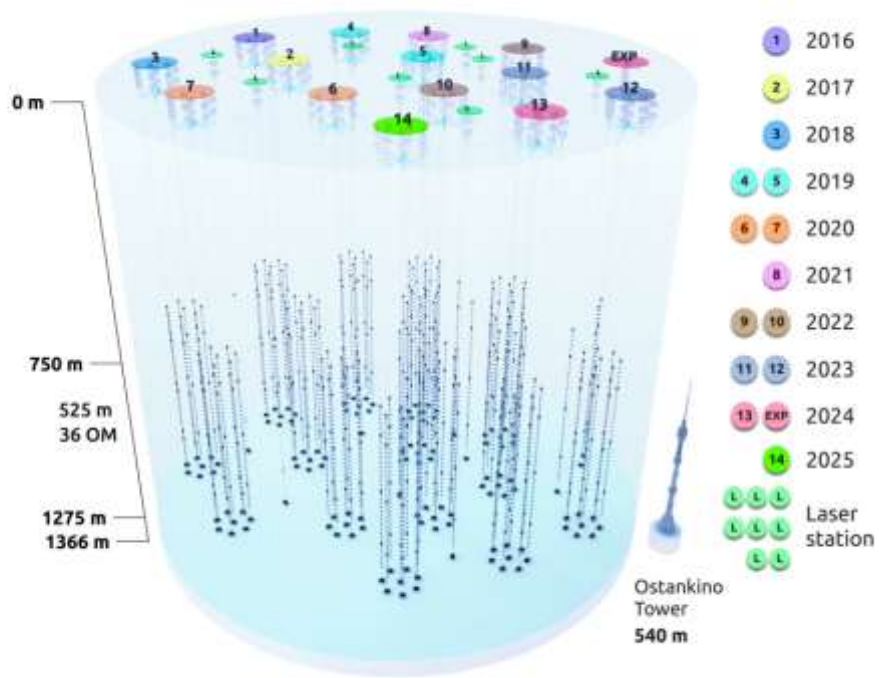




Исследование отклика оптических модулей Baikal-GVD на черенковское излучение от окологоризонтальных мюонов внутри детектора НЕВОД

С.С.Хохлов от коллаборации Baikal-GVD
г. Новосибирск, 10-13 марта 2026

Нейтринный телескоп Baikal-GVD

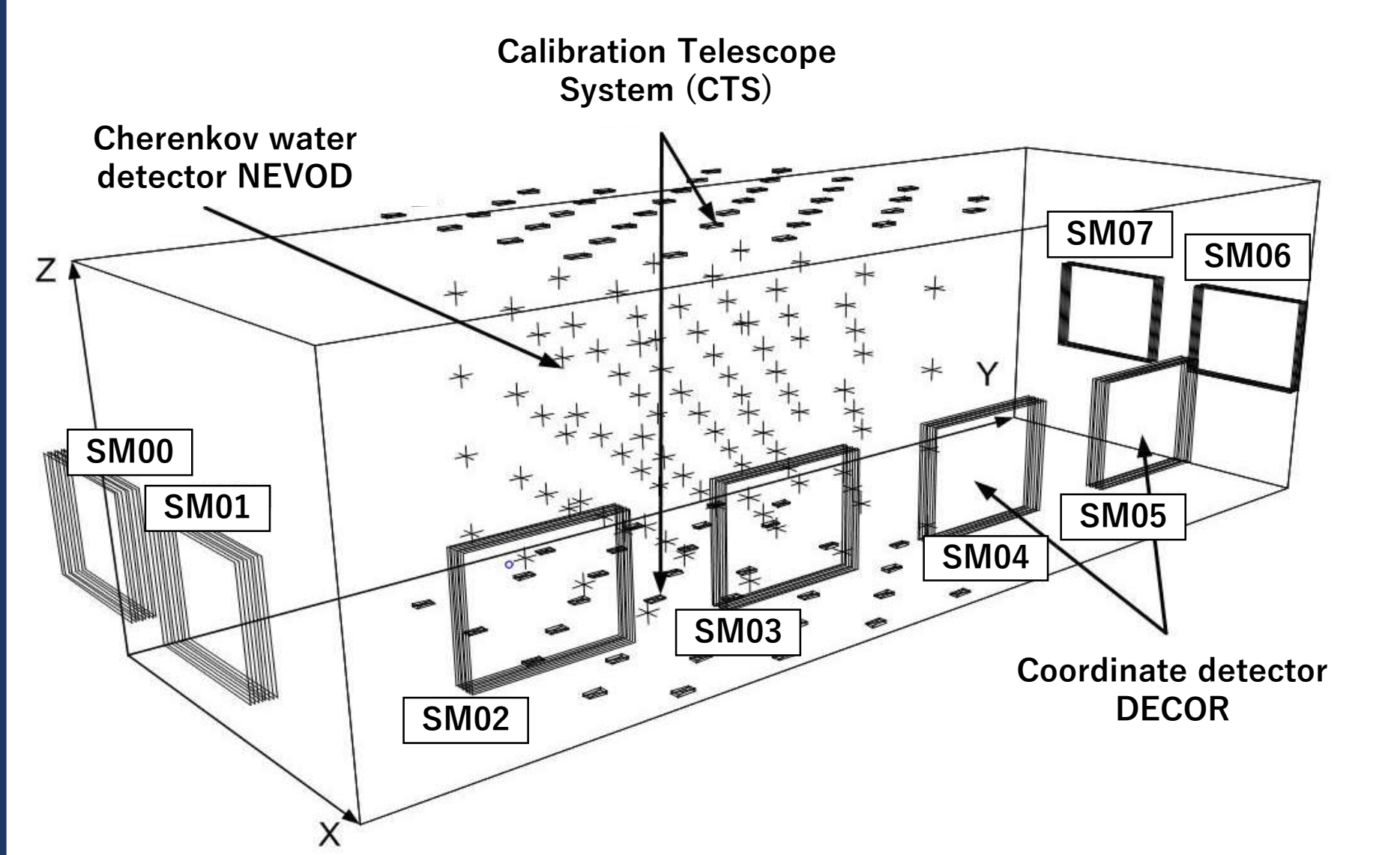


- 14 кластеров, 117 гирлянд, 4212 оптических модуля (ОМ)
- В кластере 8 или 9 гирлянд из 36 ОМ
- Глубины размещения ОМ – 750-1275 м
- Расстояние между ОМ – 15 м

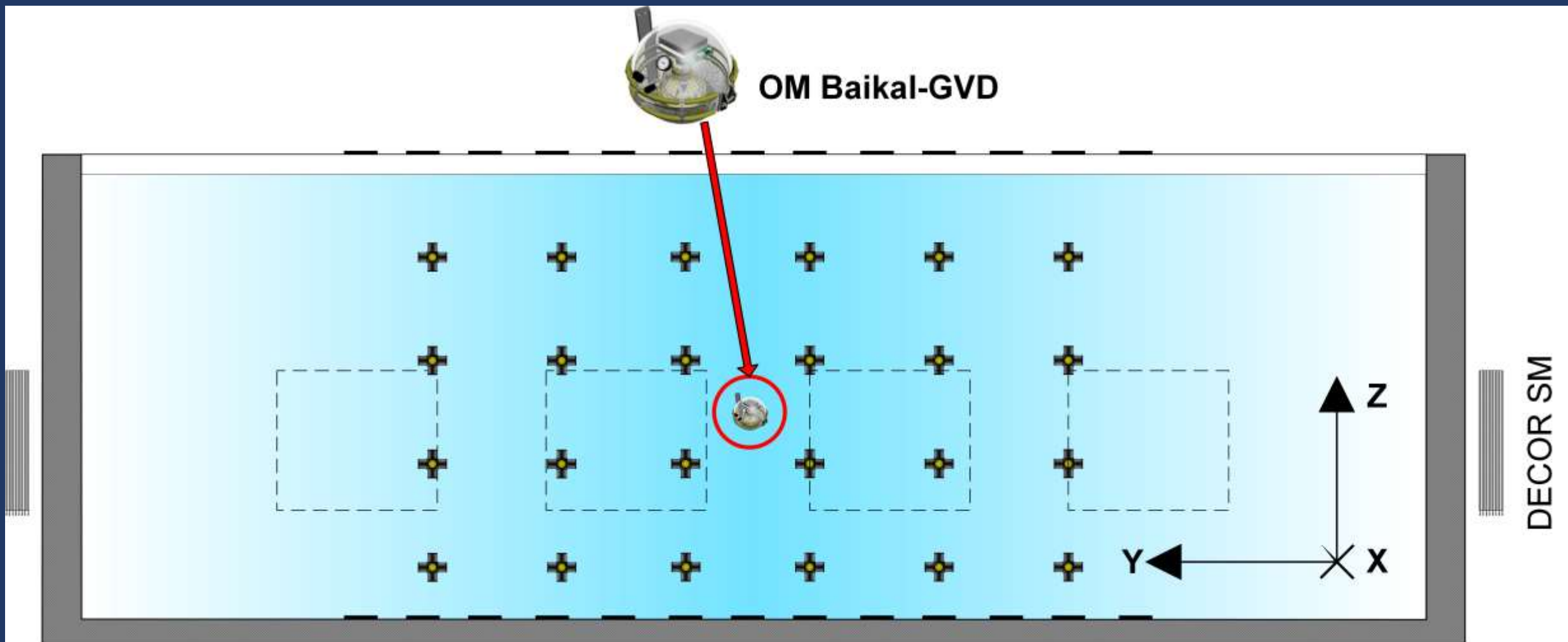
Одной из важнейших характеристик ОМ является зависимость отклика от угла прихода черенковского излучения



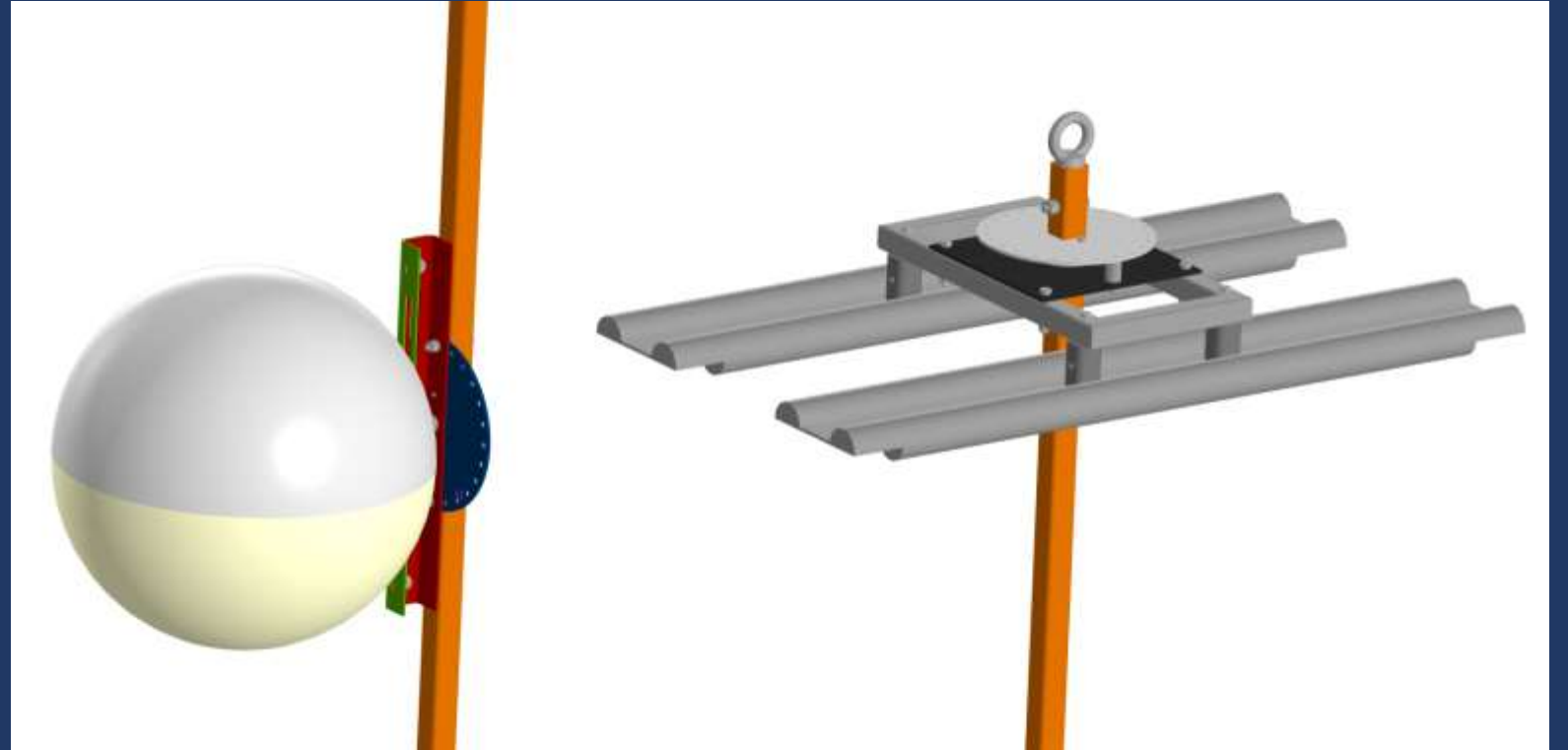
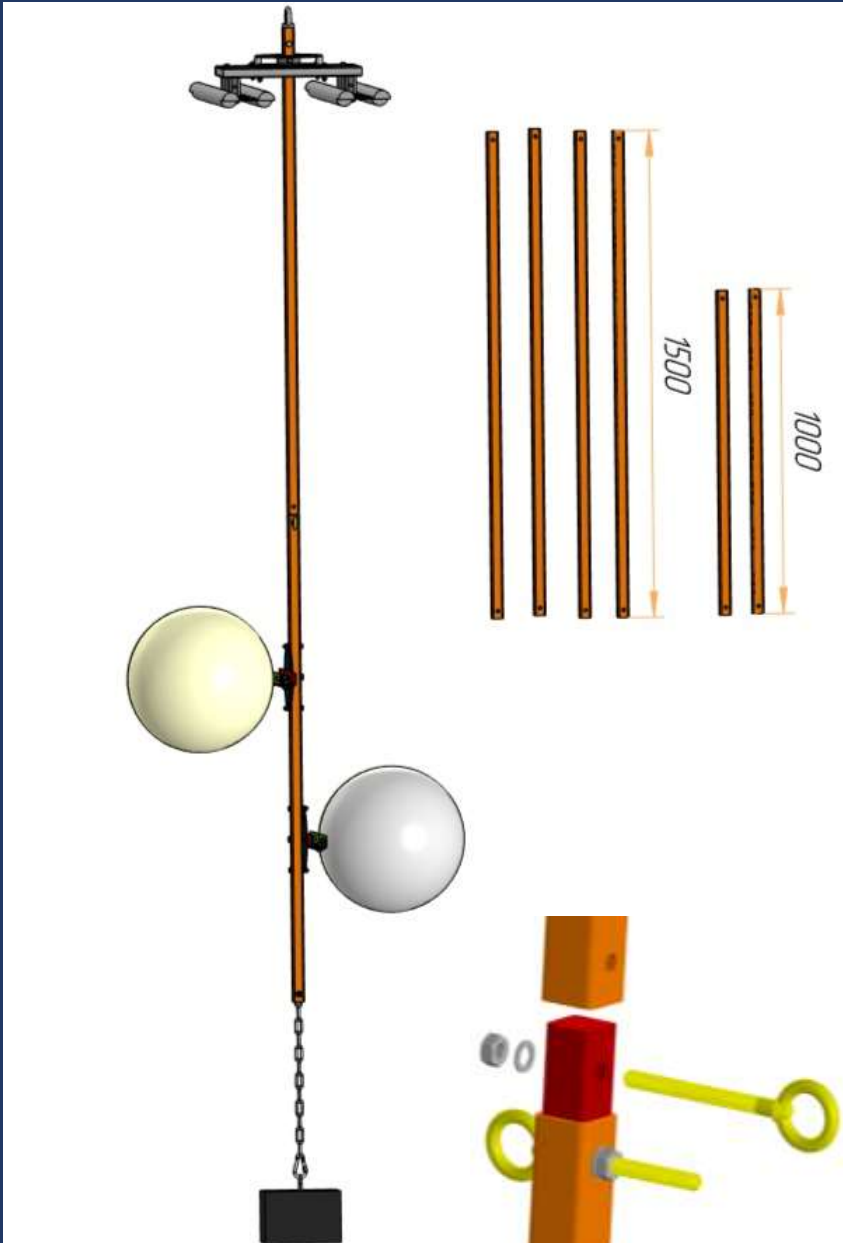
Установки НЕВОД-ДЕКОР



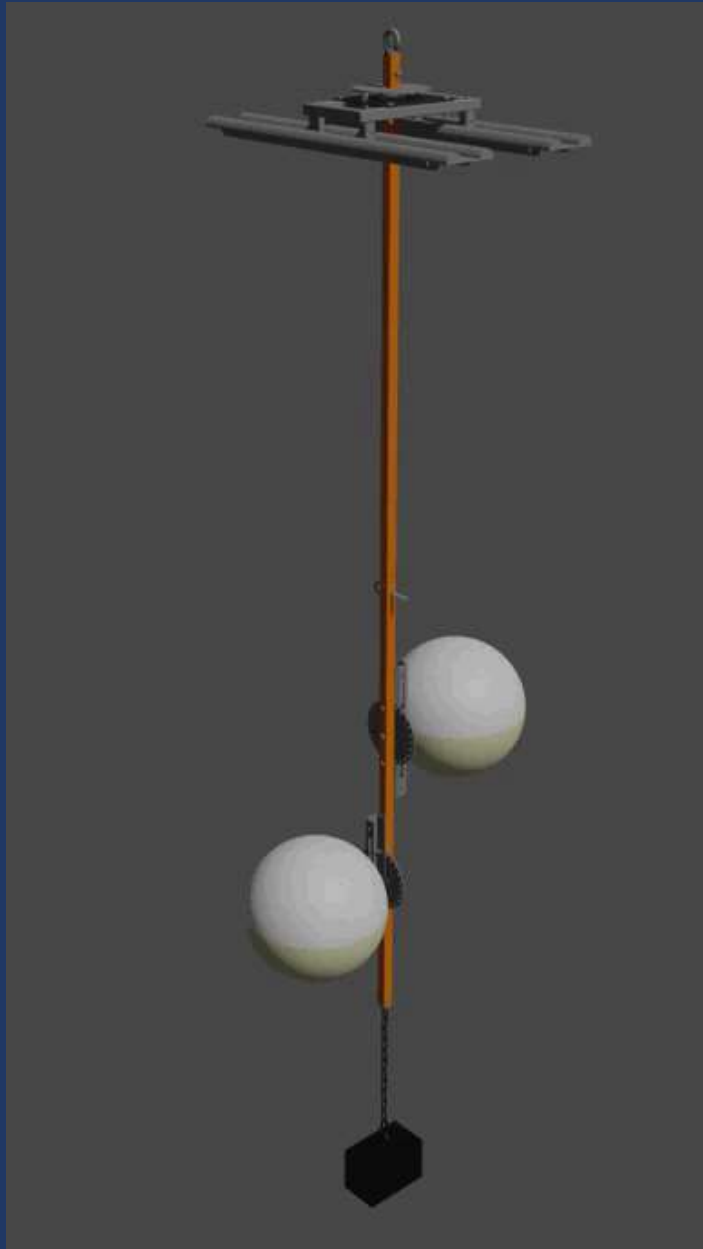
Размещение ОМ Ваikal-GVD в бассейне



Система крепления ОМ



Оси вращения ОМ



Оптический модуль внутри детектирующей решетки НЕВОД

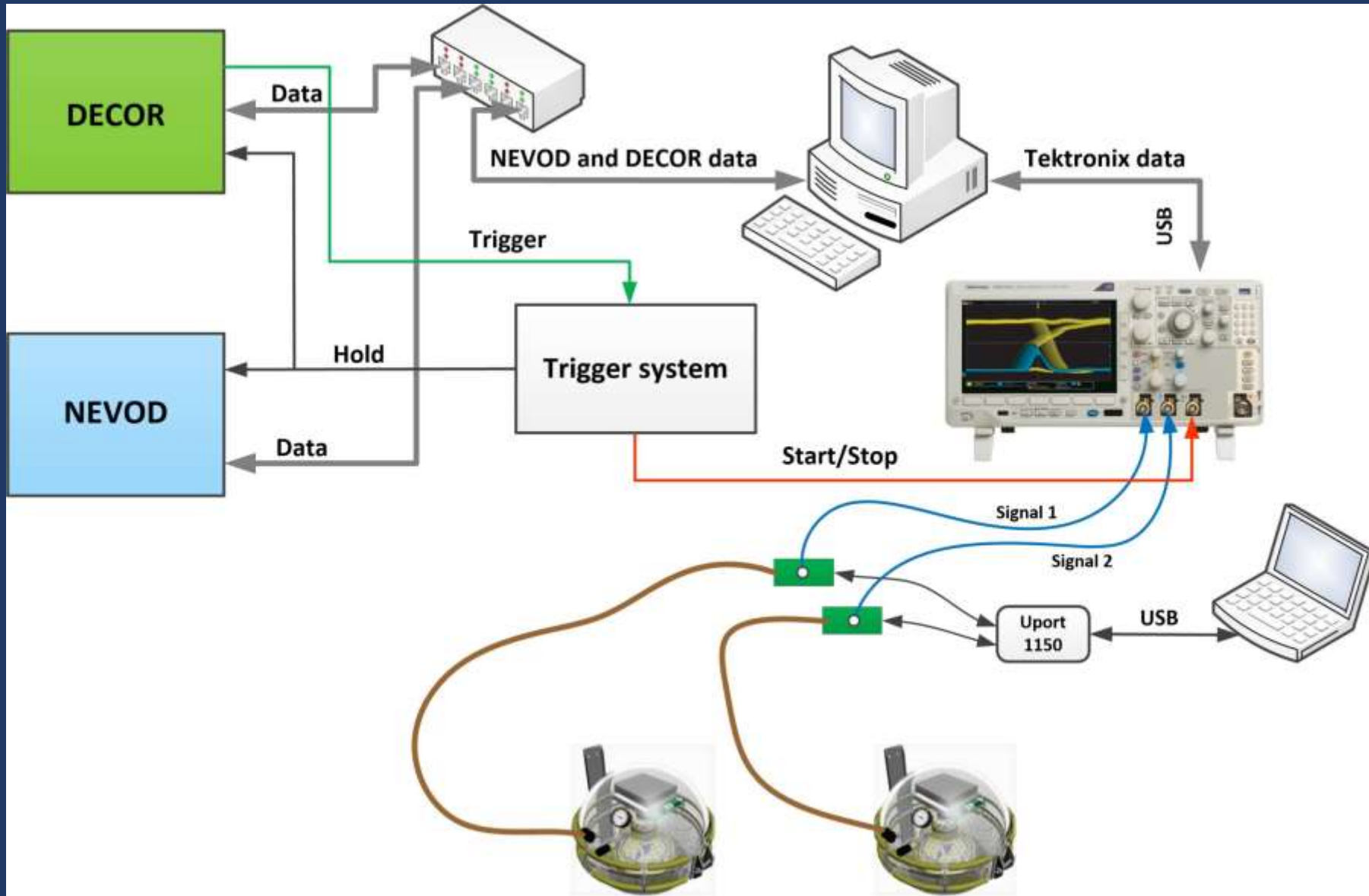


Координатный детектор ДЕКОР

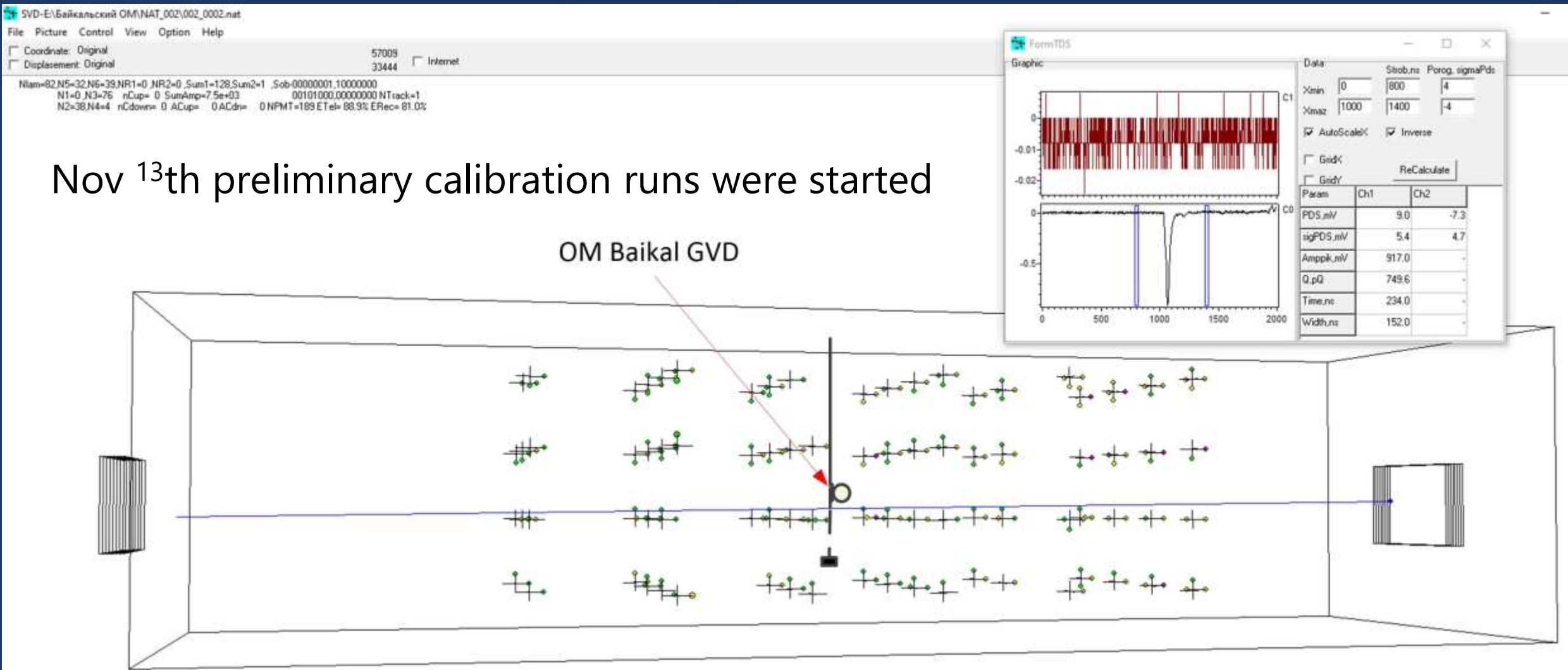


8 supermodules x 8 layers of plastic streamer tube chambers

Интегрирование ОМ в триггерную систему



Пример события



Counting rate of near-horizontal muons is 80-85 per/hour (10 000 per/week)

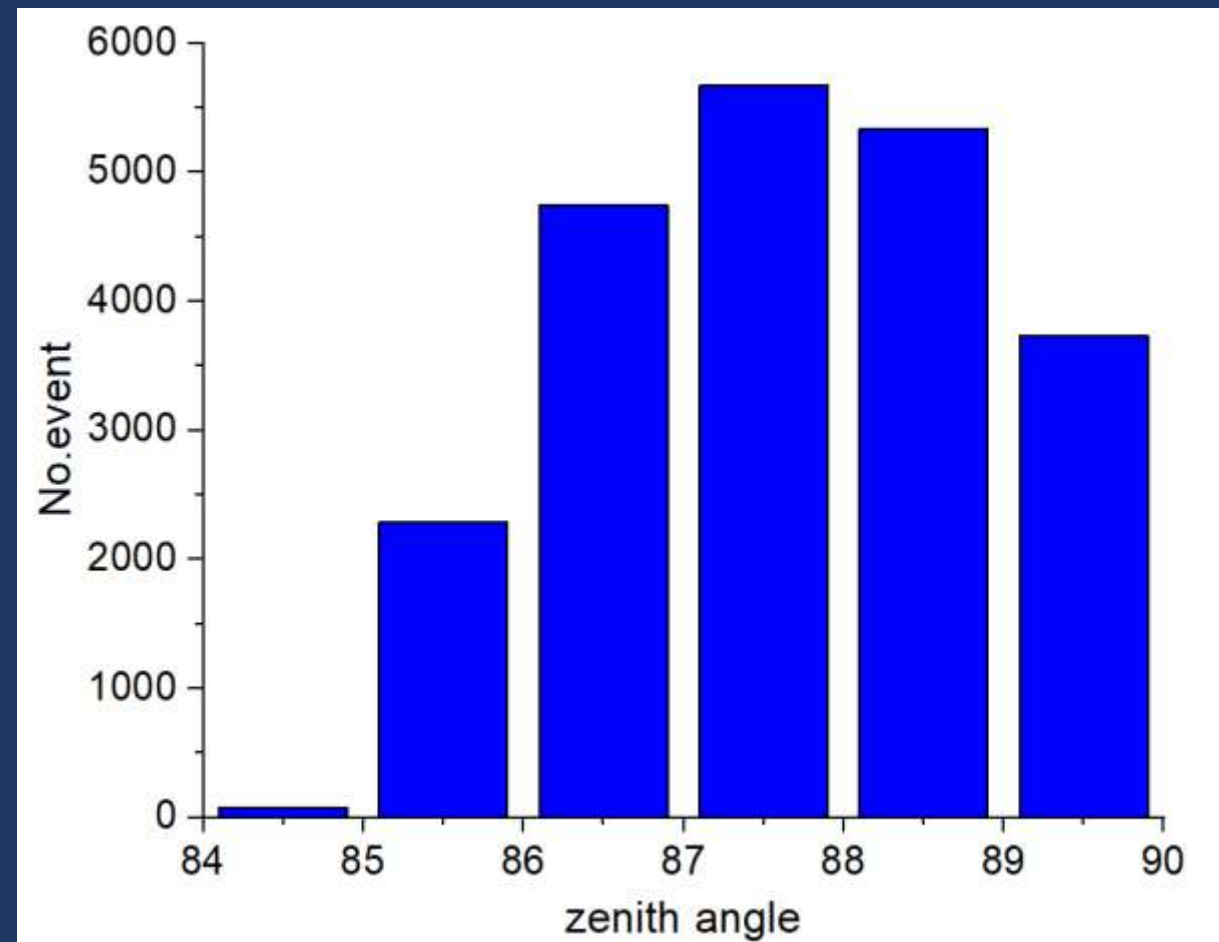
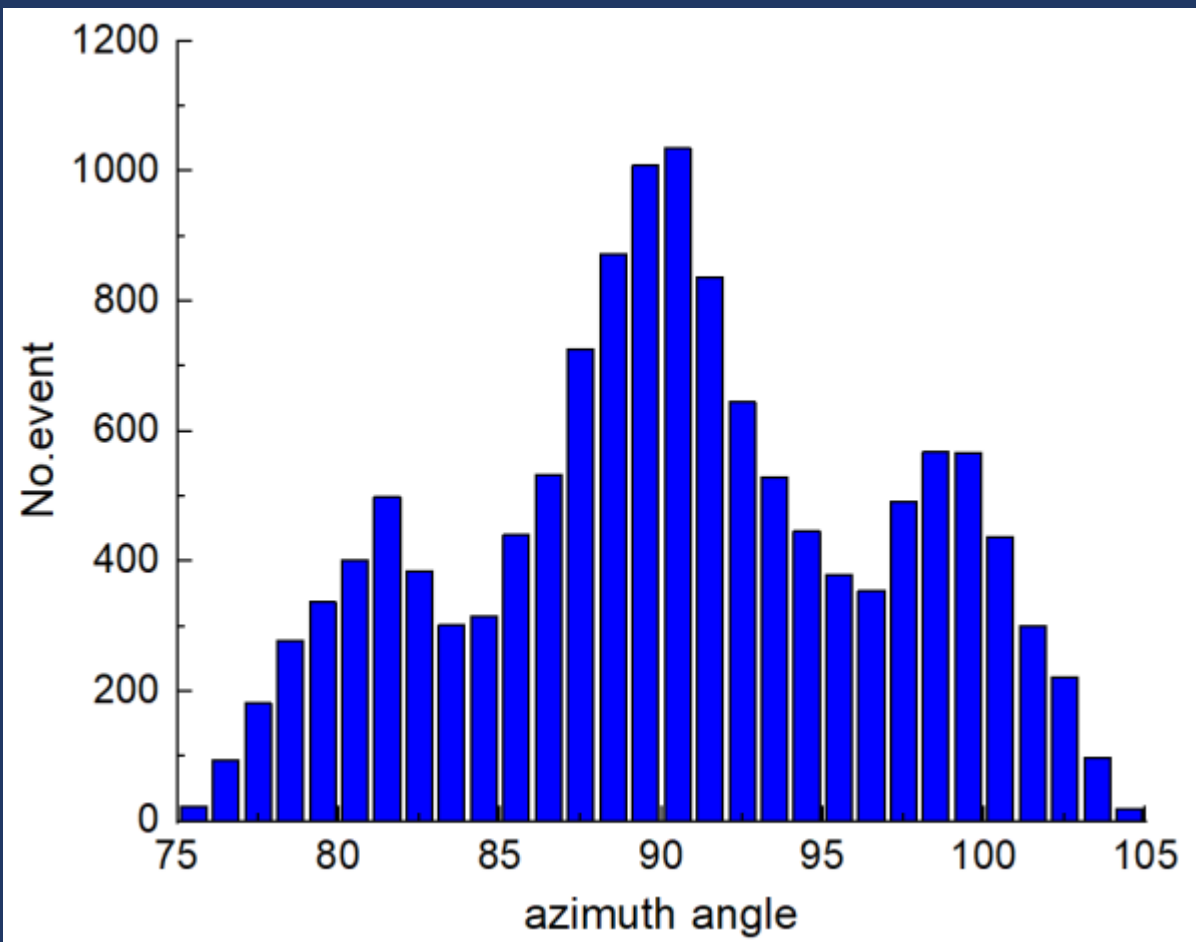
Экспериментальные серии по калибровке ОМ

- Первая серия:
 - 26.12.24 - 05.03.25
 - 125 600 около-горизонтальных мюонов.
- Вторая серия:
 - 03.07.25 - 02.10.25
 - 195 800 около-горизонтальных мюонов.

Угловые распределения мюонов

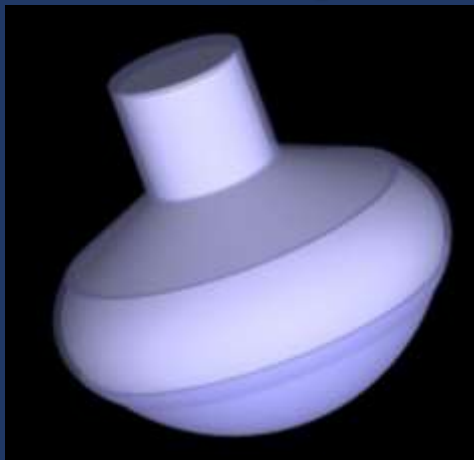
Азимутальные углы

Зенитные углы



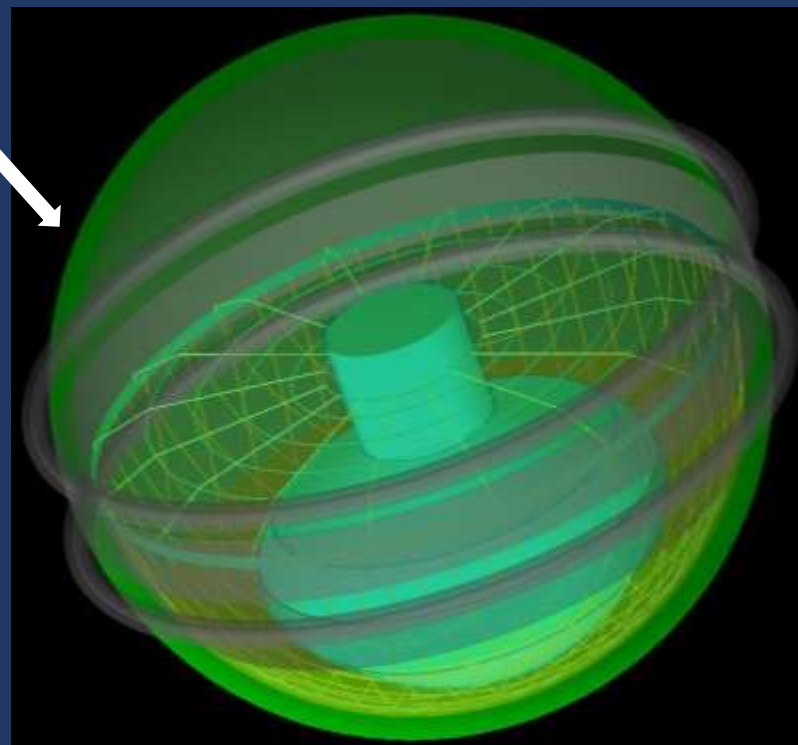
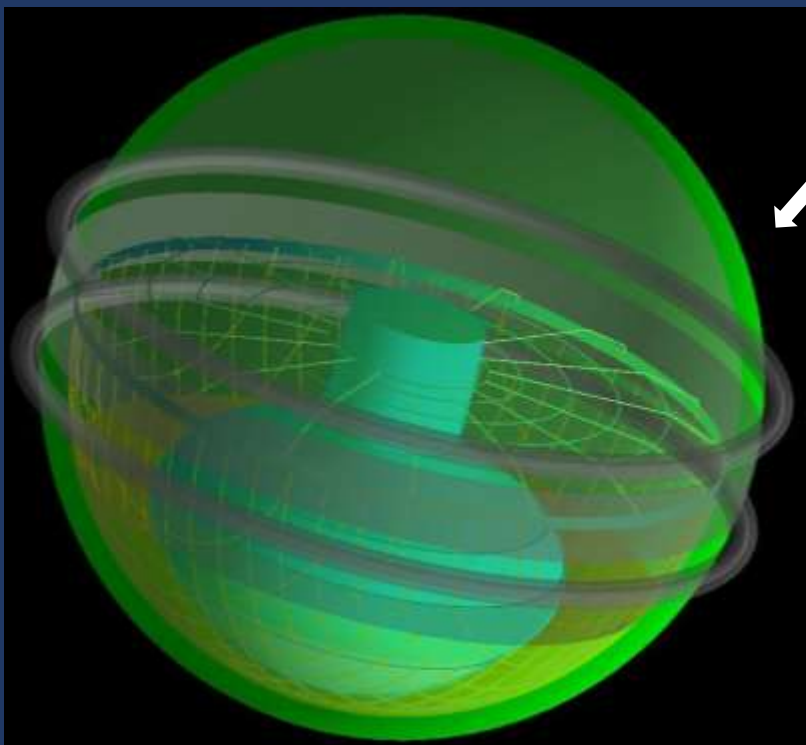
Энергия мюонов ~ 100 ГэВ

Моделирование ОМ Baikal-GVD в Geant4



← Модель ФЭУ R7081-100 в Geant4. Заданы составы и оптические свойства веществ, учтена квантовая эффективность ФЭУ.

Модель оптического модуля в Geant4.



Моделирование отклика ОМ на одиночные мюоны

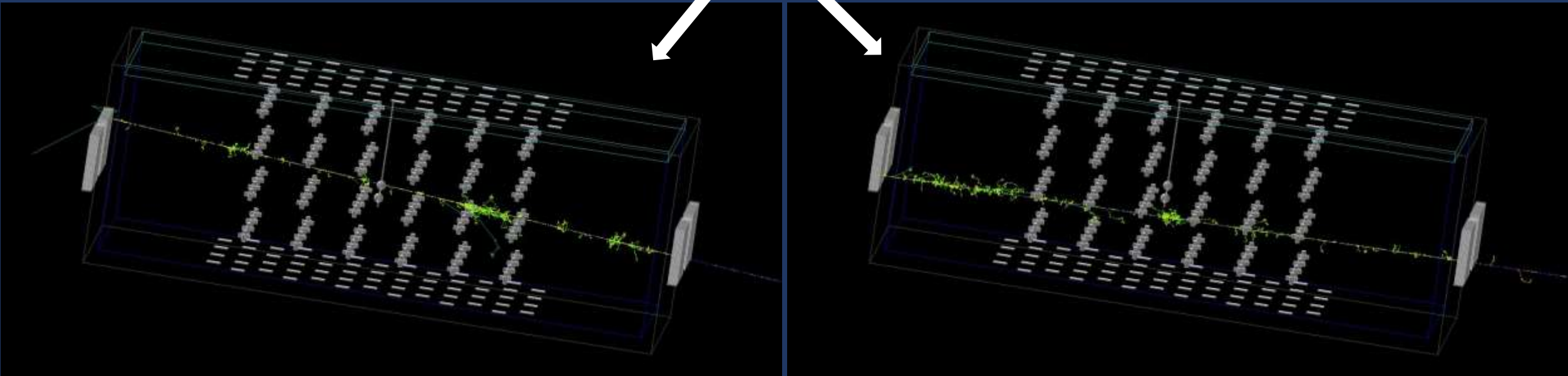
Генерируются мюоны с координатами треков из экспериментальных наборов
($T_\mu = 100 \text{ GeV}$)

Проверяется прохождение мюона через оба супермодуля ДЕКОР

В модели могут быть заданы произвольные углы поворота модулей

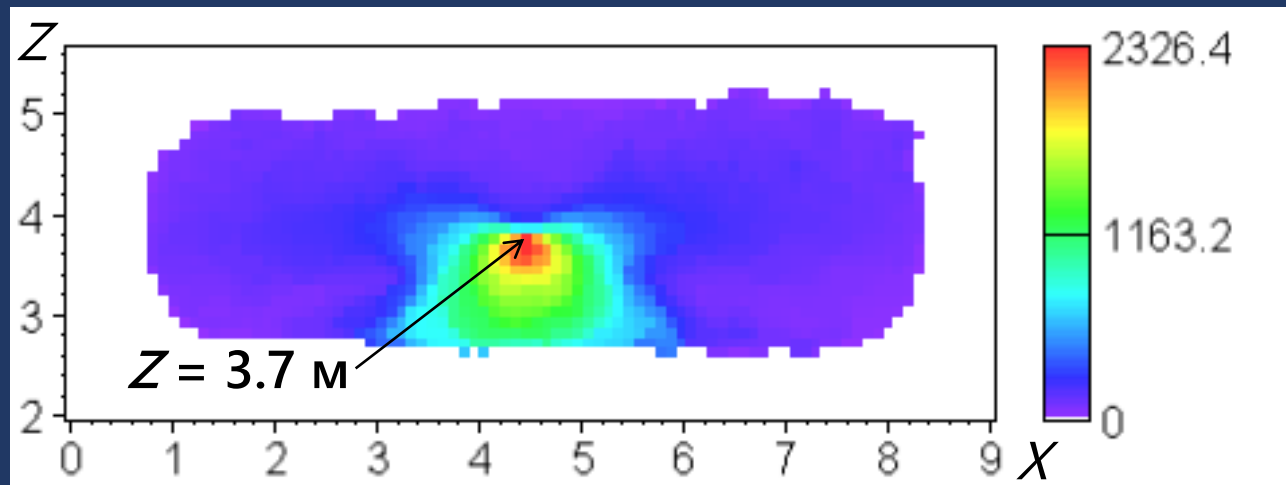
Сохраняется количество зарегистрированных ОМ Baikal-GVD фотонов и фотоэлектронов

Примеры событий

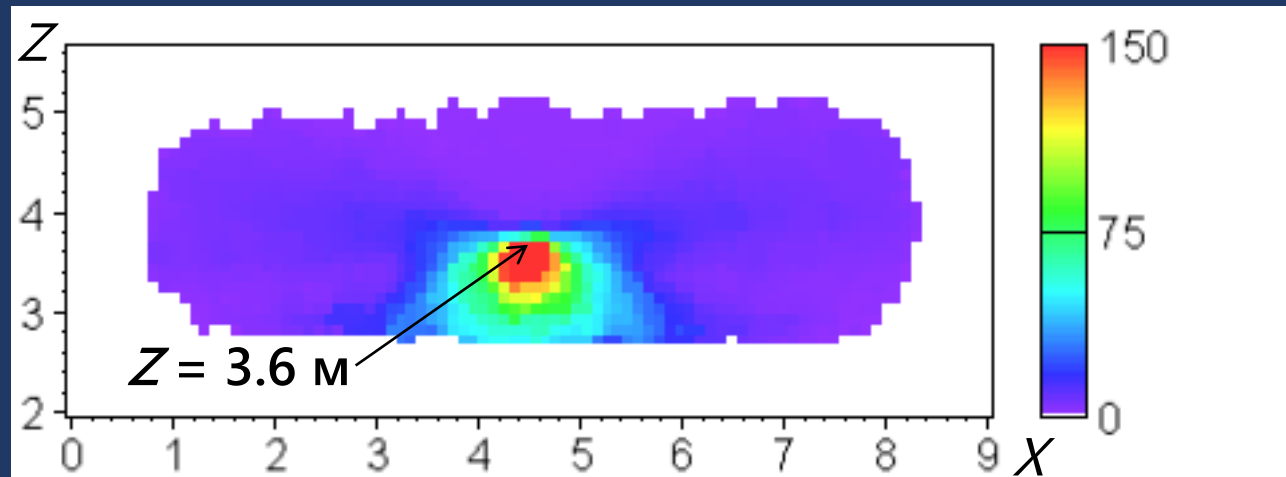


Сравнение с экспериментальными данными

Обработка первого набора. Рассчитываются координаты трека на центральной плоскости бассейна (перпендикулярно длинной стороне). Плоскость делится на ячейки 10 см×10 см. Для каждой ячейки рассчитывается средний заряд (эксперимент) и среднее число фотоэлектронов (моделирование).



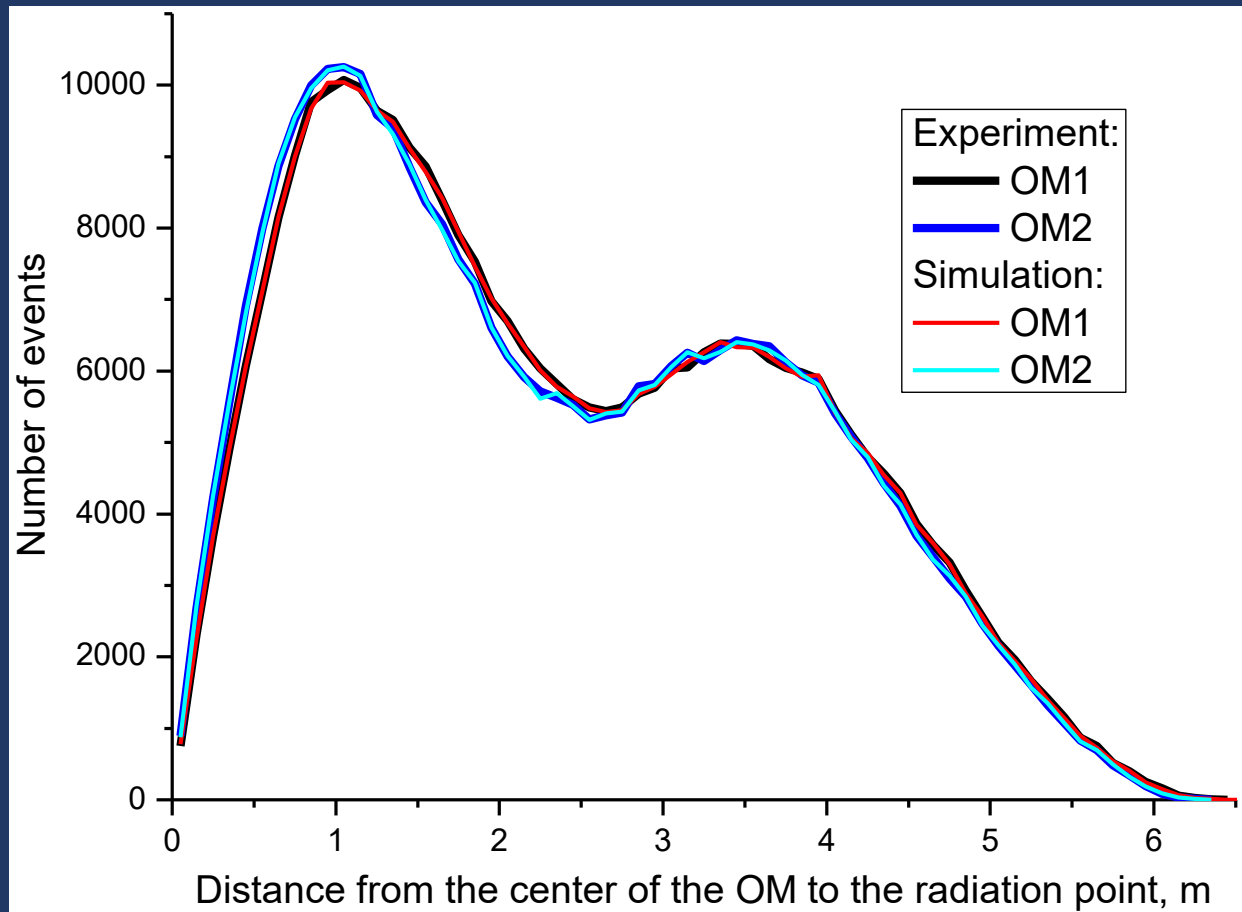
Эксперимент (пКл)



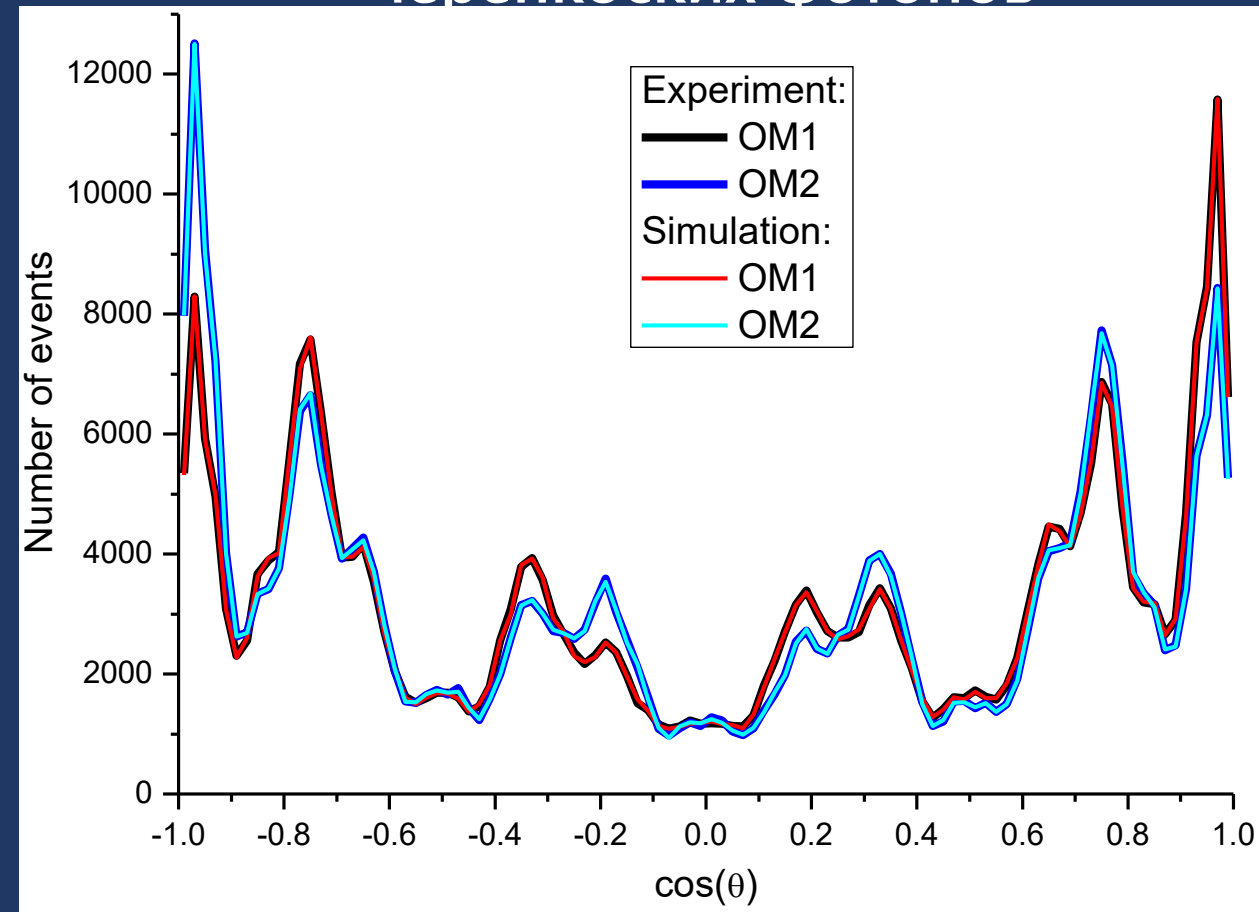
Моделирование (ф.э.)

Расстояния и углы прихода черенковского излучения

Расстояние до точки излучения

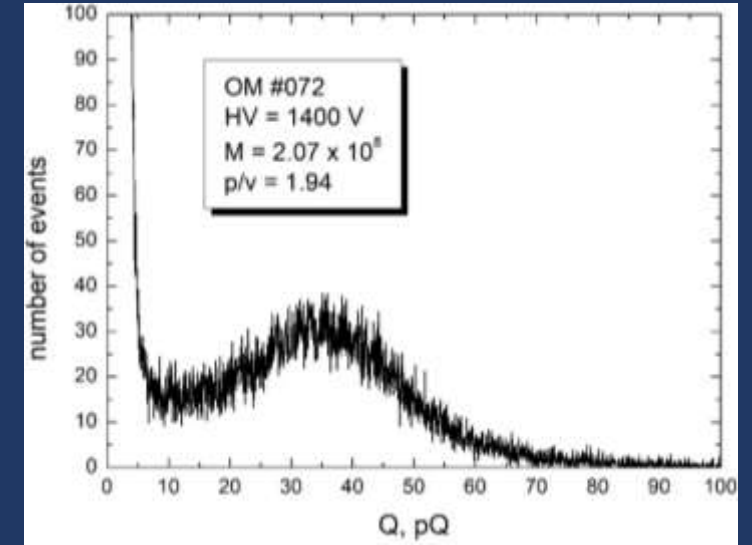
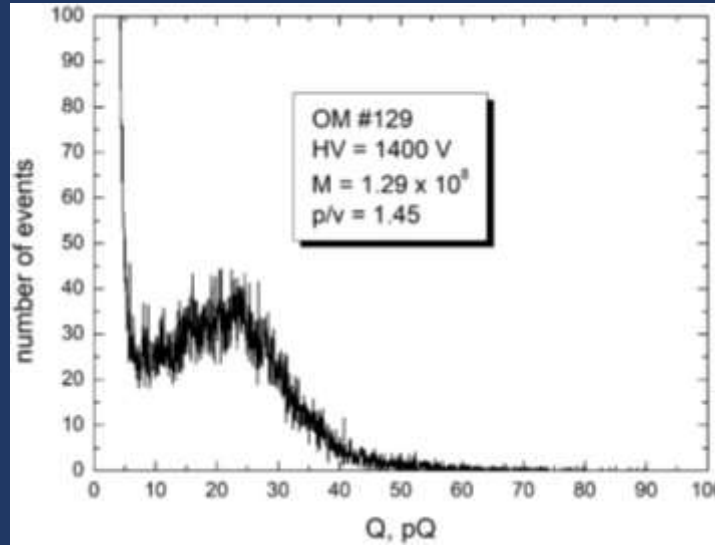


Косинус угла прихода черенковских фотонов



Проверка чувствительности ОМ

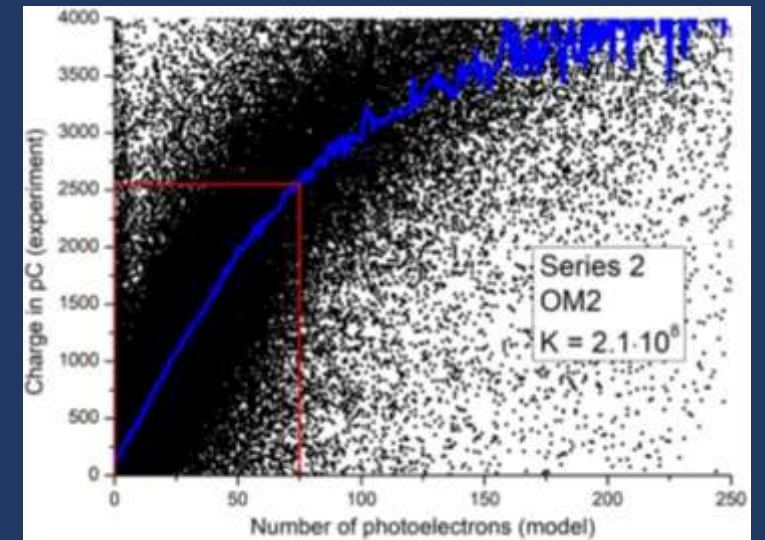
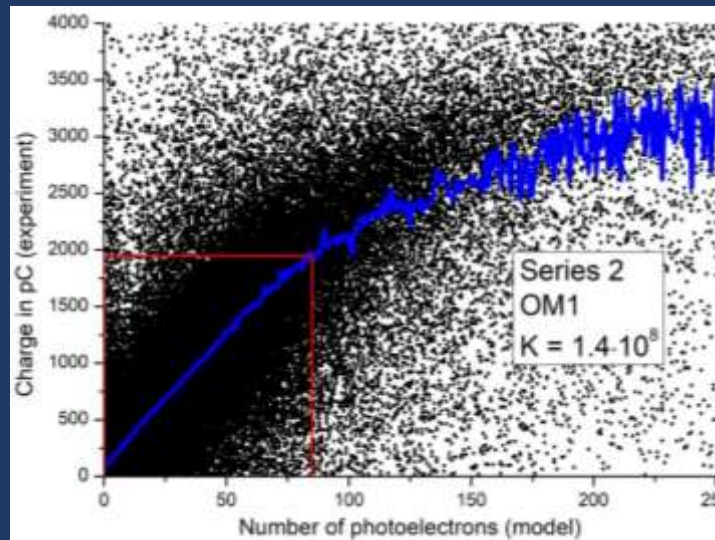
Измерения коэффициента усиления ОМ на стенде



Измерения коэффициента усиления ОМ в воде

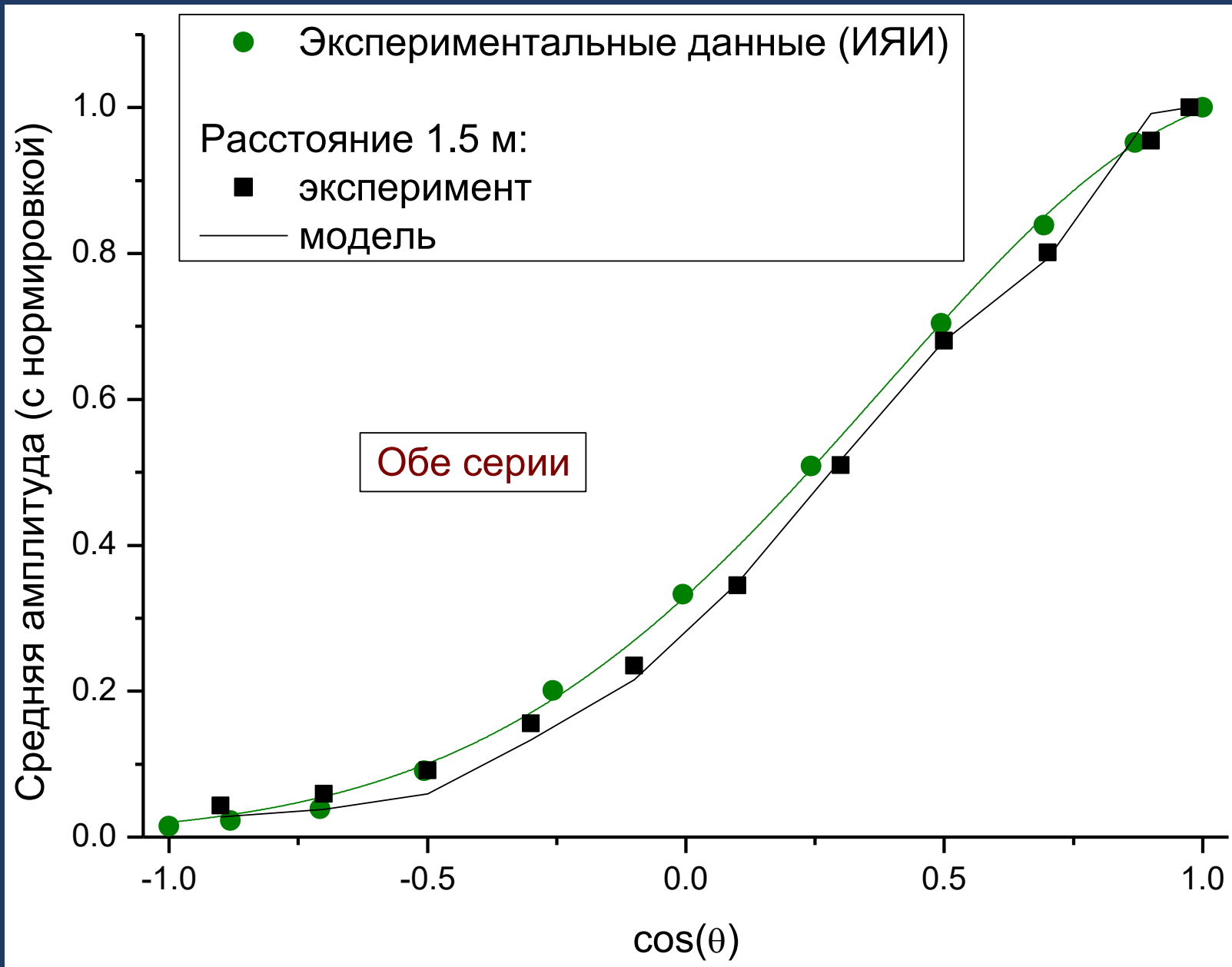
$$Q_{\text{exp}} = P + B \times N_{\text{ph.e.sim}}$$

$$K = B/e$$



Совпадение коэффициентов усиления свидетельствуют о том, что модель ОМ (квантовая эффективность и оптические свойства стекла) соответствуют действительности

Угловая чувствительность ОМ



Заключение

- В программном пакете Geant4 разработаны модели ОМ Baikal-GVD и экспериментов по измерению угловой зависимости отклика в ИЯИ РАН и НИЯУ МИФИ.
- Впервые реализована методика калибровки оптических модулей Baikal-GVD по черенковскому излучению от одиночных мюонов с известными треками.
- Результаты измерений и моделирования хорошо согласуются между собой.

Спасибо за внимание!

