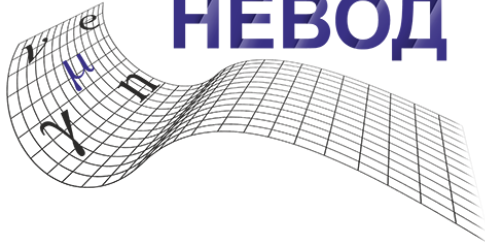


8-е Черенковские чтения

"Новые методы в экспериментальной ядерной
физике и физике частиц"

Научно-образовательный центр

НЕВОД



Квазисферические модули для черенковских водных детекторов

Хомяков В.А., Киндин В.В., Кокоулин Р.П., Петрухин А.А.,
Хохлов С.С., Шутенко В.В., Юрина Е.А., Яшин И.И.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Москва, апрель 2015 г.

Проблема регистрации черенковского излучения

ФЭУ с плоским фотокатодом



$$A_1(R, \alpha) = \frac{C \cdot \cos \alpha}{r} \cdot \exp\left(-\frac{r}{l}\right),$$

где r – расстояние до источника излучения;

α – угол падения черенковского света на фотокатод;

l – эффективный радиус ослабления черенковского света в воде.

ФЭУ с полусферическим фотокатодом



$$A_1(R) = \frac{C}{r} \cdot \exp\left(-\frac{r}{l}\right)$$

Конфигурация из нескольких ФЭУ с плоским фотокатодом может иметь свойство сферического ФЭУ, т.е. обладать изотропным откликом. Оптический модуль с такой конфигурацией называется квазисферическим.

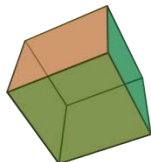
Принцип построения квазисферических модулей

Расположение ФЭУ, обеспечивающее модулю свойство сферичности, определяется на основе геометрии правильных многогранников:

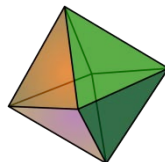
тетраэдр



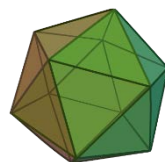
куб



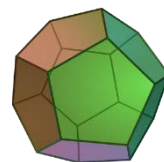
октаэдр



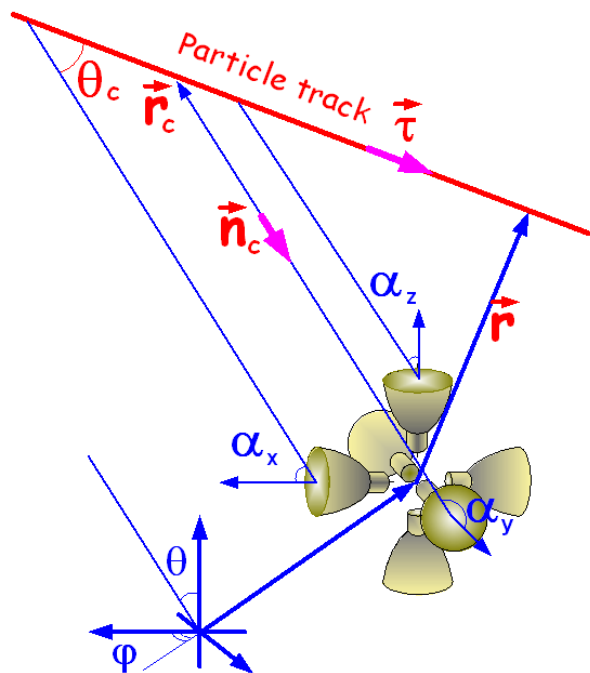
икосаэдр



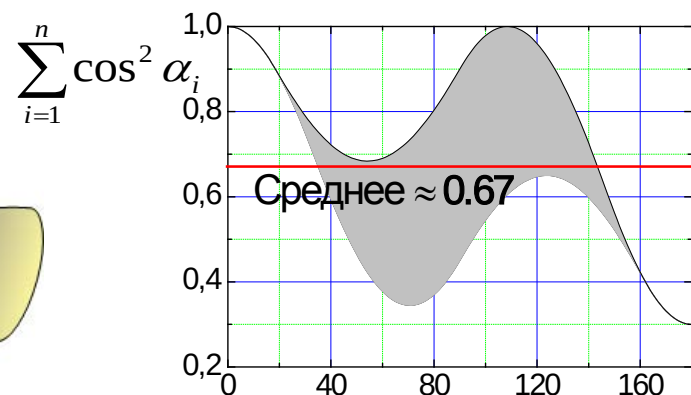
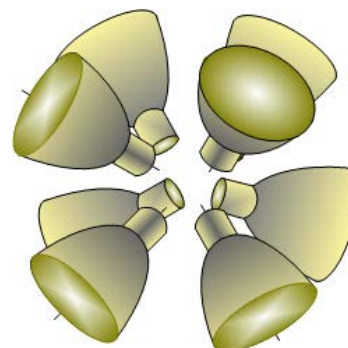
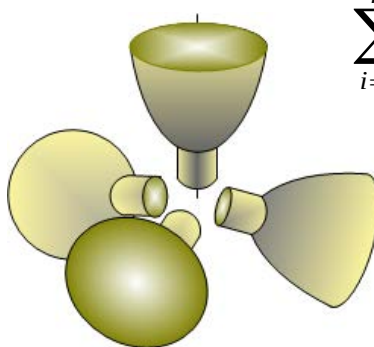
додекаэдр



Располагать ФЭУ можно в вершинах и/или на ребрах и/или на гранях фигур (исключение есть для тетраэдра).



$$\cos^2 \alpha_x + \cos^2 \alpha_y + \cos^2 \alpha_z = 1$$



Зенитный угол прихода черенковского света, градусы

$$\sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i = \frac{4}{3}$$

Квазисферический модуль

Идея создания квазисферического модуля с 6-ю ФЭУ с плоскими фотокатодами была представлена в 1979 году на конференции в Киото

(Borog V.V. et al., Proc. 16th ICRC, 1979 10, 380)



Модуль с 6-ю ФЭУ, ориентированными вдоль осей ортогональной системы координат – простейшая конфигурация модуля, отклик которого не зависит от направления прихода черенковского света.

Помимо независимости отклика от направления света предложенный модуль позволяет определять направление прихода черенковского излучения.

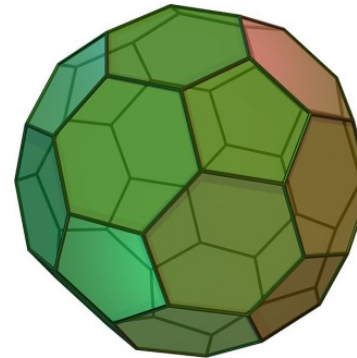
Применение КСМ в черенковских детекторах

Проект [km3](#): модуль с 31 ФЭУ

(испытан на глубине 2.4 км [в 2013 г.](#))



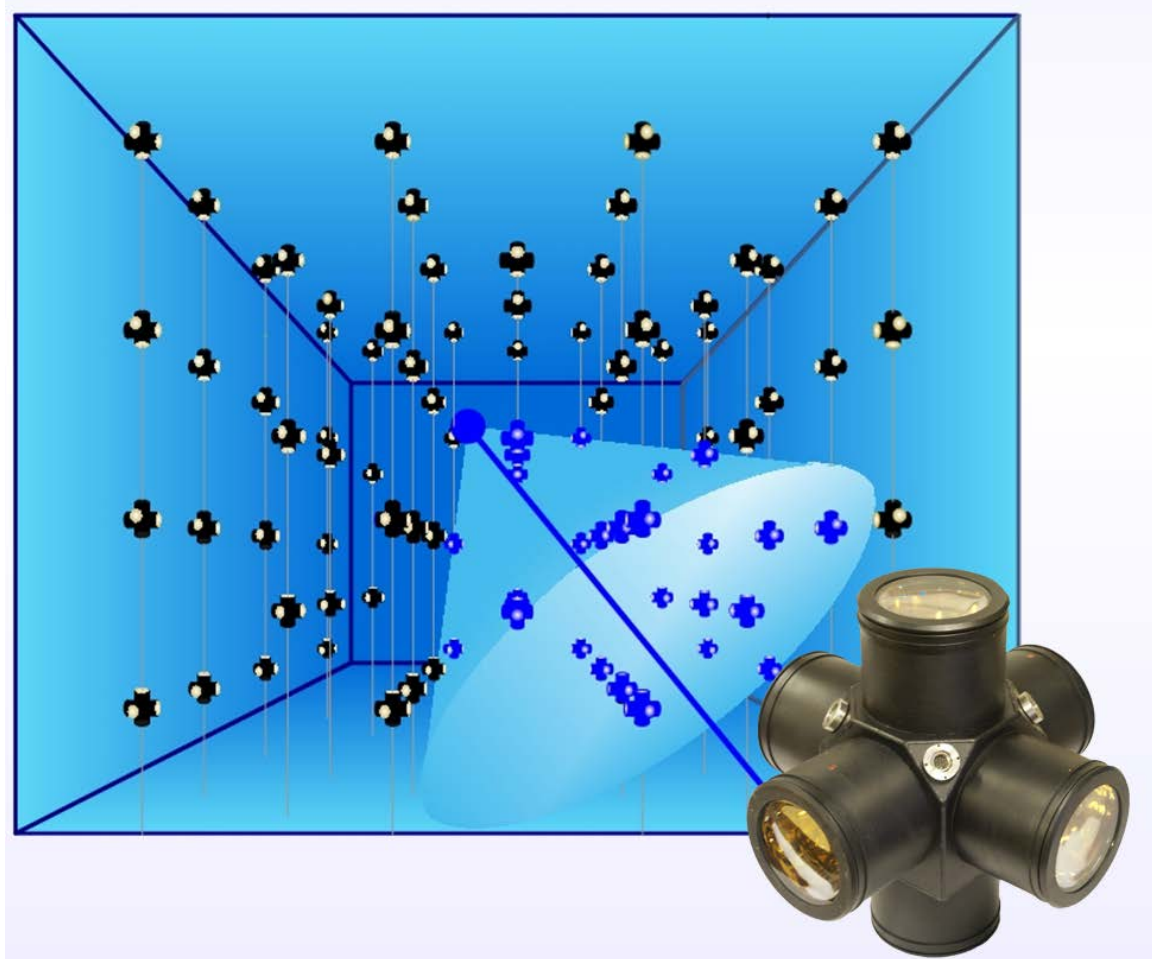
≈



Черенковский водный детектор НЕВОД



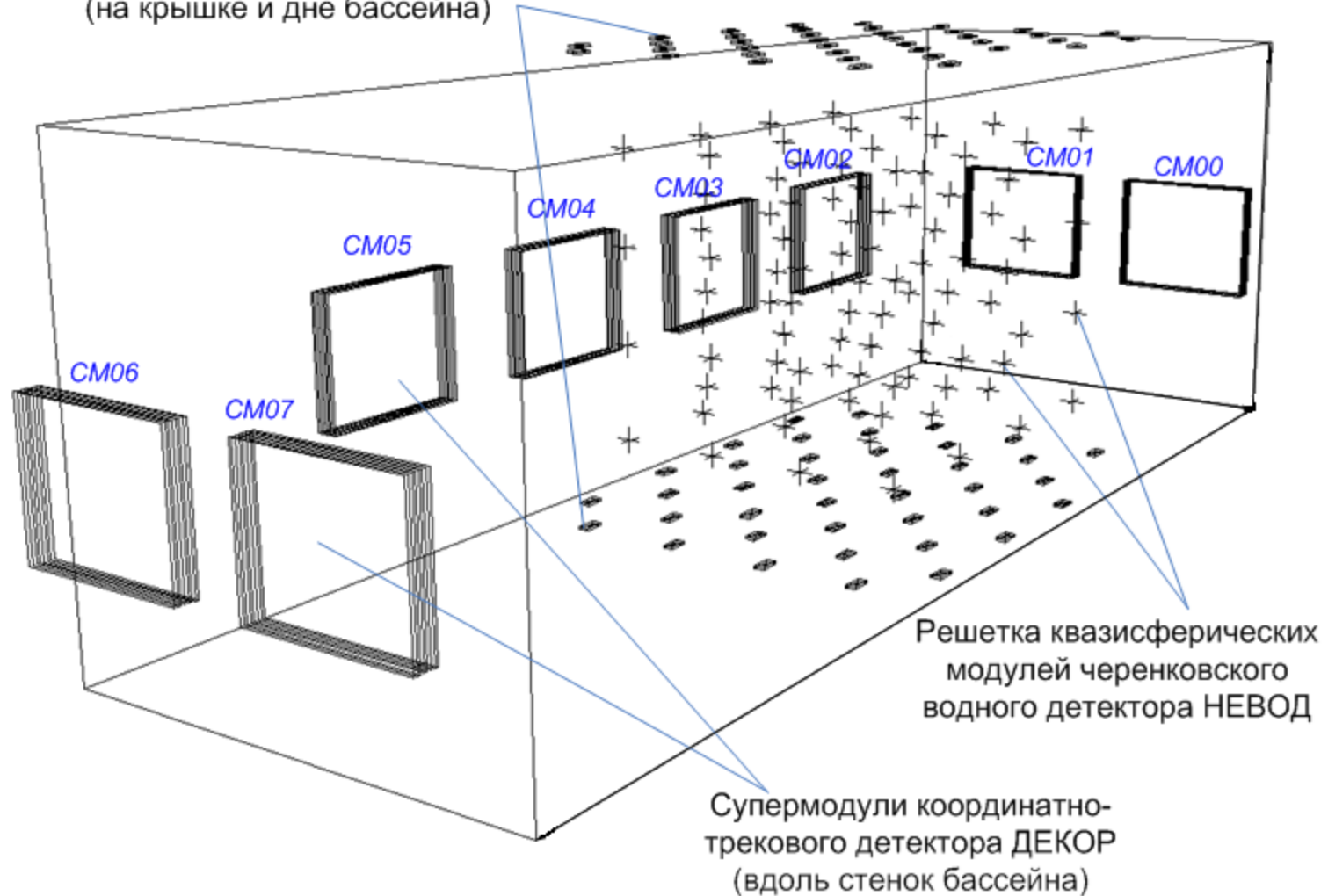
- Объем 2000 м³.
- Пространственная решетка: 91 квазисферический модуль (КСМ) в 25 гирляндах (шаг 1x1x1.25 м³).
- Каждый КСМ имеет 6 ФЭУ-200
- Динамический диапазон каждого ФЭУ: 1 – 10⁵ ф.э.



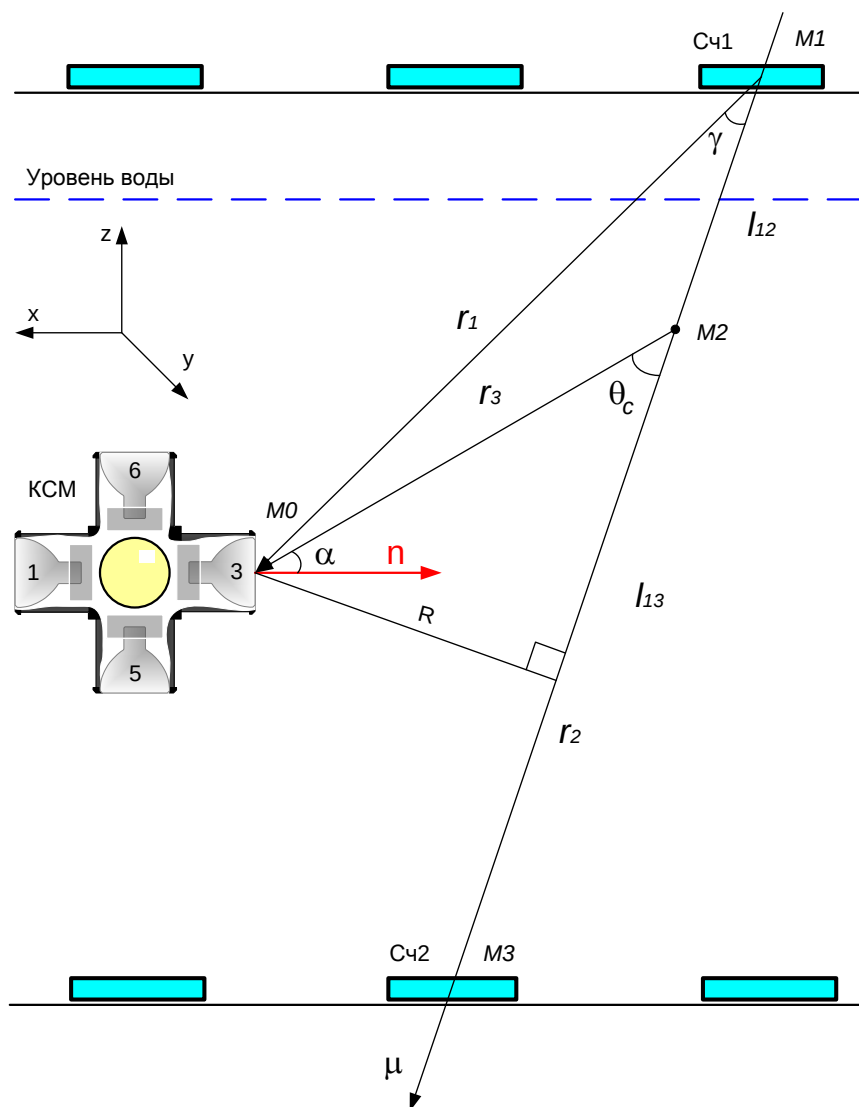
Устройство и параметры измерительного модуля, а также малый шаг пространственной решетки позволяют детектору работать как в режиме **годоскопа**, так и в режиме **калориметра**.

Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР

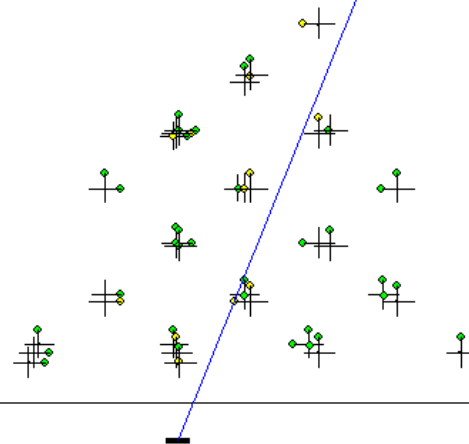
Система калибровочных телескопов
(на крышке и дне бассейна)



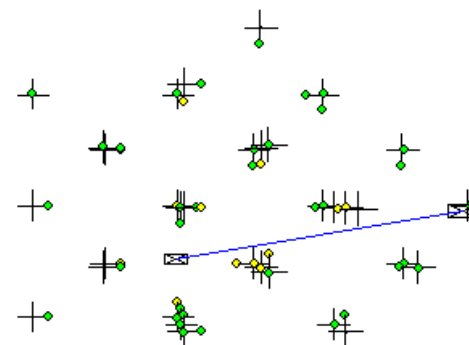
Калибровка ФЭУ



Вид сбоку



Вид сверху



Развитие характеристик регистрирующей системы ЧВД НЕВОД

1995 год

- ФЭУ-49Б с мультищелочным фотокатодом;
- темп счета шумовых импульсов ФЭУ до 100 кГц;
- триггер двойного совпадения для подавления высоких шумов ФЭУ;
- съем полезного сигнала с 12-го динода ФЭУ;
- диапазон регистрируемых сигналов от 1 до 2×10^2 ф.э.;
- нет полной взаимозаменяемости.

2011 год

- ФЭУ-200 с бищелочным фотокатодом;
- темп счета шумовых импульсов (порог 0.25 ф.э.) не более 10 кГц.
- отказ от триггирования по двойному совпадению;
- съем сигналов с двух динодов - с 12-го и 9-го;
- динамический диапазон $1 - 10^5$ ф.э., 1092 амплитудных и 546 логических каналов с программно-управляемым порогом;
- КСМ взаимозаменяемы;
- защитный иллюминатор.

Сферичность модуля: ранние исследования

- для исследования взят отдельный квазисферический модуль;
- модуль помещен в заполненную водой ванну $1.5 \times 1.5 \times 3.2 \text{ м}^3$

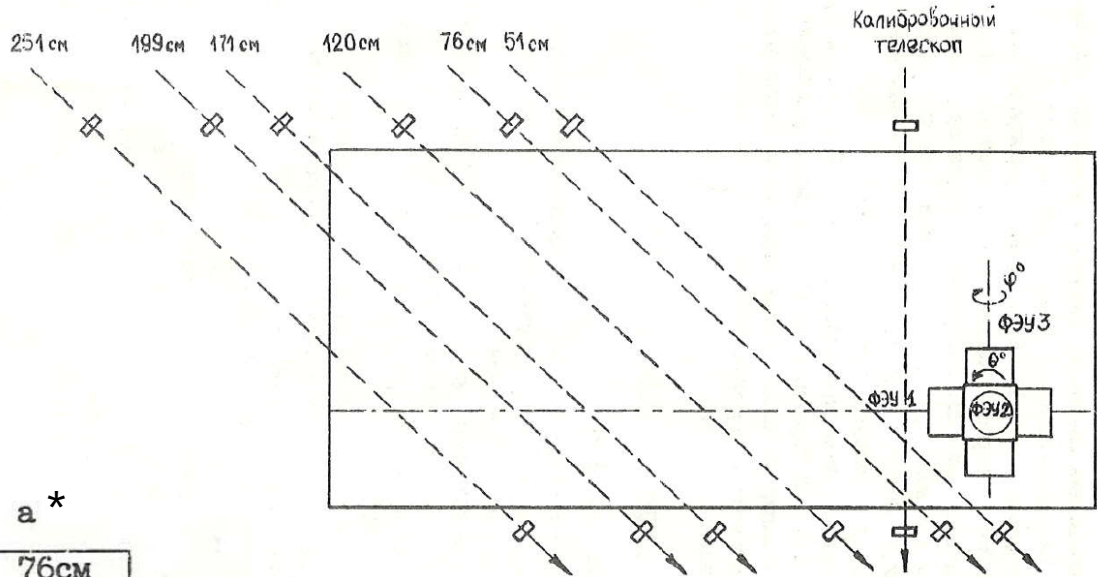
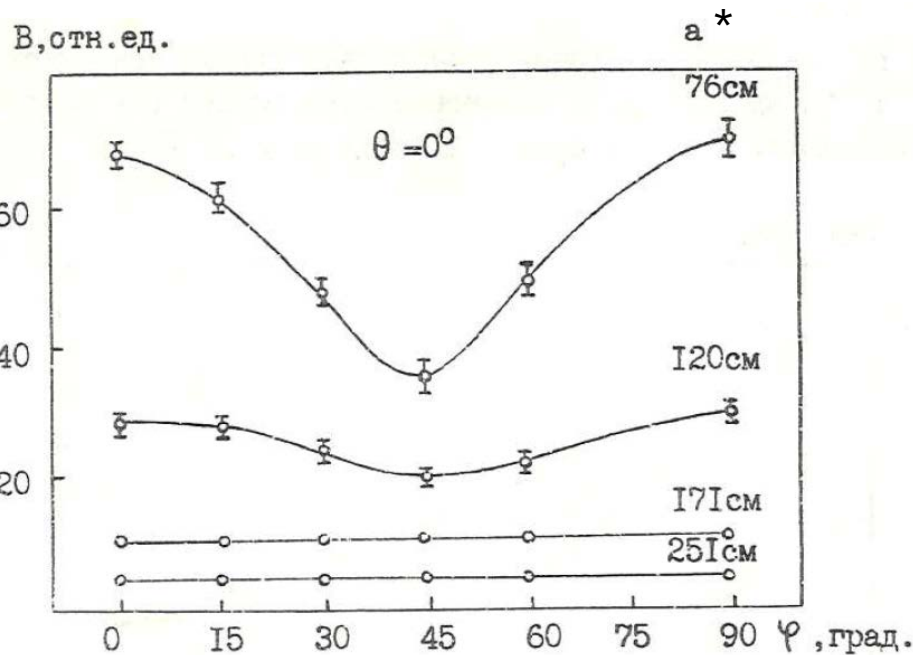


Рис.2.Схема эксперимента *

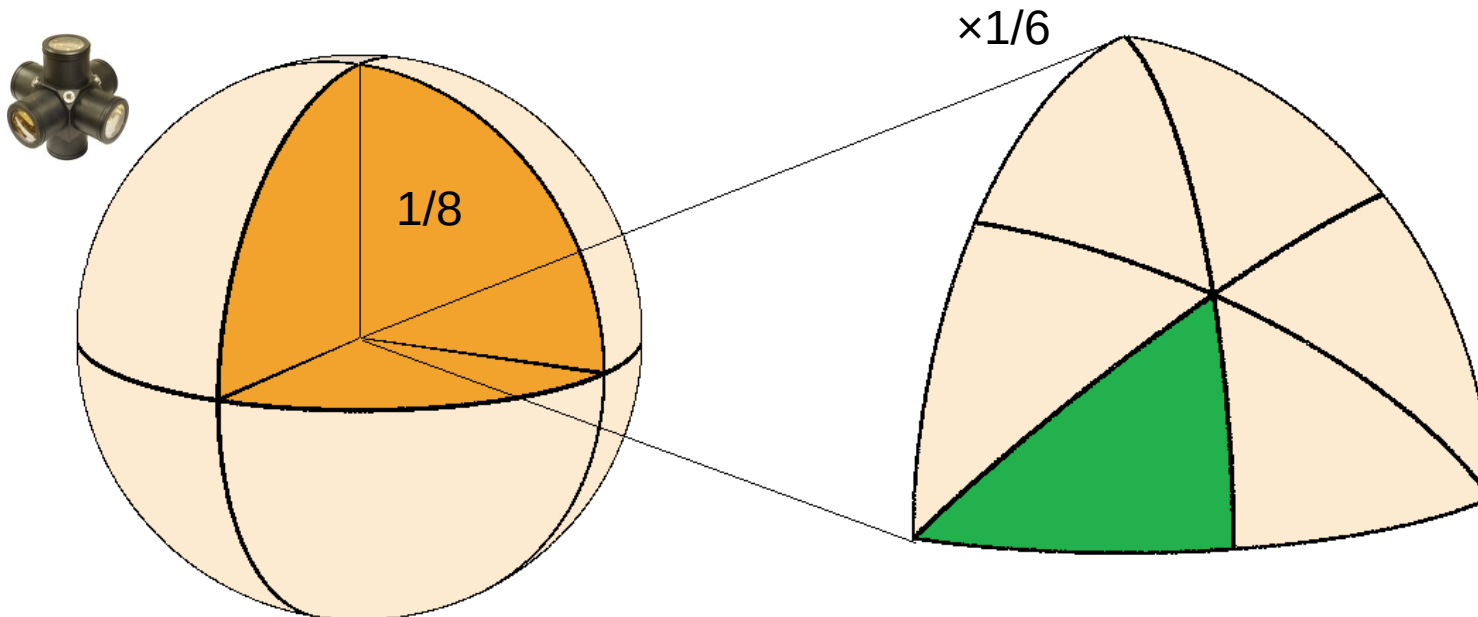


В качестве амплитудной характеристики отклика КСМ использовалась величина

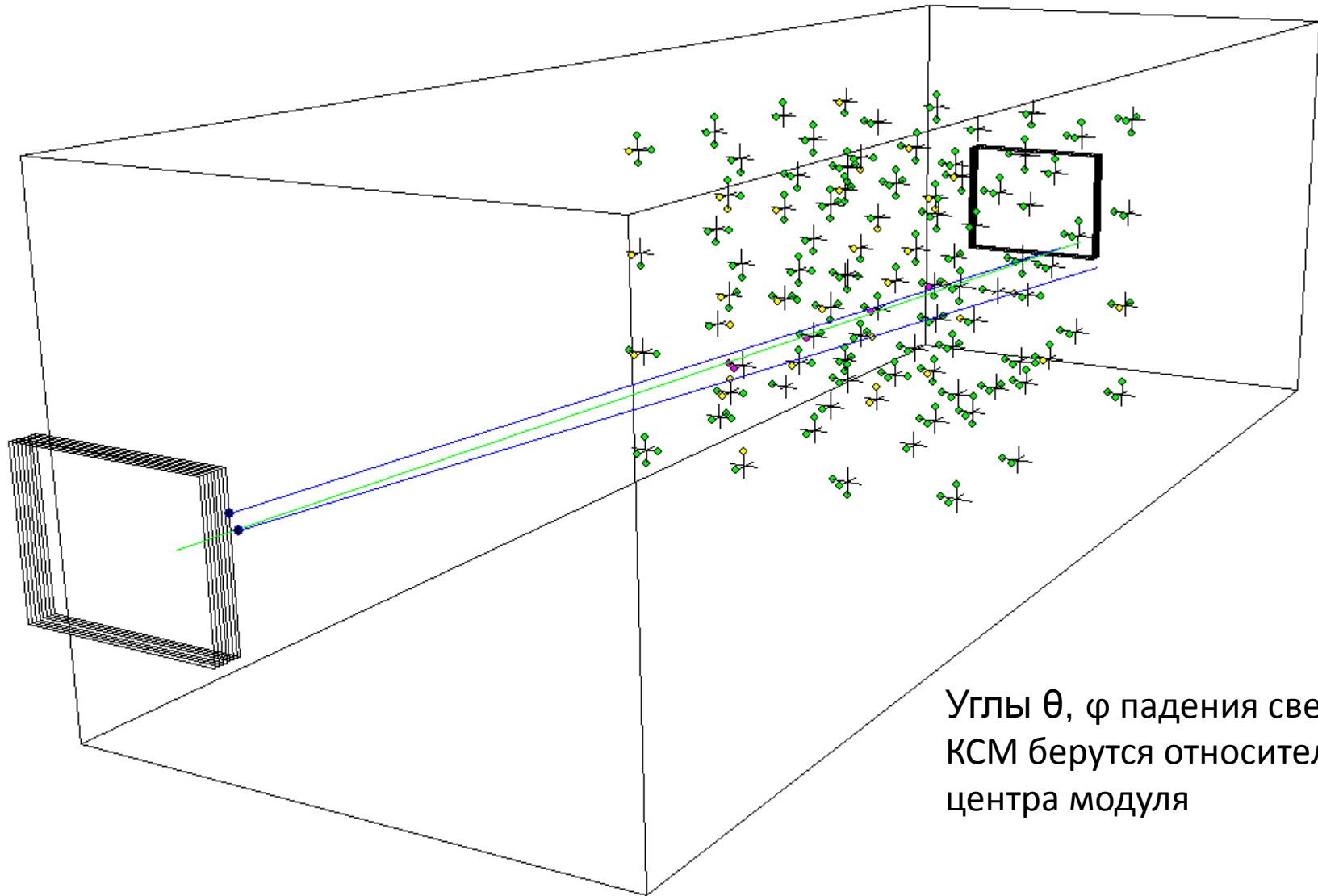
$$B = \sqrt{\sum_{i=1}^3 A_i^2}$$

Новое исследование сферичности модуля. Подход

- исследуется не отдельно взятый модуль, а средние характеристики отклика внешних КСМ решетки;
- КСМ «обстреливаются» черенковским светом от частиц, выделяемых с помощью системы калибровочных телескопов и трекового детектора ДЕКОР;
- количественные параметры отклика КСМ приводятся к сферическому треугольнику, составляющему $1/48$ часть сферы:



Пример события с одиночным мюоном, трек которого определен по данным ДЕКОР



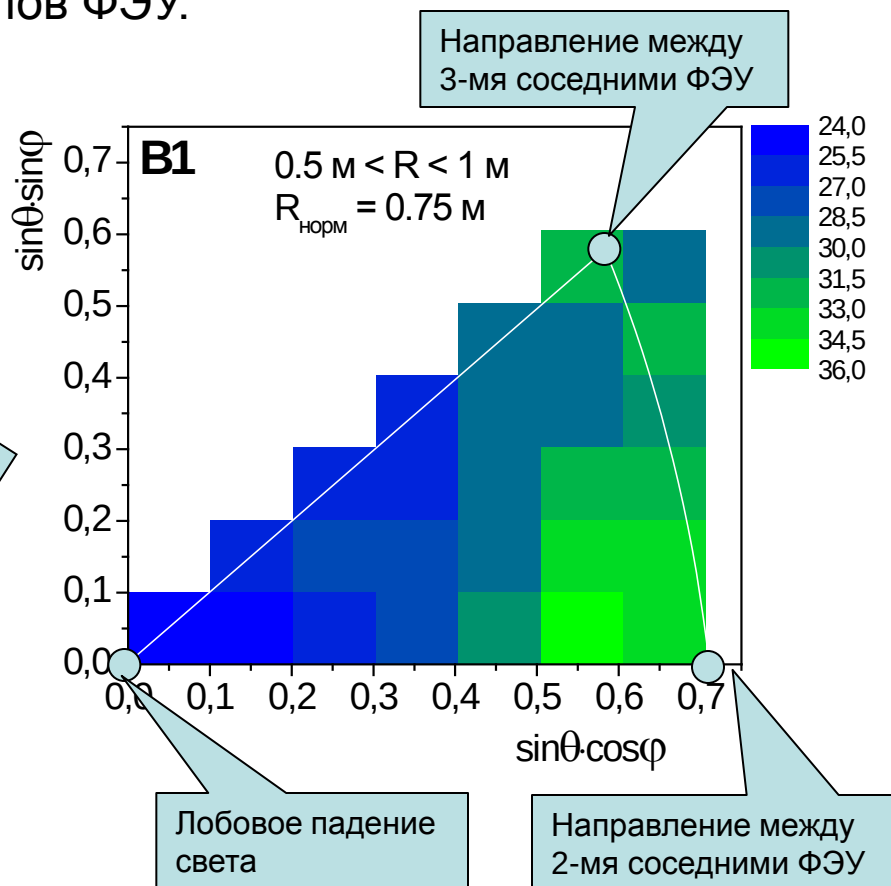
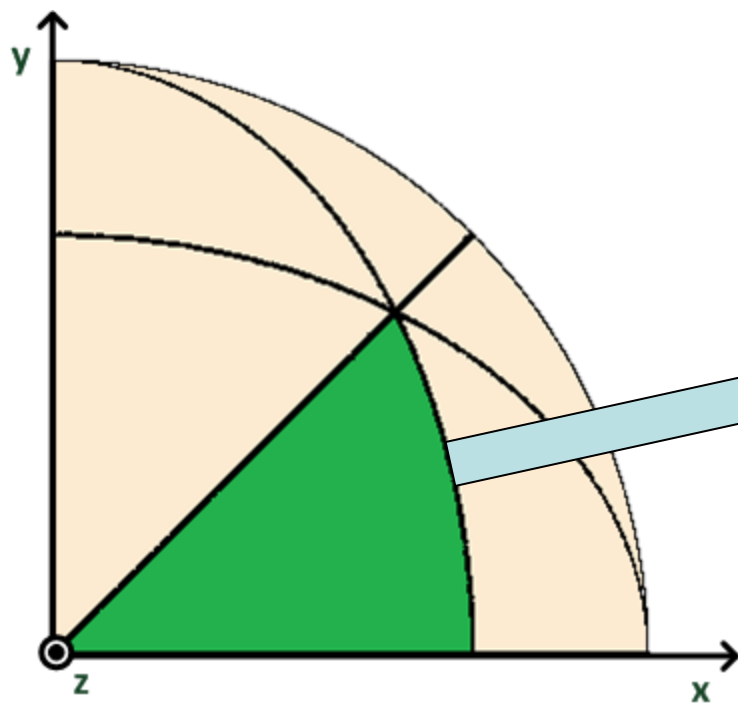
Углы θ , φ падения света на КСМ берутся относительно центра модуля

Анализируемые характеристики

Рассматривался отклик КСМ для разных диапазонов расстояний до трека в двух вариантах:

В1 – сумма сигналов ФЭУ,

В2 – корень из суммы квадратов сигналов ФЭУ.



Анализ сферичности КСМ на расстояниях 0.5 – 2 м

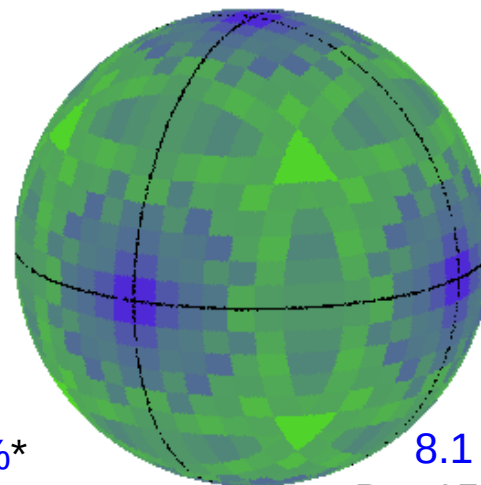
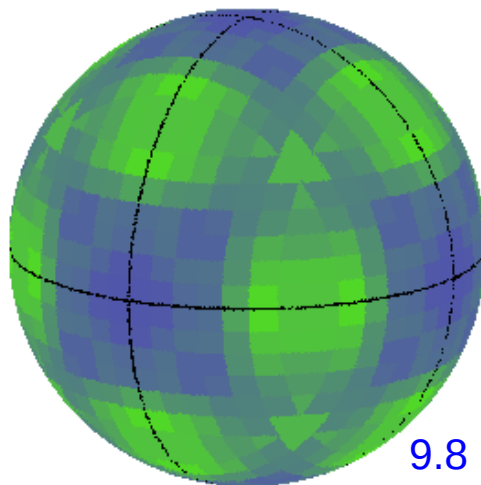
В1: сумма сигналов
всех ФЭУ



В2: корень из суммы
квадратов сигналов ФЭУ

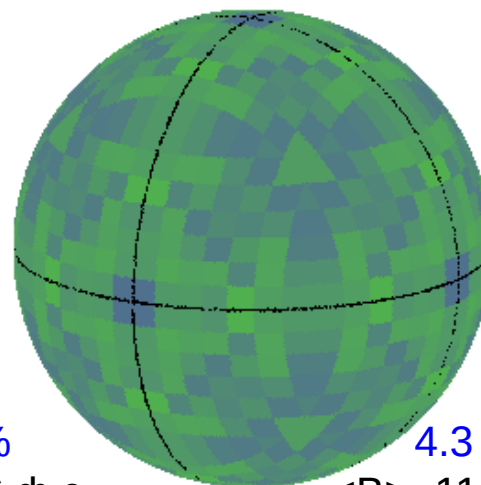
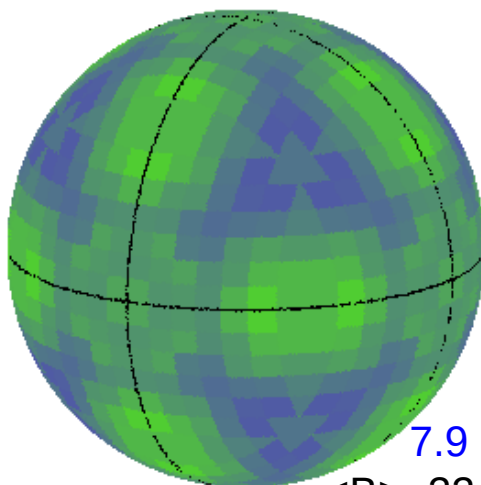
R: 0.5 ÷ 1 м

R: 1 ÷ 2 м



9.8 %*
=30.0 ф.э.

8.1 %
=15.2 ф.э.



7.9 %
=22.6 ф.э.

4.3 %
=11.0 ф.э.

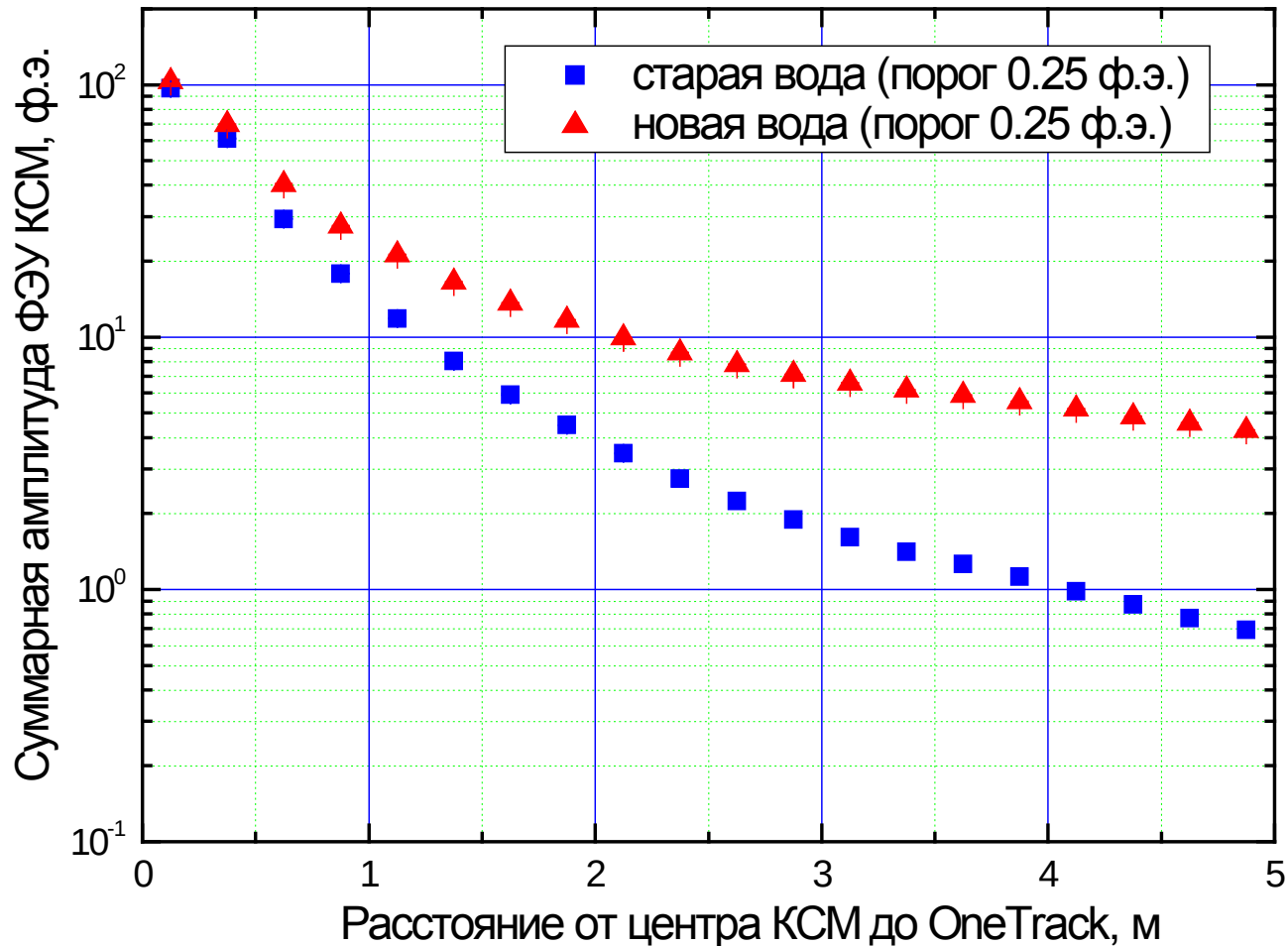
% -40 -30 -20 -10 0 10 20 30



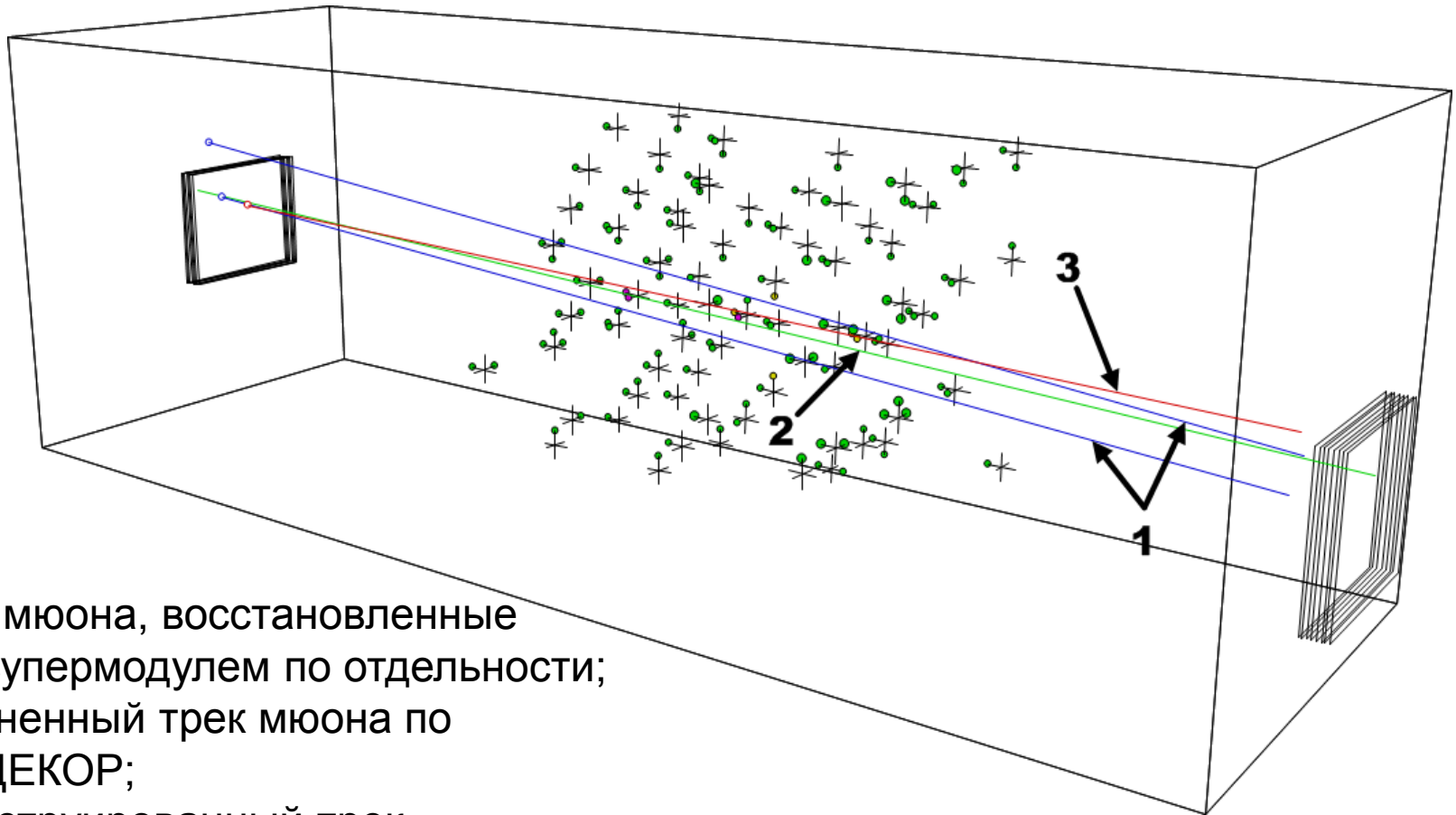
* усредненное по сфере среднеквадратичное отклонение от среднего:

Зависимость среднего отклика КСМ от расстояния

Результат для событий с околоразрешенными мюонами, треки которых определены по данным детектора ДЕКОР



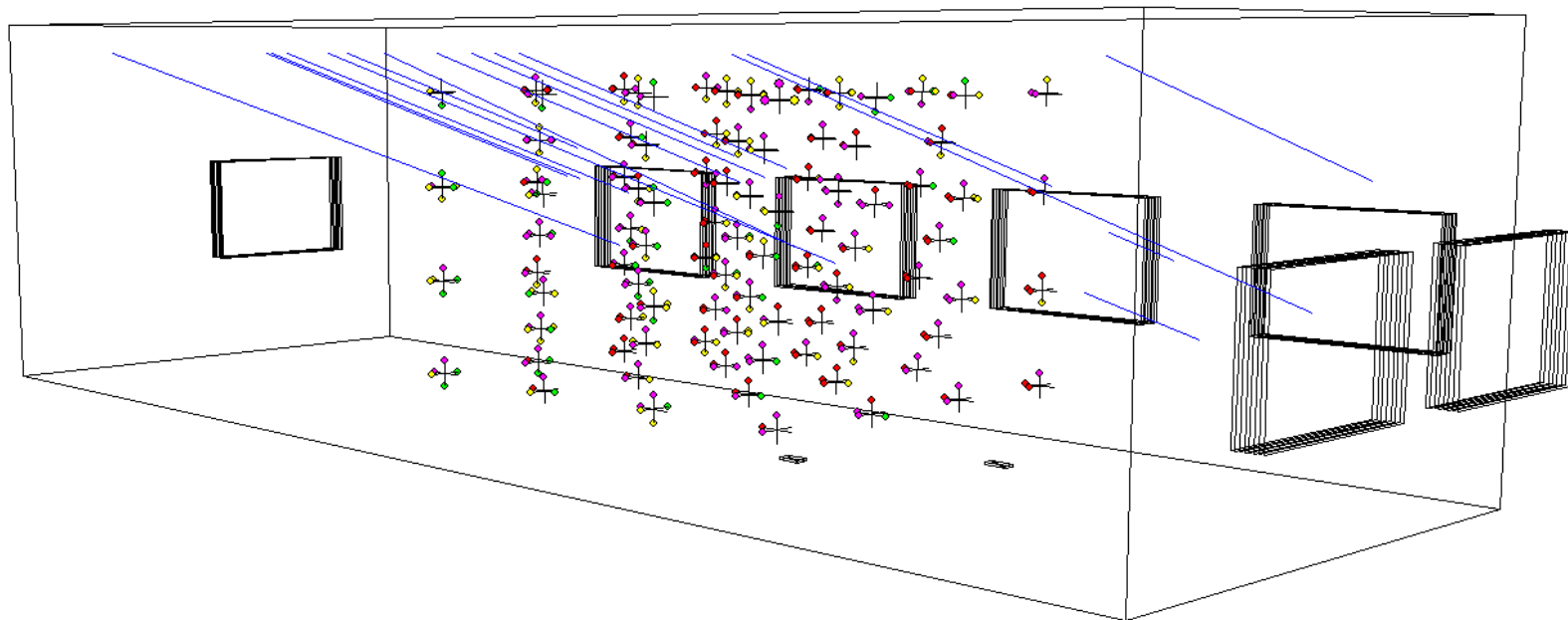
Восстановление трека одиночного мюона по отклику ЧВД



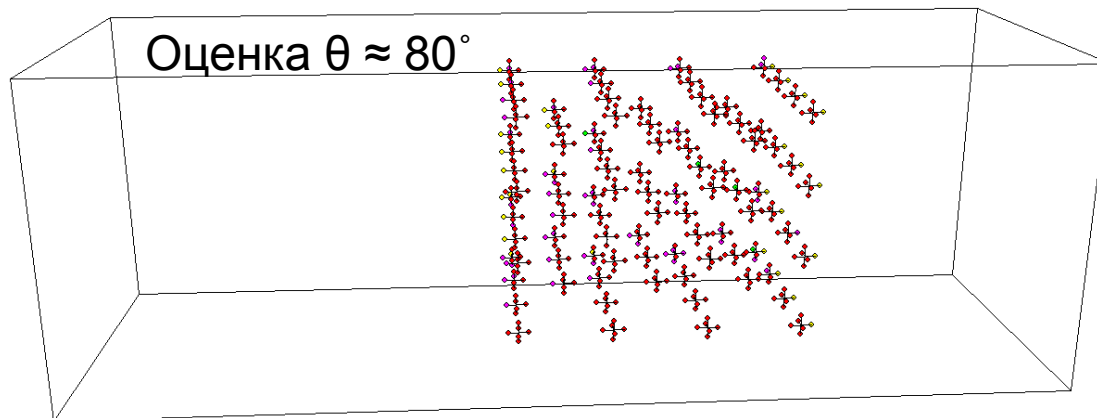
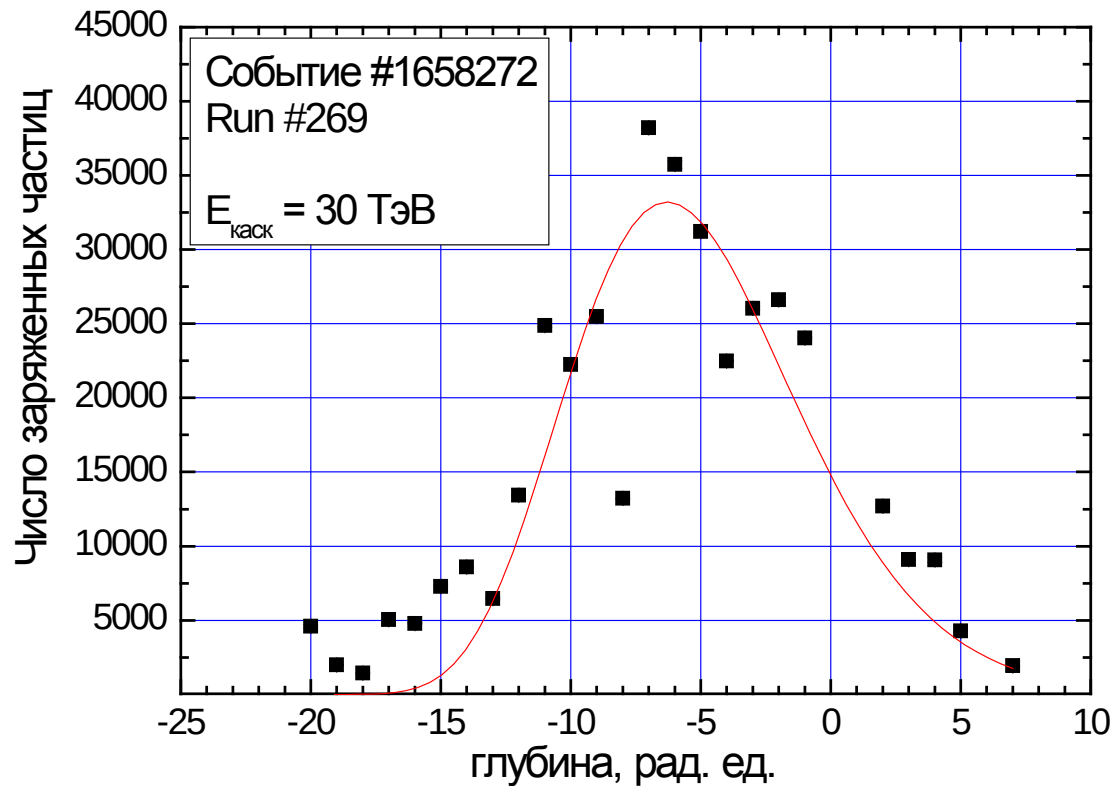
- 1 – треки мюона, восстановленные каждым супермодулем по отдельности;
- 2 – усредненный трек мюона по данным ДЕКОР;
- 3 – реконструированный трек.

Достигнутая средняя точность реконструкции экспериментальных событий лучше 5 градусов*.

Анализ энерговыведения мюонных групп



Исследование каскадных ливней, рожденных мюонами в ЧВД



Заключение

- квазисферический модуль ЧВД НЕВОД обладает хорошей изотропностью отклика (для расстояний до 6 м среднеквадратичное отклонение от среднего не превышает 15%);
- наилучший показатель равномерности отклика (среднеквадратичное отклонение около 4 %) достигается на расстояниях в диапазоне от 1 до 2 м;
- представляется перспективным использование квазисферических модулей на основе ФЭУ с плоским фотокатодом для регистрации черенковского излучения.

Спасибо за внимание!

