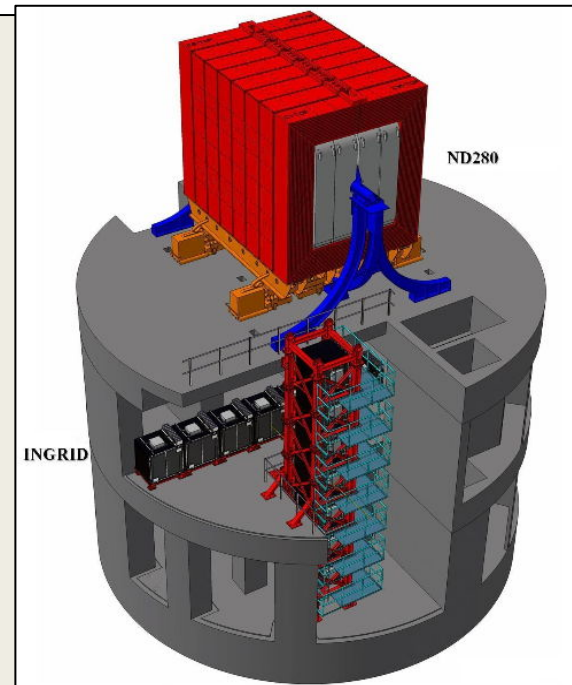
Летняя научная школа "Супер с-тау фабрика"

Эксперимент T2K (Япония)

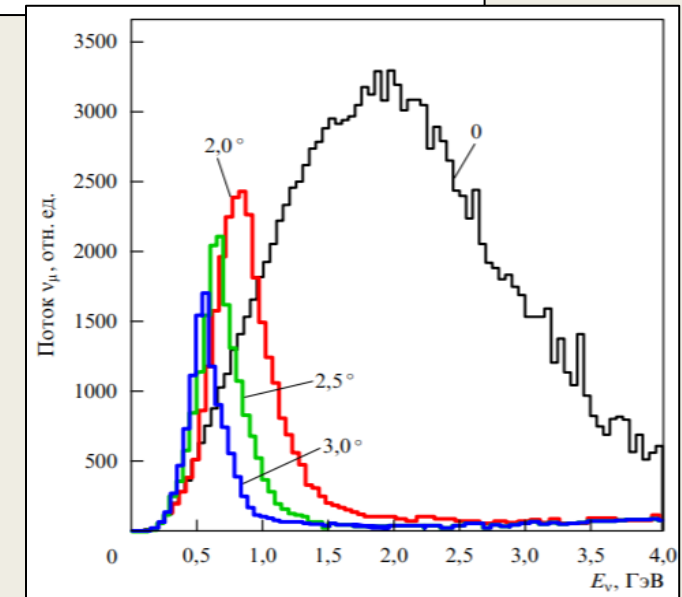
[arXiv: 1106.1238](https://arxiv.org/abs/1106.1238)



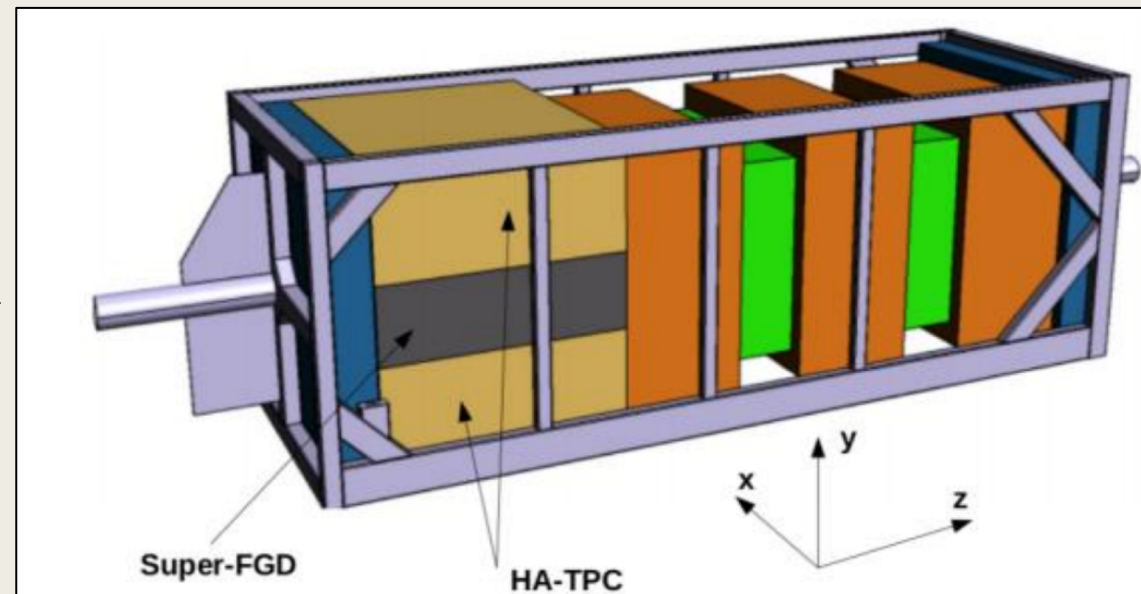
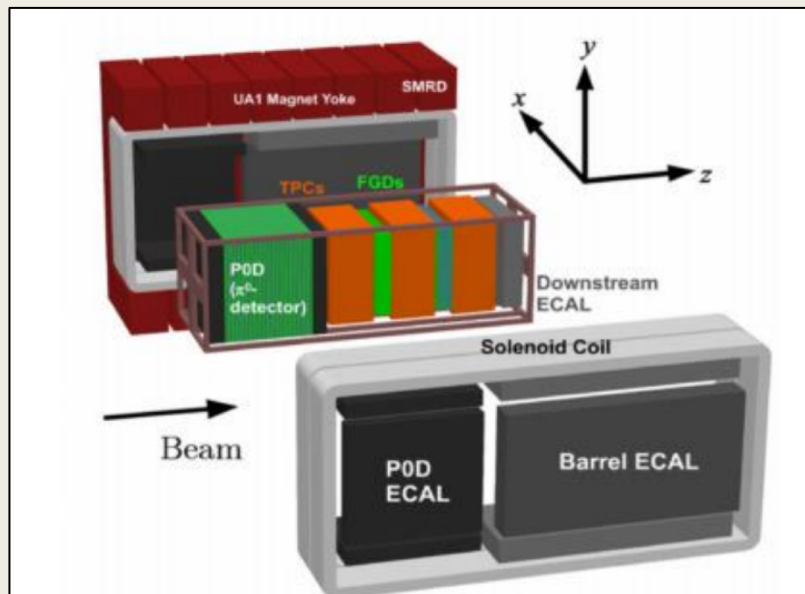
Дальний детектор Super-Kamiokande



Система ближних детекторов



Нейтринный пучок

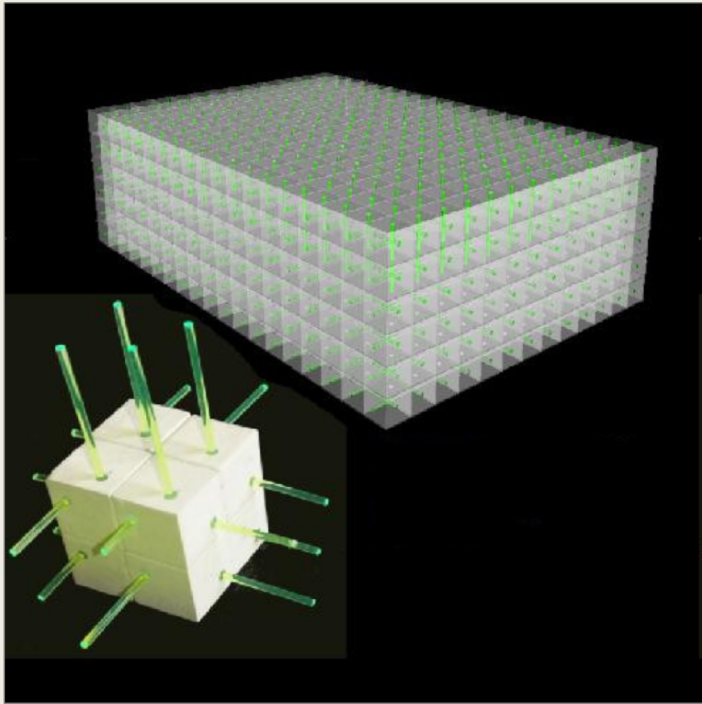


Мотивация модернизации ND280:

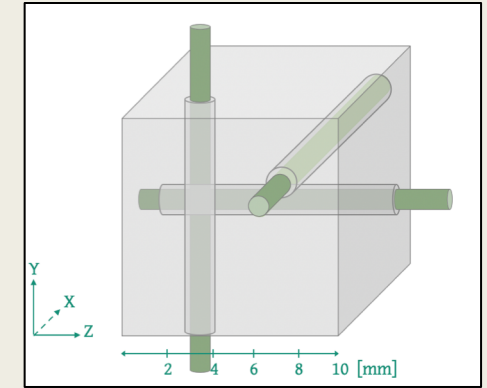
- функционирующий в настоящее время трековый детектор регистрирует заряженные частицы, образованные в результате нейтринных взаимодействий и распространяющиеся в направлении падающего нейтринного пучка, в то время как регистрация таких частиц в дальнем детекторе SK происходит в полном телесном угле;
- для повышения точности восстановления спектра нейтрино вблизи мишени (до осцилляций) необходимо регистрировать все заряженные частицы, возникающие в результате нейтринных взаимодействий, в частности, регистрировать протоны с низким энергетическим порогом. В настоящее время этот порог довольно высок и спектр нейтрино восстанавливается только из измеренных мюонов;
- при работе с пучком мюонных антинейтрино для повышения точности осцилляционных параметров необходимо регистрировать нейтроны, возникающие при взаимодействии через заряженный ток;
- чувствительность экспериментов T2K и Hyper-Kamiokande к CP-нарушению требует улучшения систематических погрешностей, для чего необходимо точное измерение сечений нейтринных взаимодействий.

Детектор SuperFGD

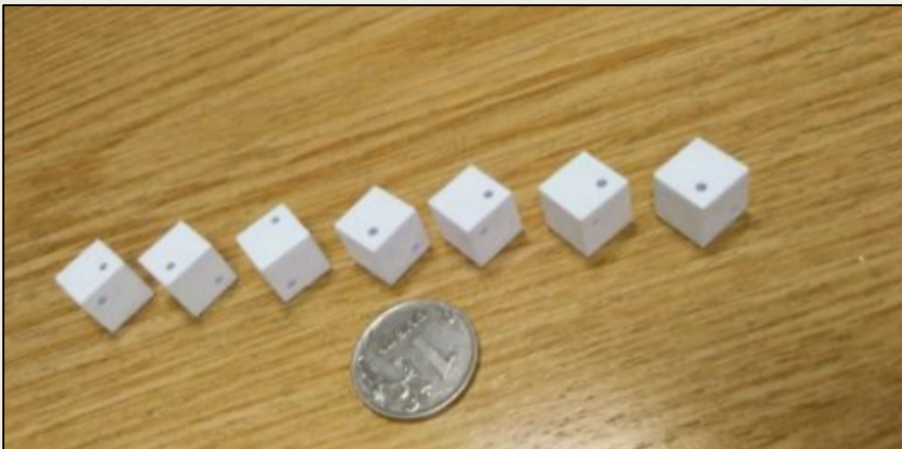
[arXiv: 2005.11048](https://arxiv.org/abs/2005.11048)



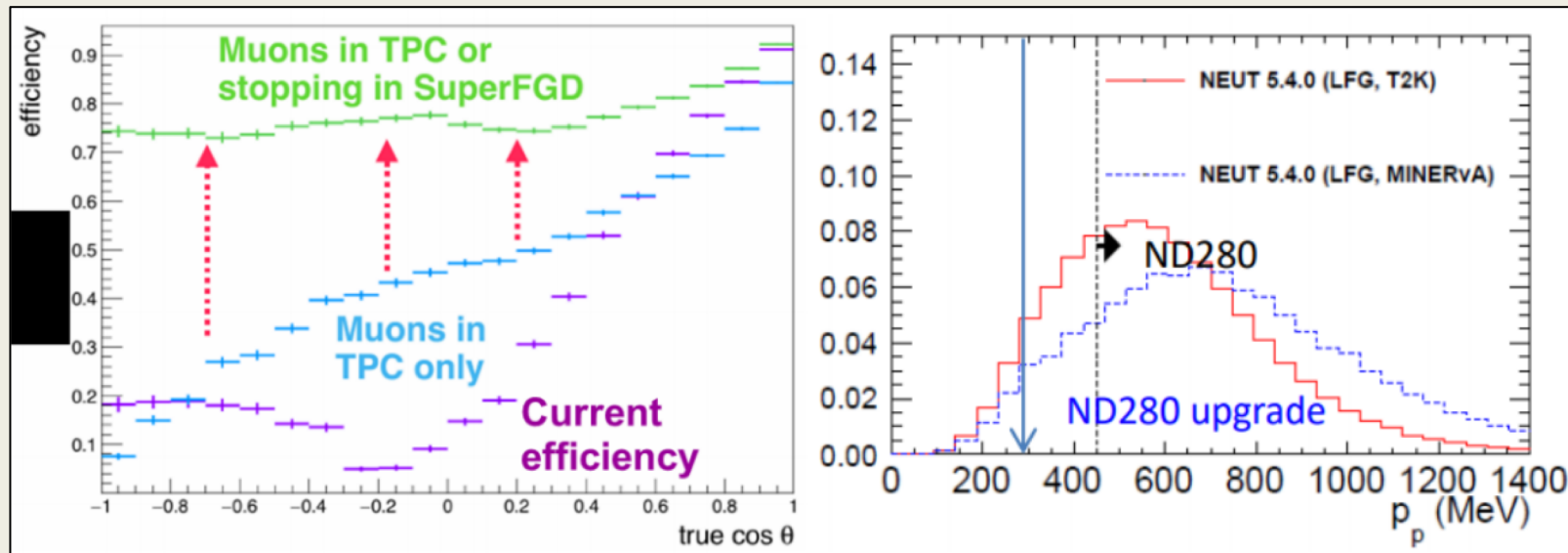
- *Размеры кубика (сегмента): $1 \times 1 \times 1 \text{ см}^3$*
- *Размеры детектора: $192 \times 182 \times 56$ кубиков*
- *Общая масса: ~2 тонн*
- *Количество каналов считывания: ~60,000*



Сигнал с каждого кубика снимается с помощью трех ортогональных спектросмещающих волокон Kuraray Y11 диаметром 1 мм, один из концов каждого волокна просматривается Hamamatsu MPPC



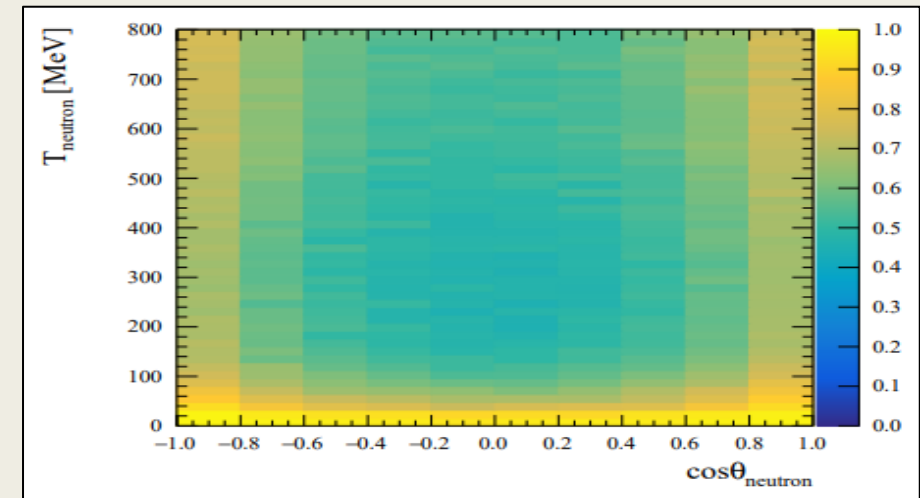
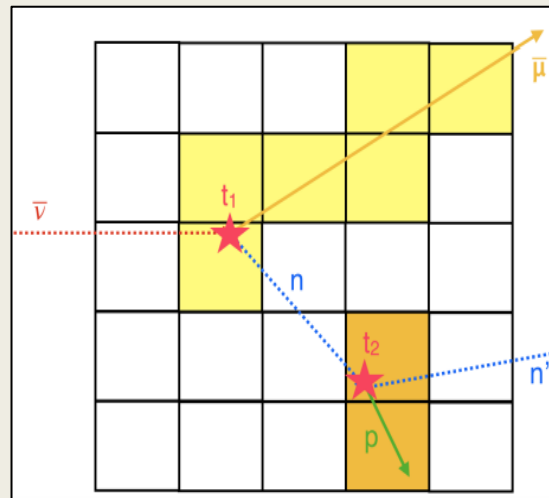
Модернизация ND280



Результаты
МК-моделирования

arXiv: 1912.01511

Нейтрон регистрируется через регистрацию протона, рожденного при вторичном взаимодействии нейтрона. Энергия нейтрона восстанавливается через измерения энергии протона и времени между двумя событиями.



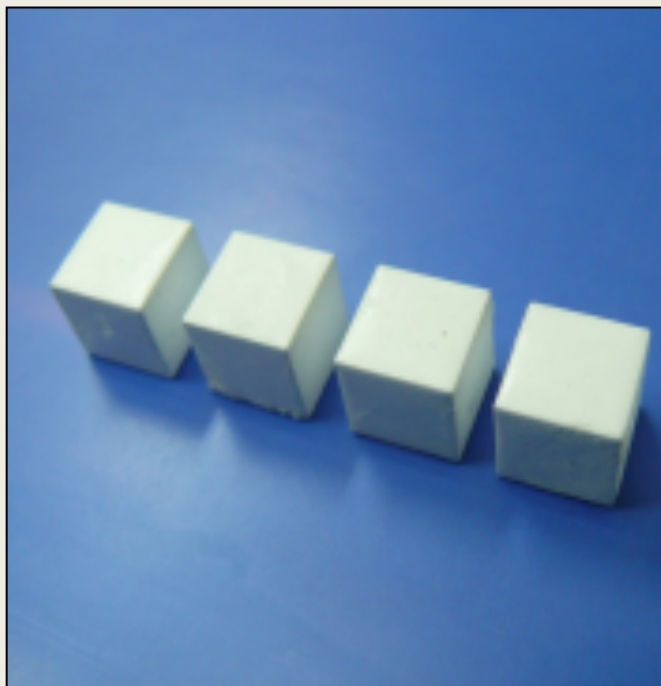
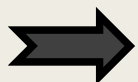
Эффективность регистрации нейтронов

Изготовление кубиков

Кубики изготавливаются методом литья под давлением компанией «Унипласт», расположенной в городе Владимир (Россия). Сцинтиллятор состоит из **полистирола с добавлением 1.5%** паратерфенила (**РТР**) и **0.01%** 1.4-бис(трихлорметил)бензола (**РОРОР**).



После пресс-формы кубики
имеют размеры грани:
10.026 мм

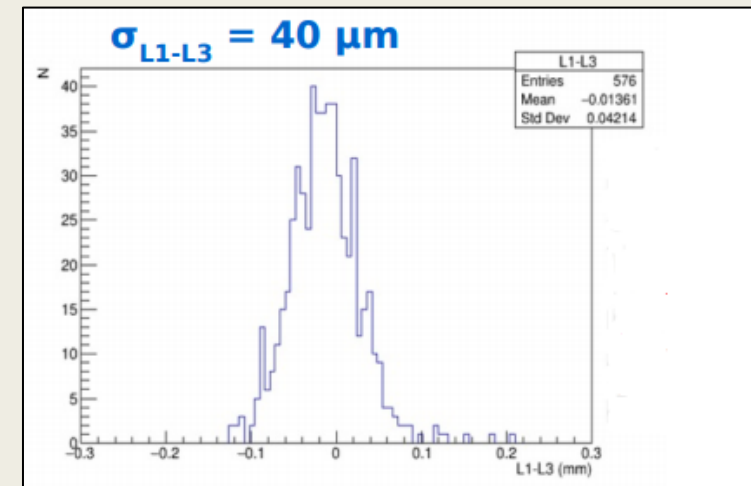
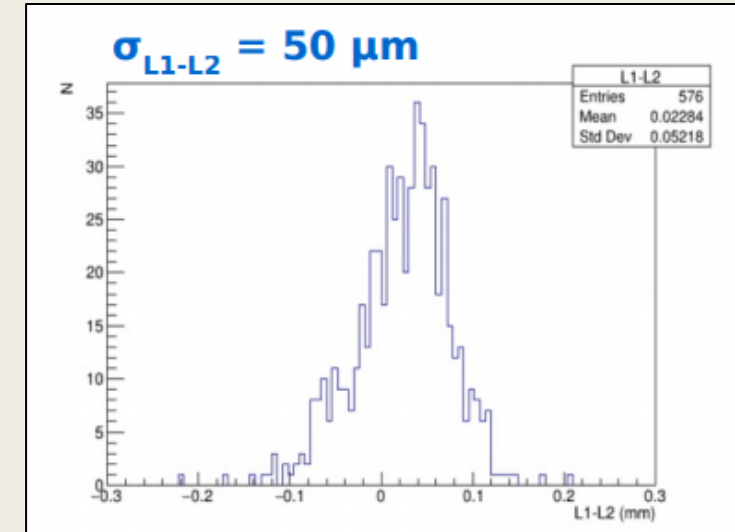
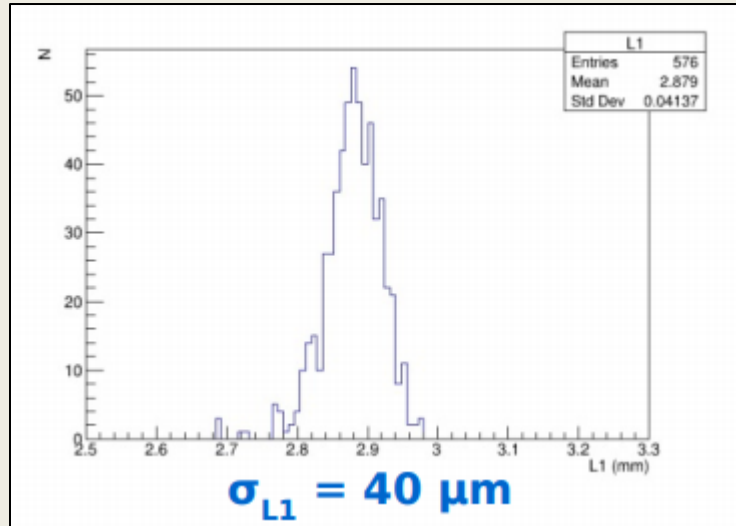
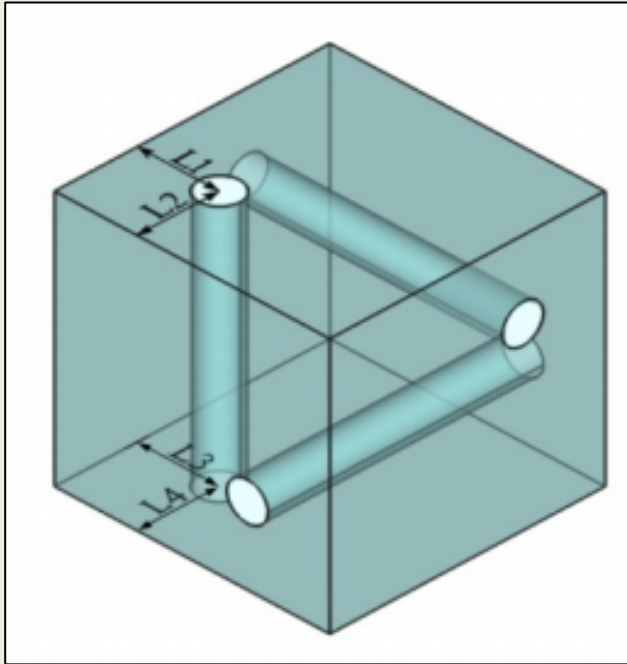


После травления химическим агентом:
10.167 мм ± 30 мкм



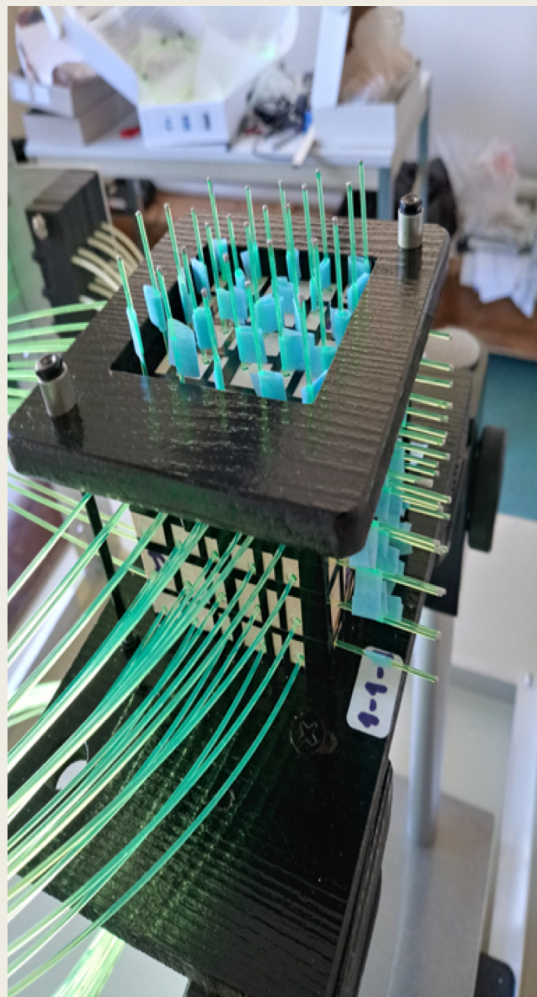
Флуктуации позиционирования
отверстий относительно сторон:
< 50 мкм (СКО)

Геометрические свойства кубиков



Достигнутая геометрическая точность изготовления сцинтилляционных кубиков (*флуктуации размеров грани <30 мкм, флуктуации позиционирования отверстий <50 мкм*) позволяет осуществить полную сборку детектора со спектросмещающими волокнами диаметром 1 мм.

Световыход кубиков

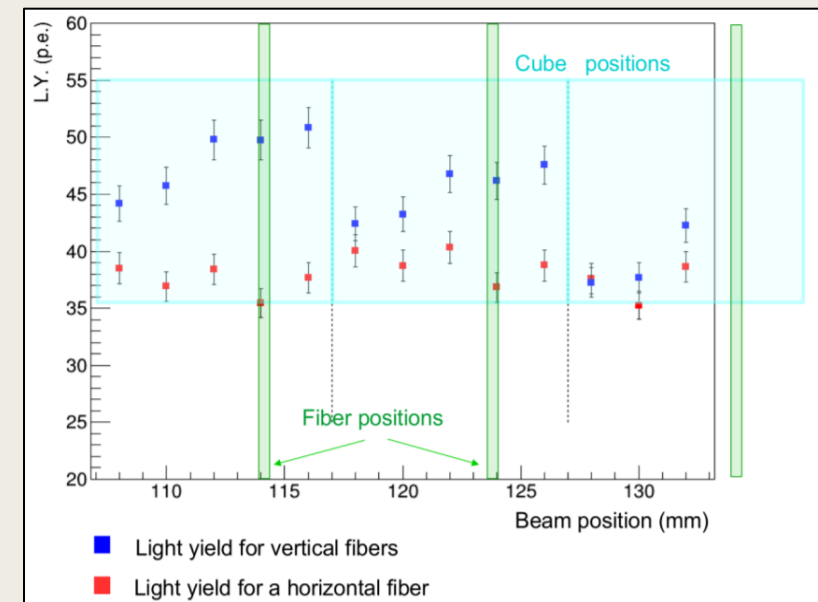
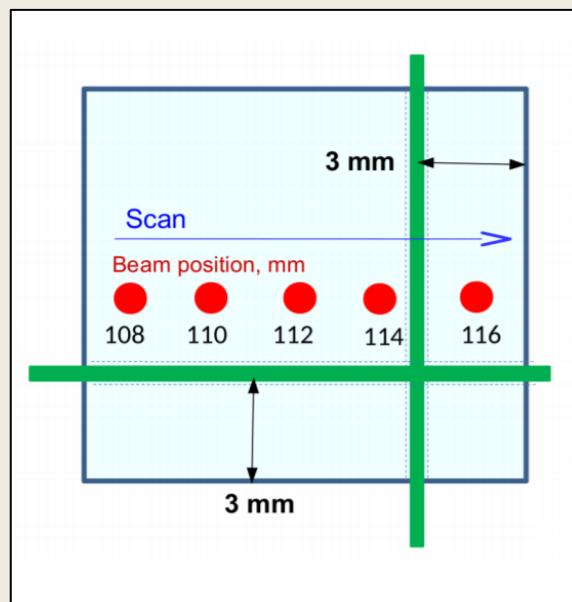


Фотография первого прототипа
детектора **SuperFGD**
[arXiv: 1808.08829](https://arxiv.org/abs/1808.08829)

Осенью 2017 года был осуществлен тест первого прототипа детектора SuperFGD.

Прототип состоял из **125 (5×5×5)** кубиков и имел **75 каналов** для считывания сигнала

Использовались волокна **Kuraray Y11** длиной 1.3 м и **Hamamatsu MPPC s12571-025C**



Средний световыход: с одного кубика на одно волокно **~ 40 ф.э./МНР**,
с одного кубика на два волокна **~ 80 ф.э./МНР**;

Световыход кубиков

Летом 2018 года был осуществлен тест второго прототипа детектора SuperFGD.

Прототип состоял из **9216 (24×8×48)** кубиков и имел **1728 каналов** для считывания сигнала. Длины волокон **Kuraray Y11** соответствовали длинам сторон прототипа

[arXiv: 2008.08861](https://arxiv.org/abs/2008.08861)

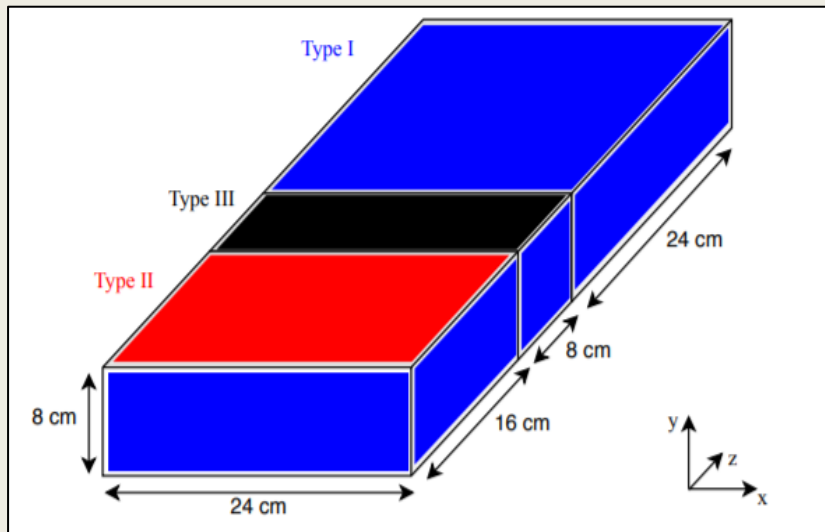
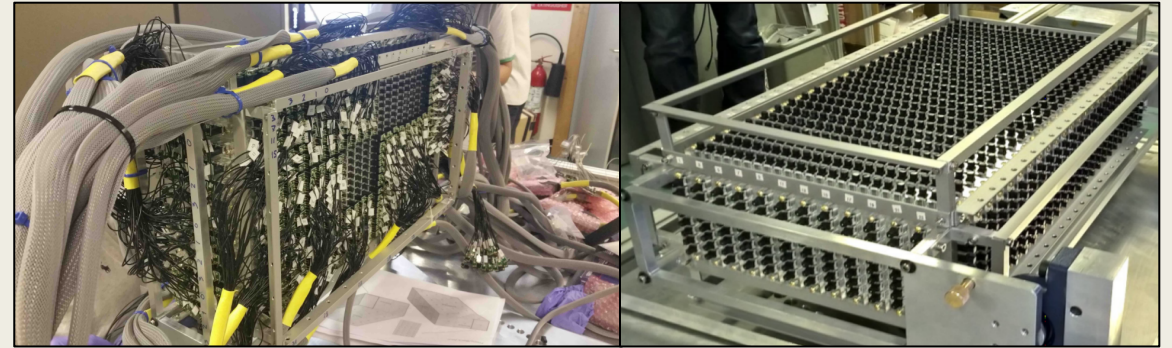


Схема расположения MPPC во втором прототипе детектора **SuperFGD**



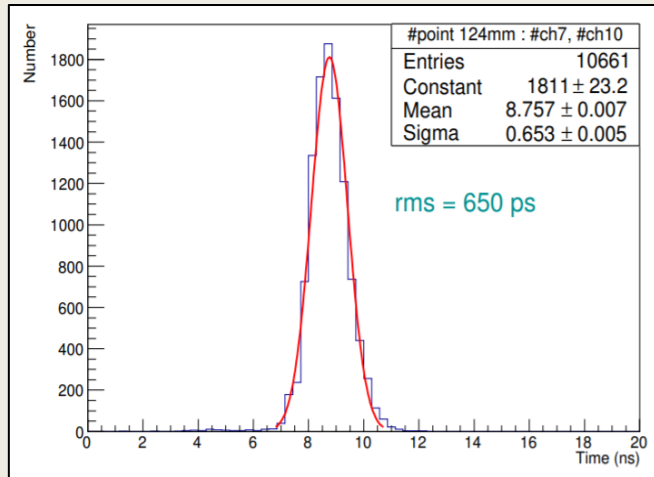
Параметры	Тип 1	Тип 2	Тип 3
Серия	S13360-1325CS	S13081-050CS	S12571-025C
Количество в прототипе	1152	384	192
Размер пикселя [мкм]	25	50	25
Количество пикселей	2668	667	1600
Активная площадь [мм ²]	1.3 × 1.3	1.3 × 1.3	1.0 × 1.0
Рабочее напряжение [В]	56 – 58	53 – 55	67 – 68
PDE [%]	25	35	35
Темновой ток [кГц]	70	90	100
Усиление	7 × 10 ⁵	1.5 × 10 ⁶	5.15 × 10 ⁵
Crosstalk [%]	1	1	10

Параметры MPPC трех типов

Длина волокна	Тип MPPC	Серия MPPC	Количество MPPC	Средний световыход
24 см	Тип 1	S13360-1325CS	384	50.16 ф.э.
8 см	Тип 1	S13360-1325CS	192	52.53 ф.э.
8 см	Тип 2	S13081-050CS	128	51.56 ф.э.
8 см	Тип 3	S12571-025C	64	42.14 ф.э.

Световыходы для MPPC разных типов и разных длин волокон

Временное разрешение

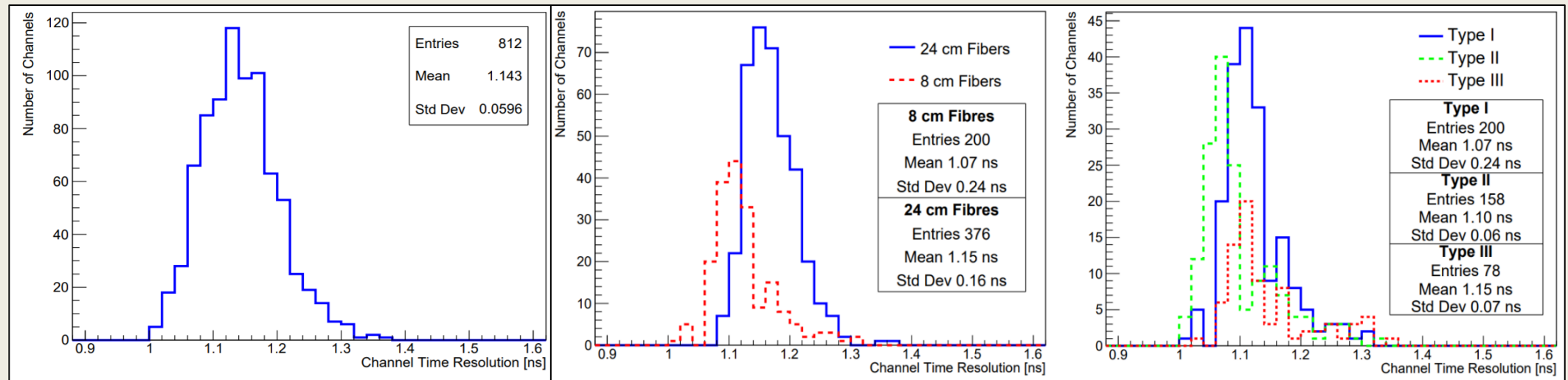


Временное разрешение:

С одного кубика на одно волокно составило **0.95 нс**

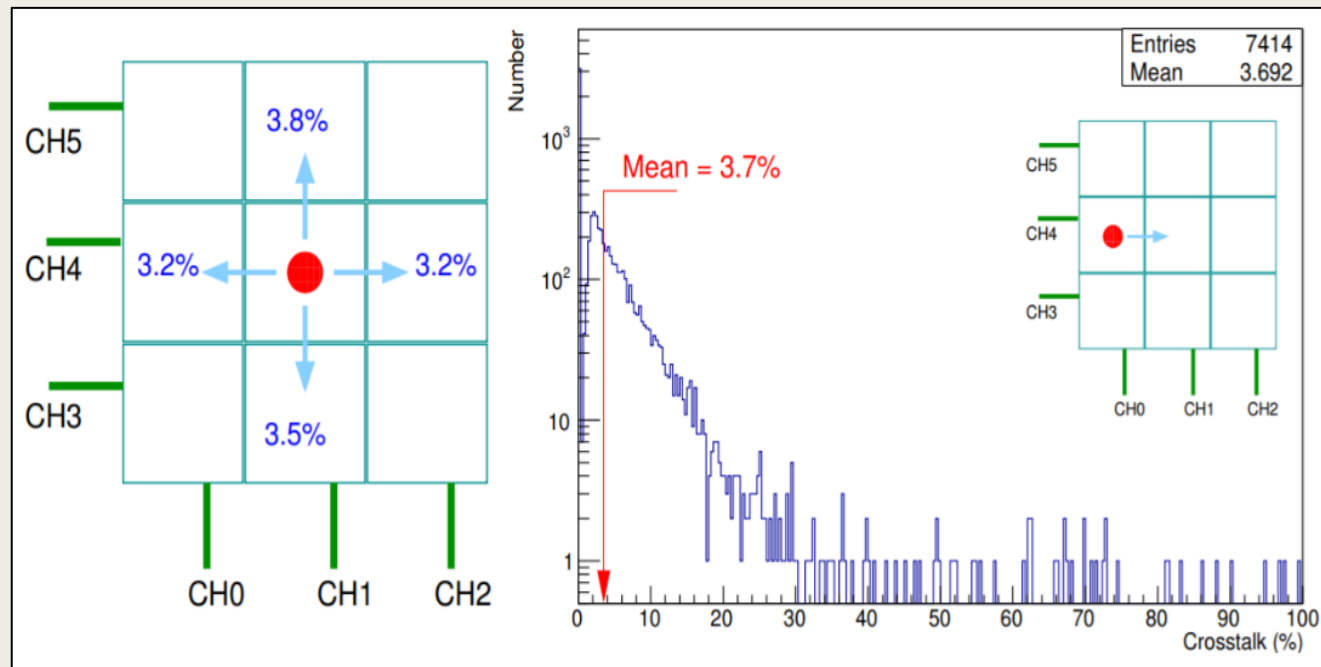
С одного кубика на два волокна **0.65–0.71 нс**

Результаты, полученные при тестировании *первого прототипа* детектора *SuperFGD*

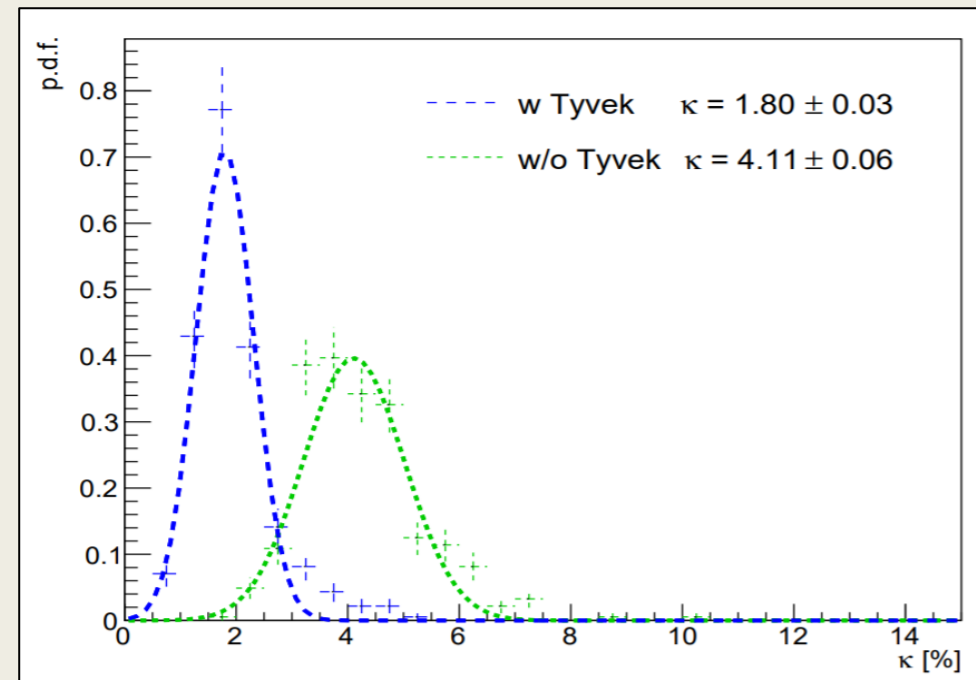


Результаты, полученные при тестировании *второго прототипа* детектора *SuperFGD*. Временные разрешения: для всех MPPC и волокон; для MPPC 1 типа; для волокон длиной 8 см

Оптический crosstalk между кубиками



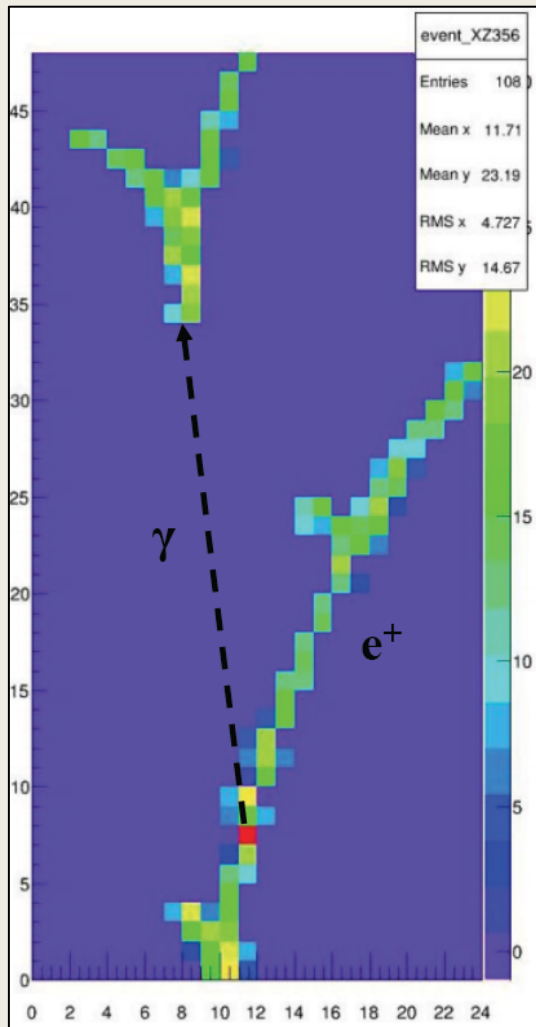
Результаты, полученные при тестировании *первого* прототипа детектора *SuperFGD*



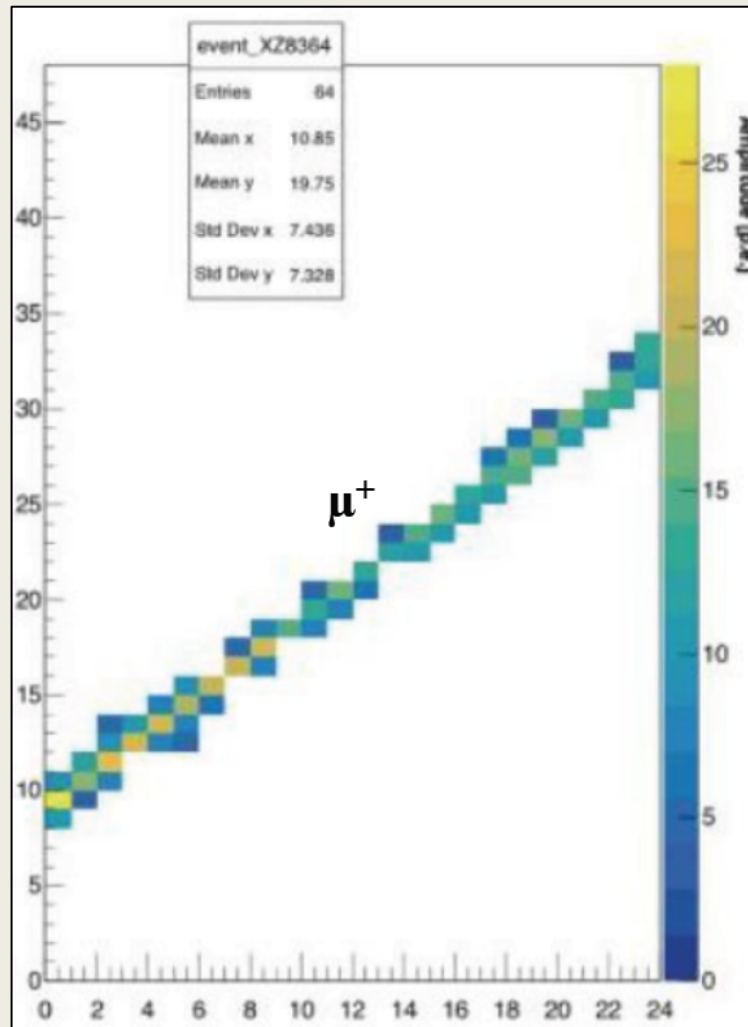
Результаты, полученные при тестировании *второго* прототипа детектора *SuperFGD*

Оптический crosstalk: через одну сторону кубика **$\sim 3\%$** ,
через все 6 сторон кубика **$\sim 20\%$**

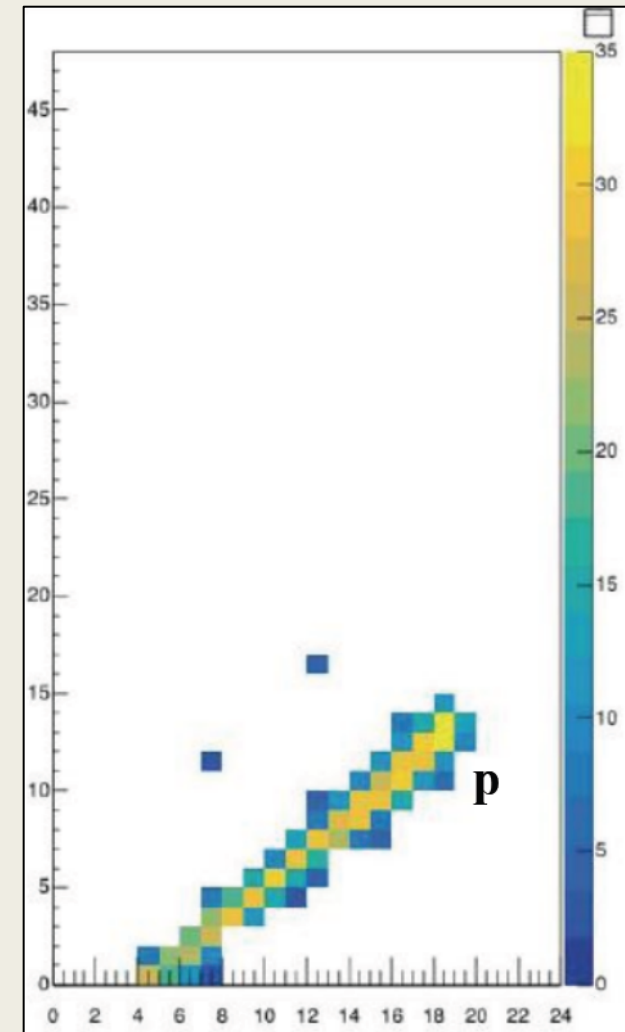
Примеры треков частиц во втором прототипе



Позитрон, 1 ГэВ, $V=0.2$ T

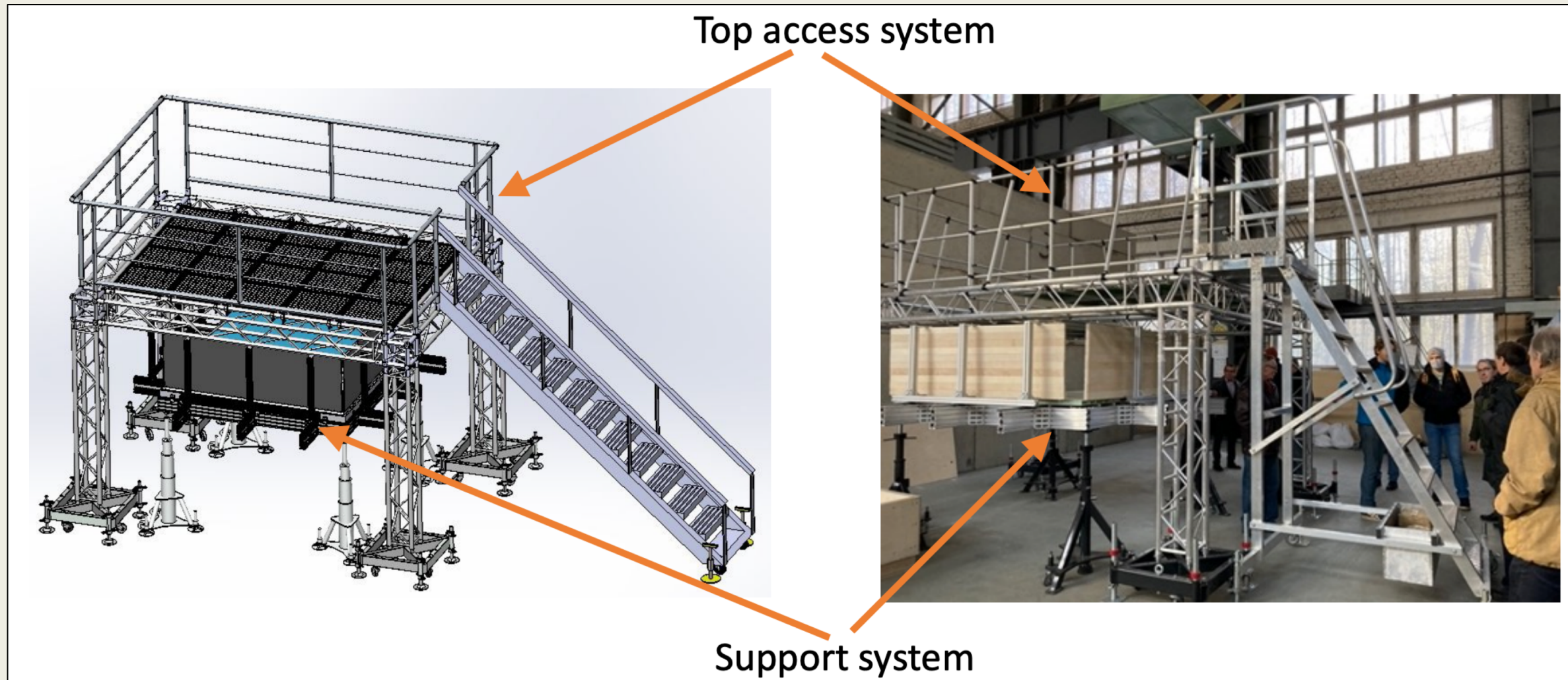


Мюон, 5 ГэВ, прототип установлен под 45 градусов к линии тестового пучка



Остановившийся протон, 0.5 ГэВ, прототип установлен под 45 градусов к линии тестового пучка

Сборка детектора SuperFGD



Статус детектора SuperFGD



24 июня 2022 года
Все кубики были доставлены
в Японию



23 июля 2022 года
Платформа для сборки
доставлена в Японию

Планируемое время начала сборки
детектора **октябрь 2022 года**

Планируемая продолжительность
сборки детектора 4 месяца

Заключение

- Сцинтилляционные кубики и платформа для сборки доставлены в Японию
- По геометрическим параметрам для сборки в детекторе были отобраны **95% кубиков**
- В ходе тестирования двух прототипов были определены основные параметры будущего детектора:
 - Средний световыход с одного кубика на волокно составил **40 ф.э./МIP**
 - Временное разрешение кубика при снятии сигнала с одного волокна составило **0.95 нс**, а с двух волокон **0.65–0.71 нс**
 - Оптический crosstalk через одну сторону кубика оценивается на уровне в **3%**
- При тестировании второго прототипа детектора SuperFGD были получены примеры треков от различных частиц

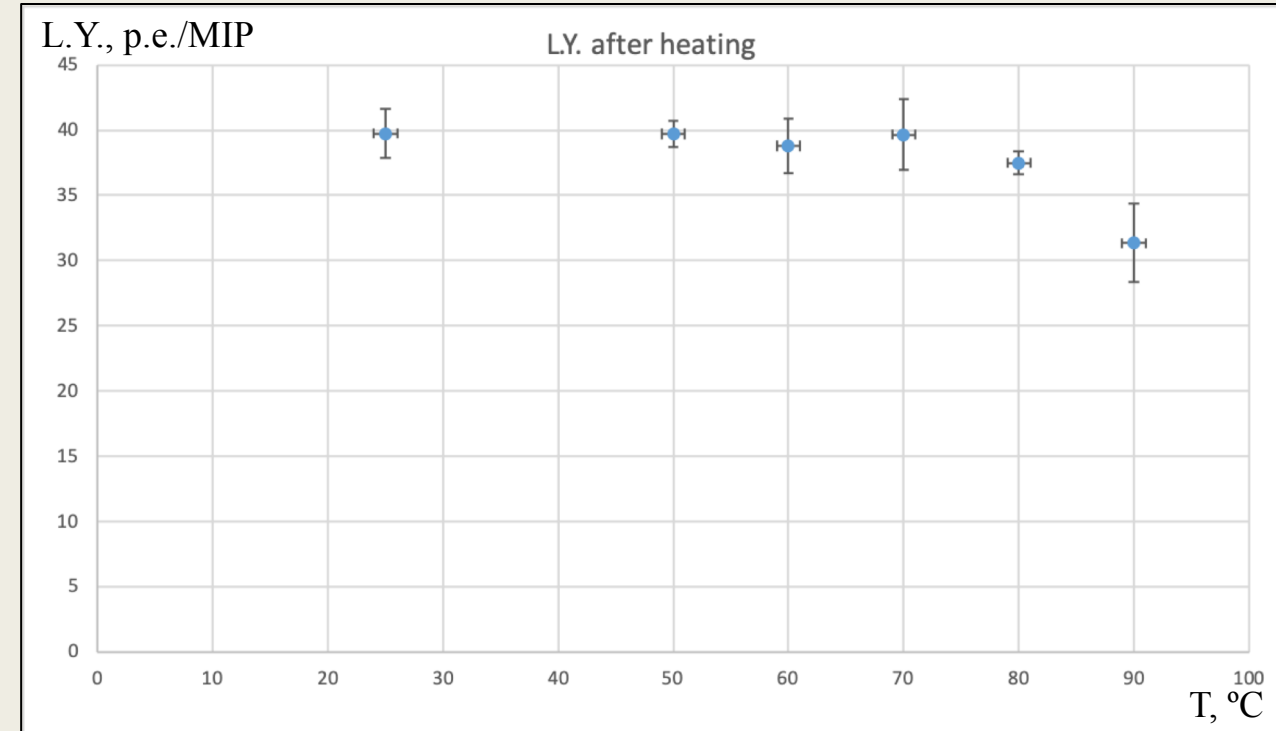
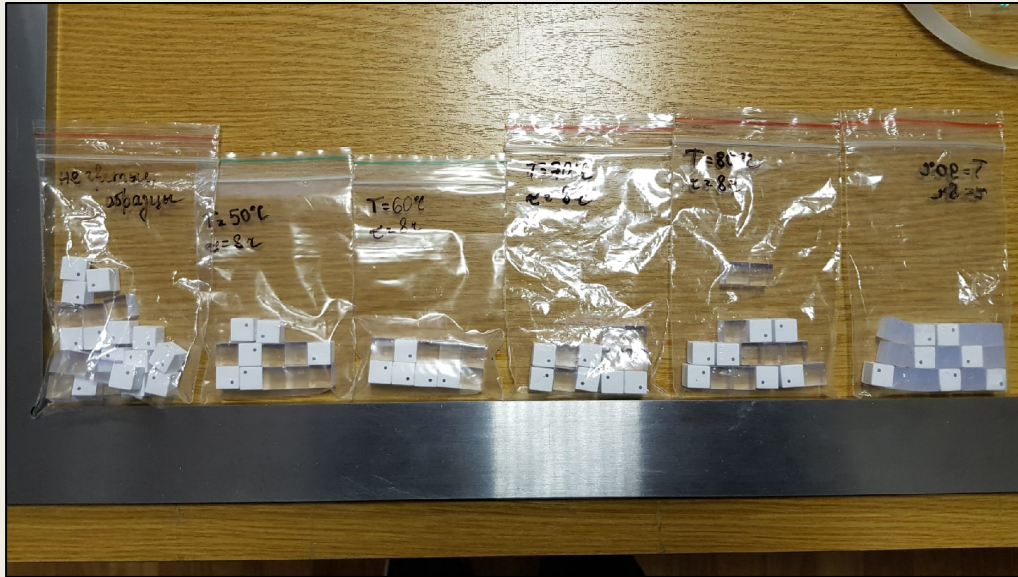
Планируется начать финальную сборку
детектора в **октябре 2022 года**



**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ**



Температурные тесты



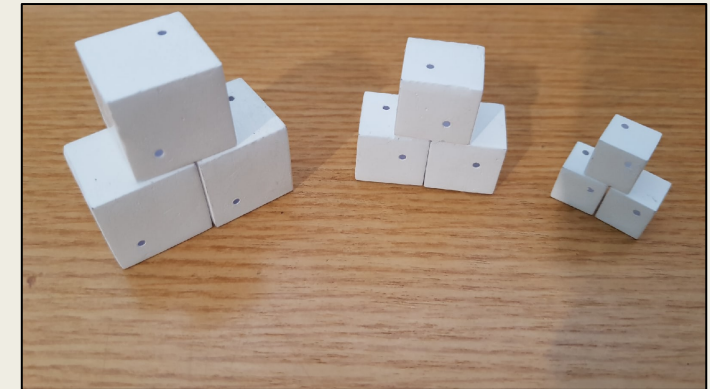
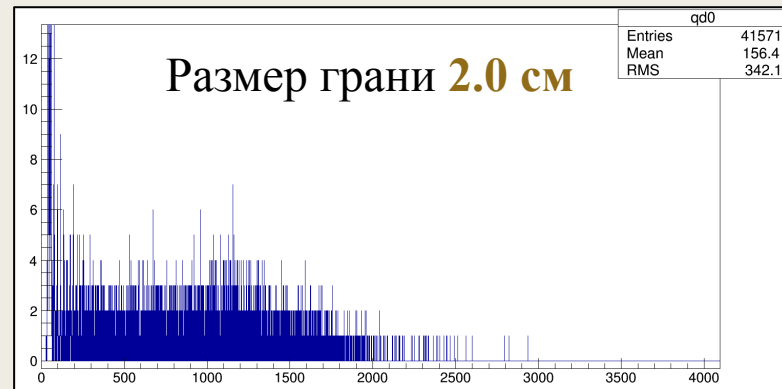
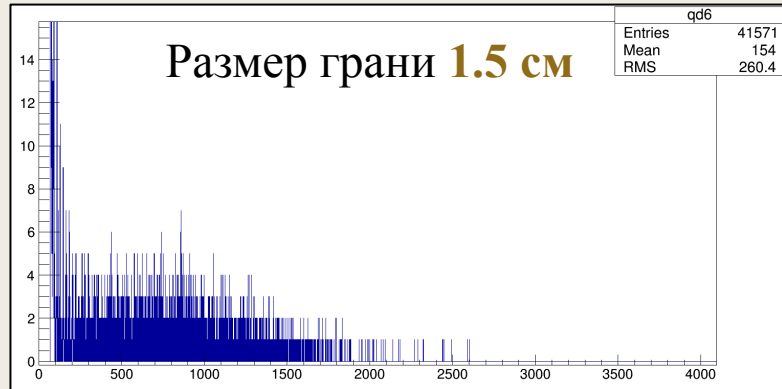
Ухудшение сцинтилляционных свойств наблюдается при нагревании кубиков на температуру больше, чем 70 °C

Нахождение кубиков в течении 17 часов при температуре 60 °C не привело к видимому эффекту

Сцинтилляционные кубики большего размера

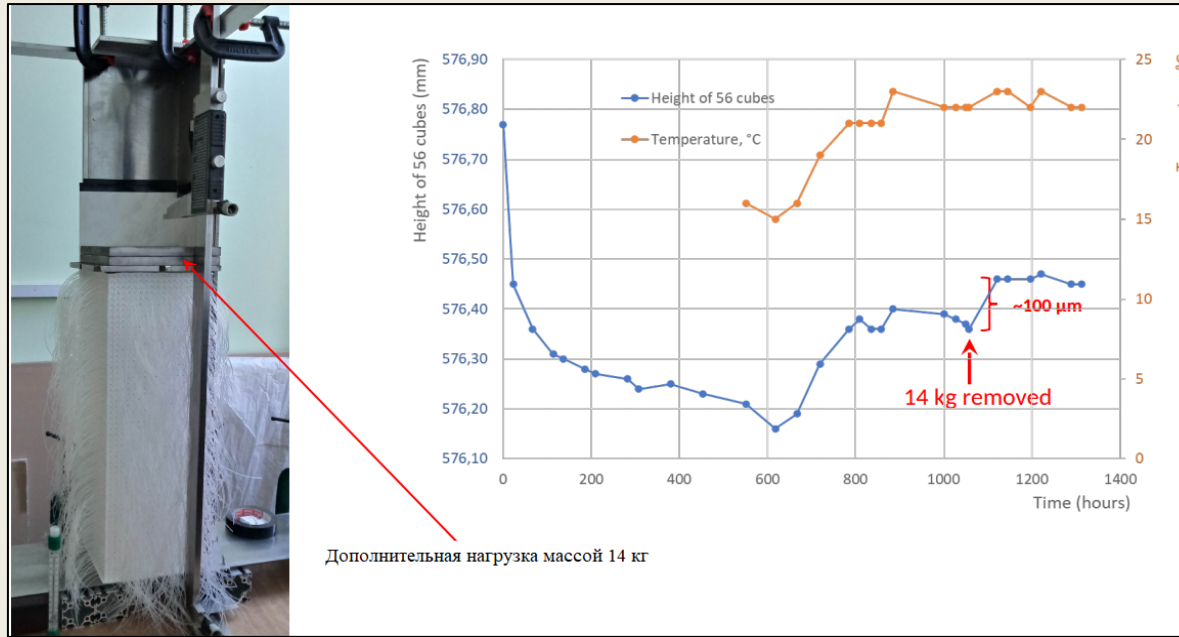
Световыходы:

- Размер грани **1.0 см**: **25 ф.э.** (обычные кубики для SuperFGD, меньший световыход в данных тестах объясняется разницей экспериментальных установок по сравнению с предыдущими тестами)
- Размер грани **1.5 см**: **37 ф.э.**
- Размер грани **2.0 см**: **50 ф.э.**



Кубики большего размера рассматриваются в качестве основных элементов при создании детектора **3DST** (3D projection scintillator tracker) эксперимента **DUNE** (Deep Underground Neutrino Experiment)

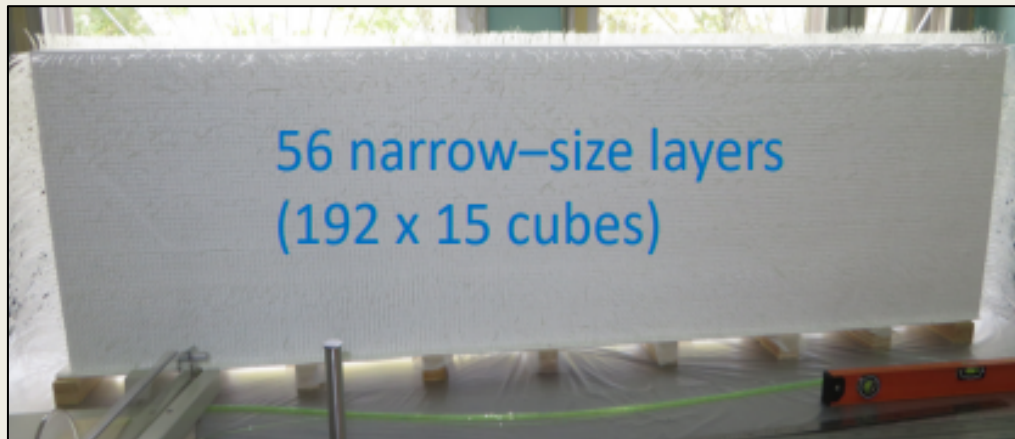
Контроль геометрических свойств кубиков



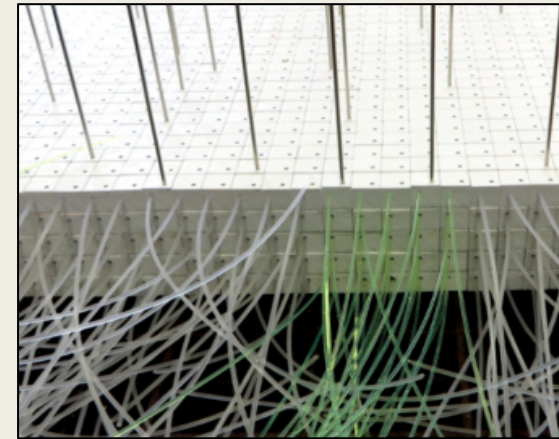
95% кубиков были **отобраны по геометрическим параметрам** для сборки в детекторе

Шаг между отверстиями в детекторе:

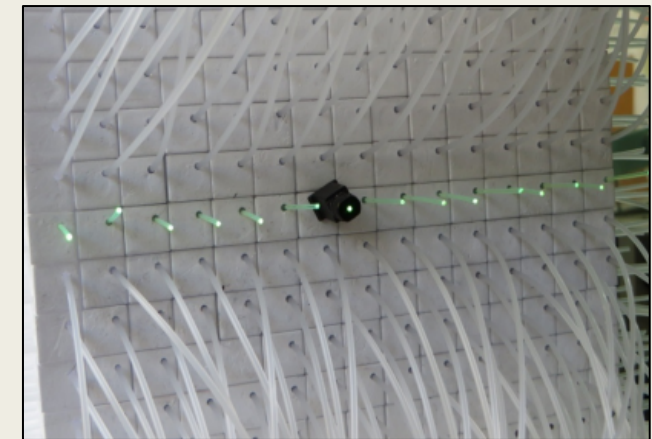
- **10.30 мм** в горизонтальной плоскости
- **10.28 мм** в вертикальной плоскости



Полноразмерный прототип, состоящий из 56 плоскостей
192 × 15 кубиков

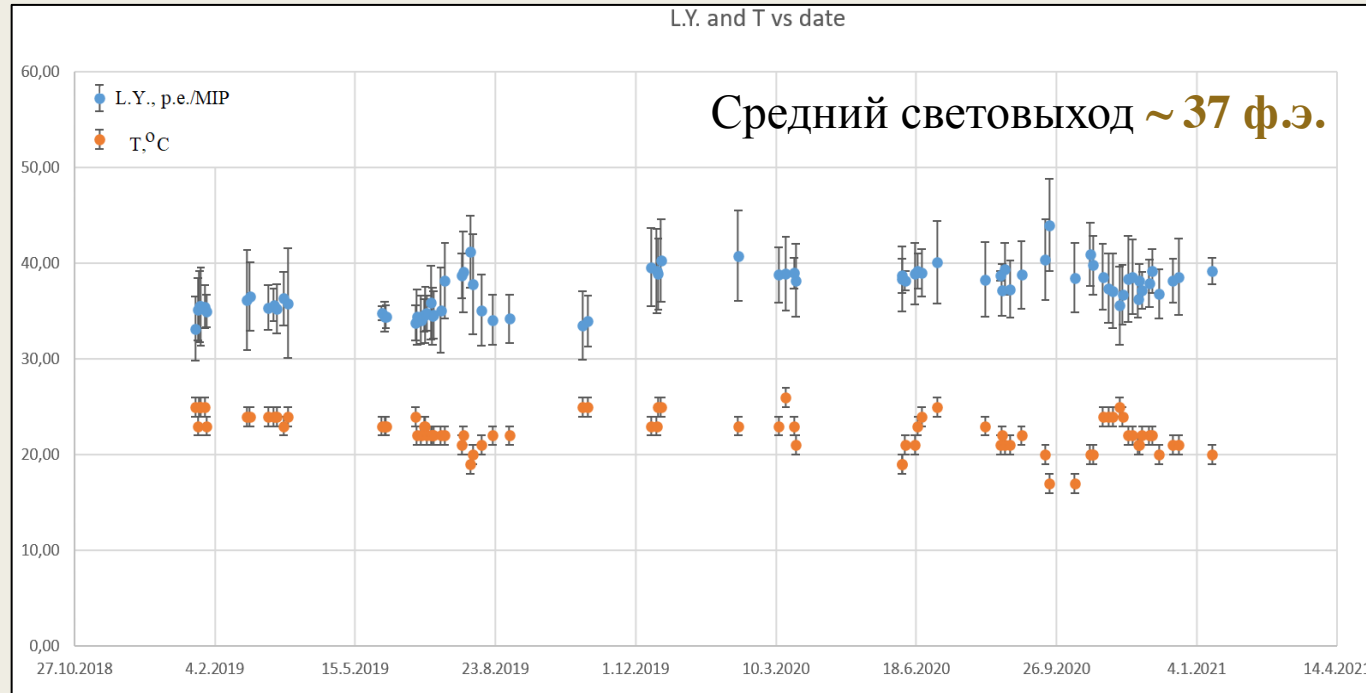


Полноразмерный прототип,
состоящий из 5 плоскостей 192
× 184 кубика.



Фотография прототипа после
замены в нескольких каналах лесок
на волокно

Контроль сцинтилляционных свойств кубиков



Результаты тестов по контролю качества кубиков. Синие точки: средний световыход в ф.э с 24 кубиков. Оранжевые точки: температура в градусах Цельсия во время тестов.

- Тестирование с помощью космических мюонов
- Размер верхнего триггера 100×100 мм²
- Размер нижнего триггера 120×100 мм²
- Одновременно тестировались 8 волокон с 3 кубиками на каждом
- Длина волокон 35 см
- Фотодиод MPPC Hamamatsu S13081-050C
- Одна точка на графике – средний световыход с 8 волокон

Экспериментальная установка для тестов на космических мюонах

