

Новый квазисферический модуль КСМ-6М для развития черенковского водного калориметра НЕВОД

С.С. Хохлов от коллектива
Научно-образовательного центра НЕВОД

План доклада

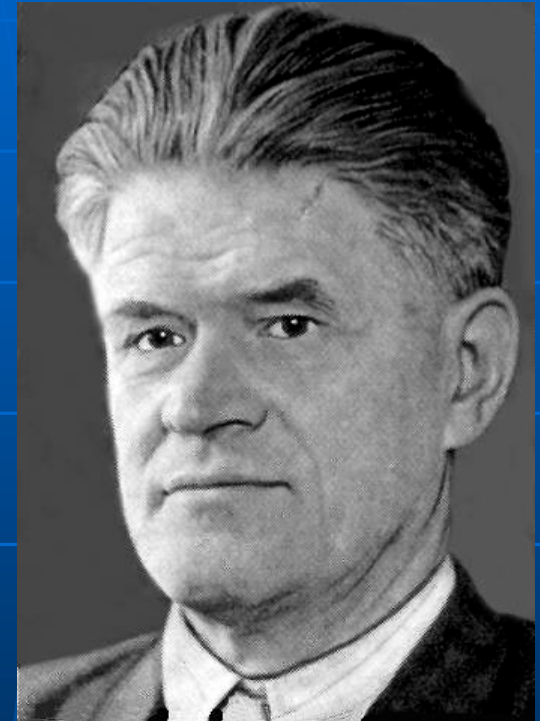
1. Оптические модули черенковских детекторов.
2. Развитие ЭК НЕВОД.
3. ФЭУ Hamamatsu R877.
4. Результаты тестирования КСМ-6М.
5. Заключение.

Черенковское излучение

- 1934 г. П.А.Черенков – Открытие нового вида излучения

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta}$$

- 1937 г. И.Е. Тамм и И.М. Франк - теоретическое объяснение явления
- 1958 г. - П. А. Черенков, И. Е. Тамм и И. М. Франк - Нобелевская премия по физике.



П.А.Черенков

Изобретатель ФЭУ Л.А.Кубецкий (1906 - 1959)

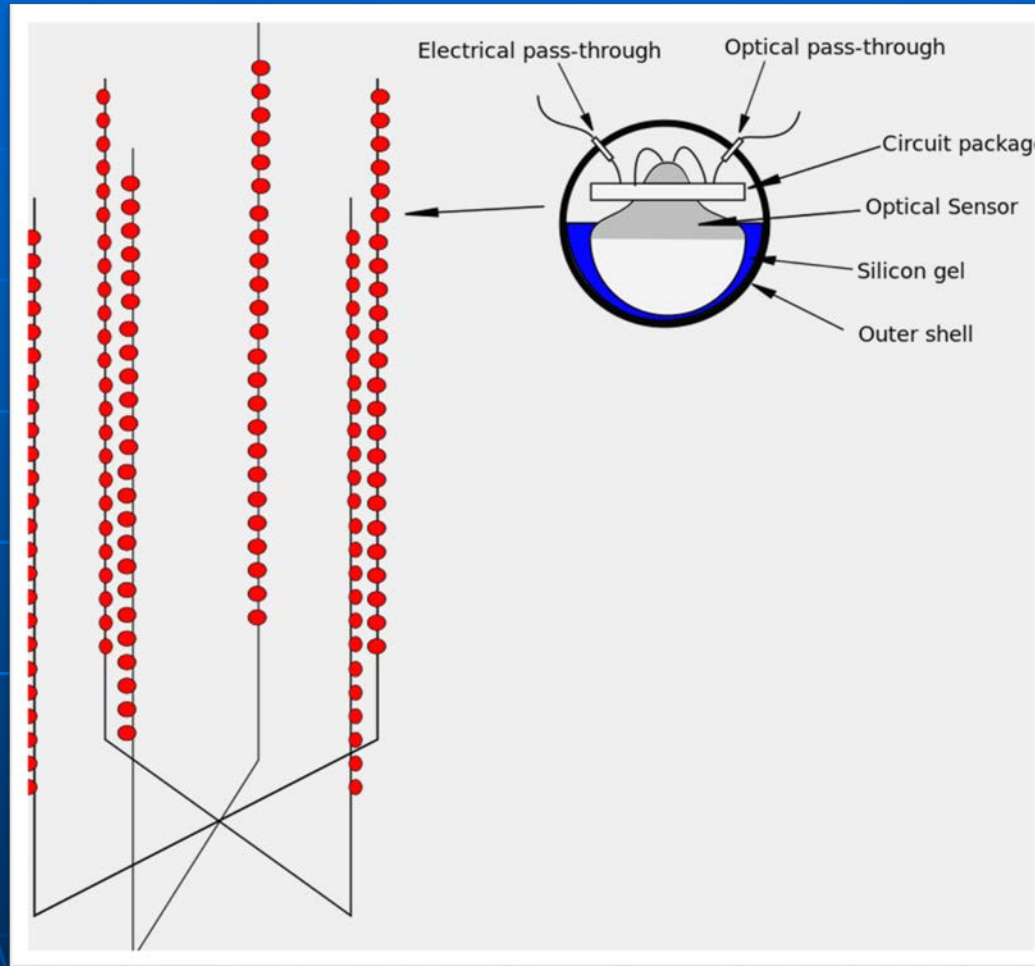


1930 – идея прибора;

1936 – первый образец;

1948 – Государственная премия СССР.

DUMAND project (Deep Underwater Muon And Neutrino Detector), 1976 -1995



Место расположения: Тихий океан.

Объем: 0.5 км^3 .

Требования к оптическим модулям

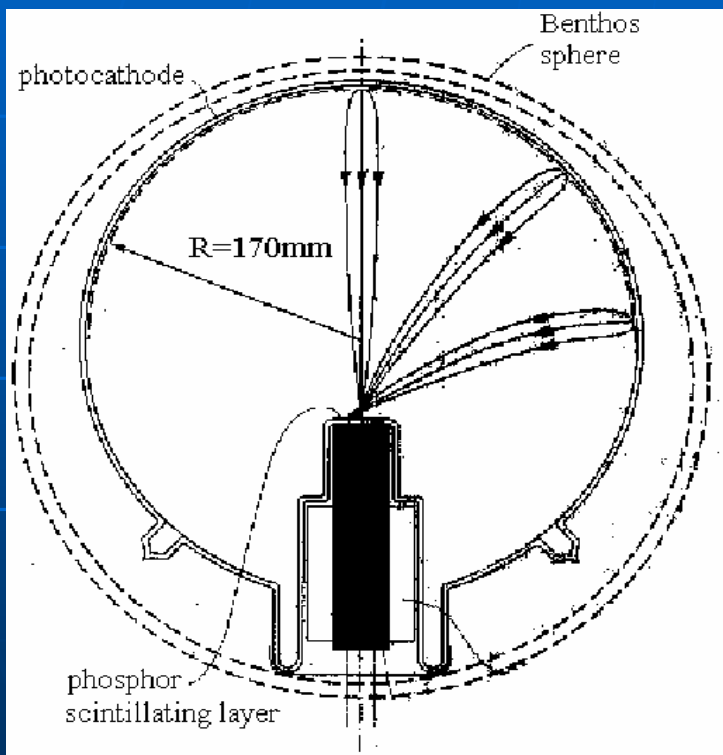
При разработке проекта DUMAND в лаборатории Philips в 1983 г. были сформулированы требования к оптическим модулям:

- максимально возможная чувствительность к черенковскому свету;
- большой угол приема с максимально возможной чувствительной площадью;
- максимально высокое временное разрешение;
- максимально высокое одноэлектронное разрешение.

Три концепции оптических модулей

- **Европейский оптический модуль:** маленький ФЭУ с системой электронно-оптического предусиления.
- **Японский оптический модуль:** в основе большой полусферический фотоумножитель.
- **Квазисферический модуль:** система из разнонаправленных ФЭУ.

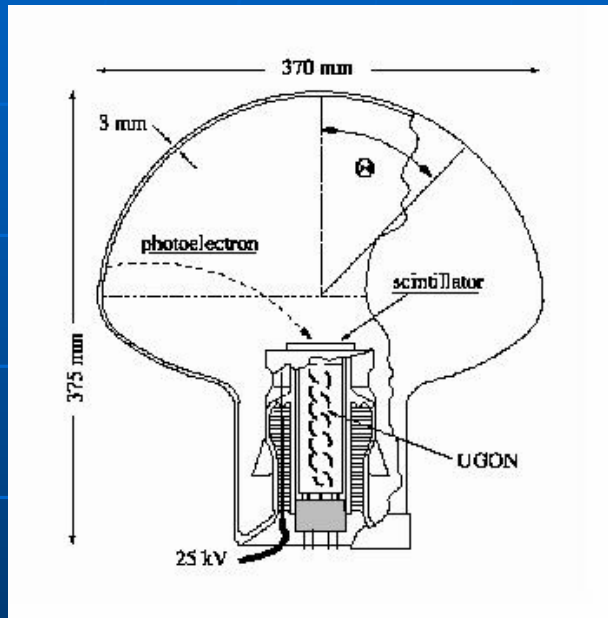
Европейский оптический модуль DUMAND концепции Smart (1983)



- Гибридный ФЭУ Philips XP2600;
- Диаметр 15";
- Электронно-оптическое предусиление;
- Чувствительность в телесном угле $\sim 3\pi$.

Развитие идеи ЕОМ – модули НТ-200

ФЭУ КВАЗАР-370

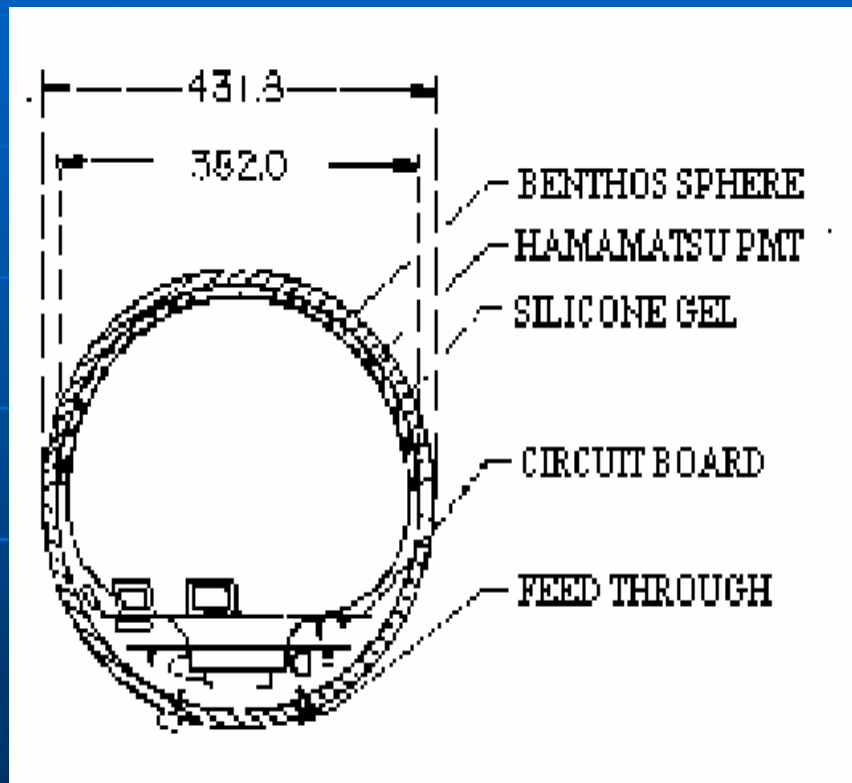


ОМ НТ-200



- Диаметр ФЭУ 37 см;
- Электронно-оптическое предусиление;
- Чувствительность в телесном угле $> 2\pi$.

Японский оптический модуль DUMAND (1989)



- ФЭУ Hamamatsu R2018;
- Диаметр ФЭУ 15";
- Диаметр ОМ 16".

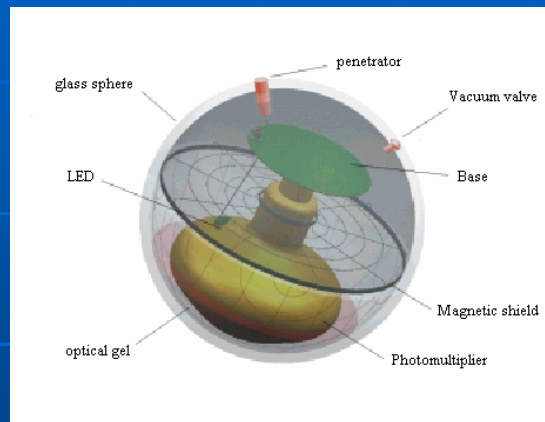
Развитие идеи ЯОМ

ОМ AMANDA



ФЭУ
Hamamatsu R5912-2;
Диаметр 8".

ОМ ANTARES



ФЭУ
Hamamatsu R7081-20;
Диаметр 10".

ОМ Baikal-GVD



ФЭУ
Hamamatsu R7081-100;
Диаметр 10".

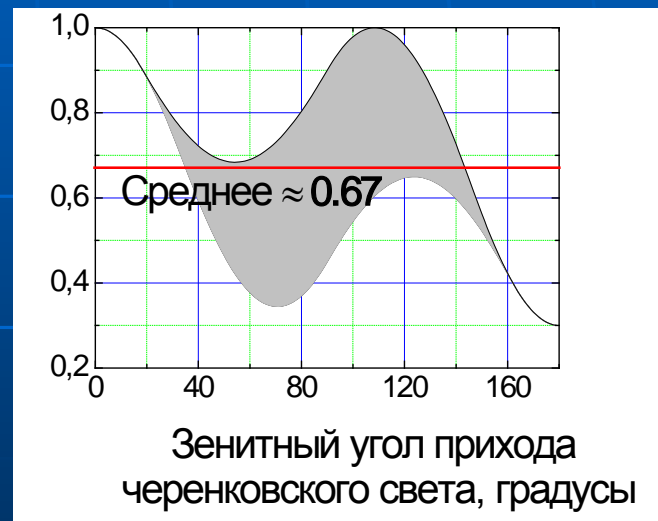
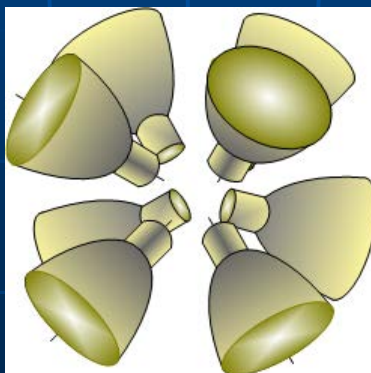
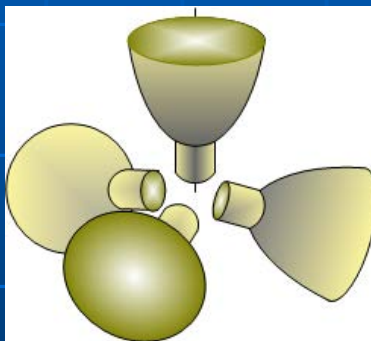
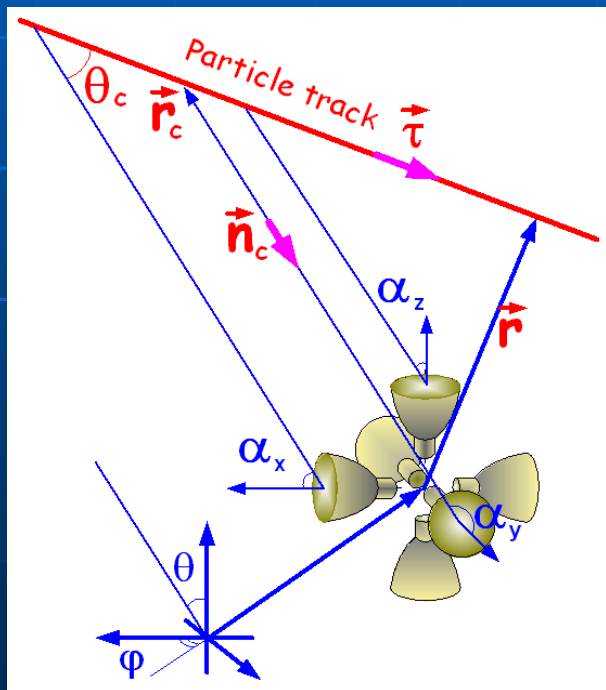
Принцип построения квазисферических модулей

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).



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

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

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

Квазисферический модуль КСМ-6

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.

Использование идеи КСМ в других детекторах

Ярус ANTARES



Наполовину
квасисферический

ОМ KM3NeT



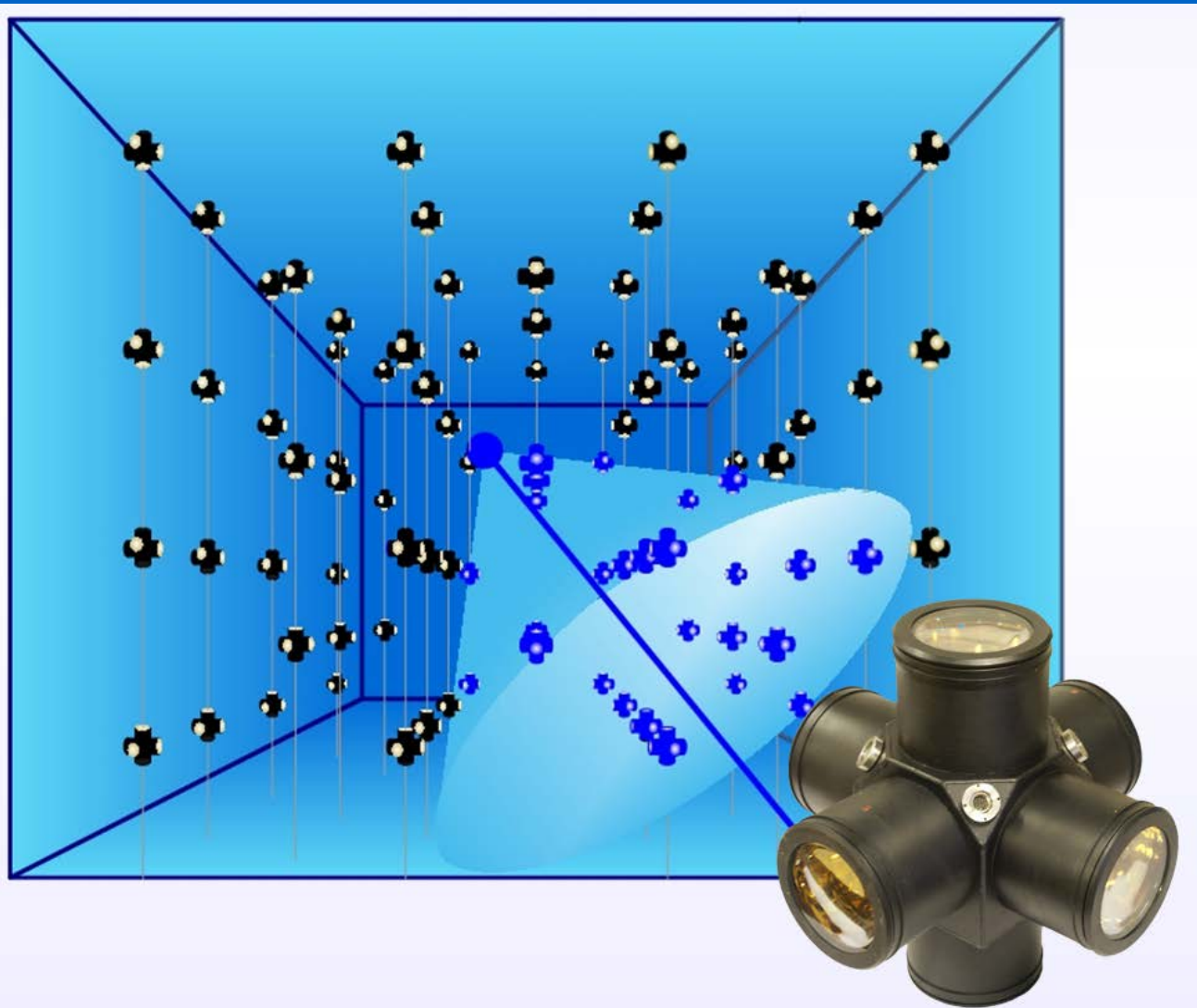
31 ФЭУ диаметром 3";
Диаметр ОМ 17".

ОМ IceCube-Upgrade



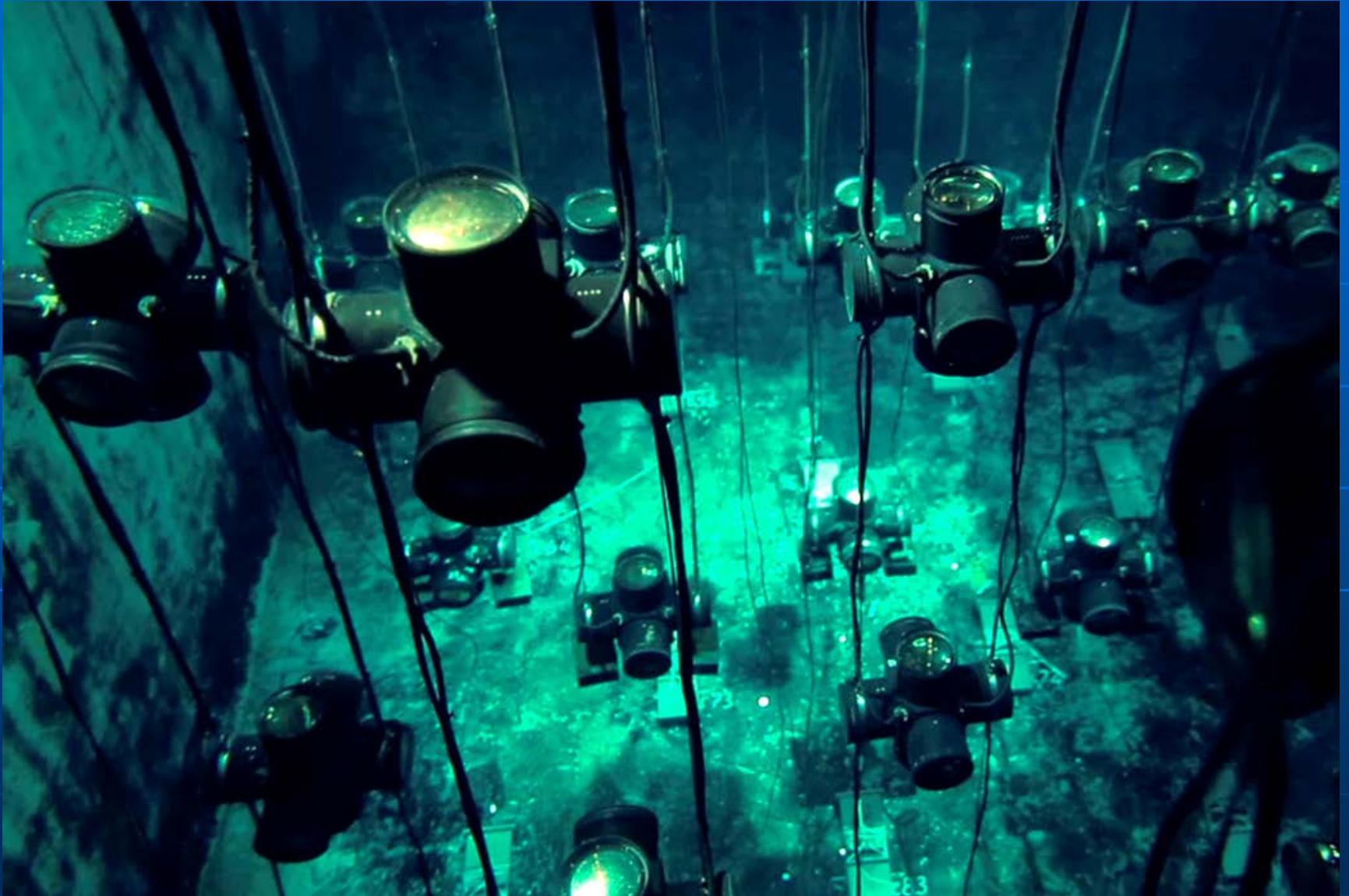
24 ФЭУ диаметром 3";
Диаметр ОМ 8".

Черенковский водный детектор НЕВОД

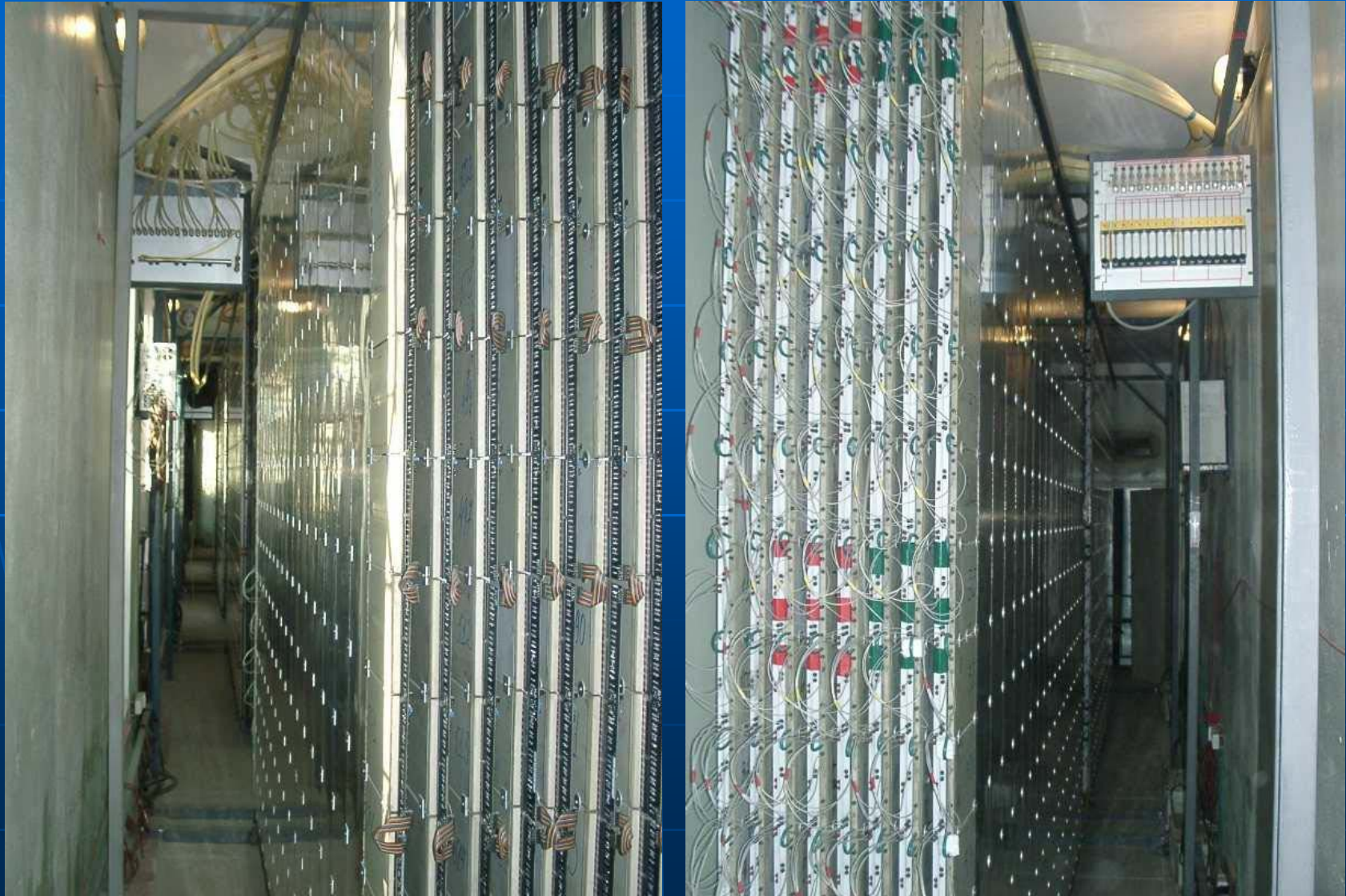


- Объем 2000 м³.
- Детектирование черенковского излучения производится квазисферическими модулями (КСМ).
- Пространственная решетка: 91 КСМ в 25 гирляндах.
- Динамический диапазон каждого канала 1 – 10⁵ ф.э.

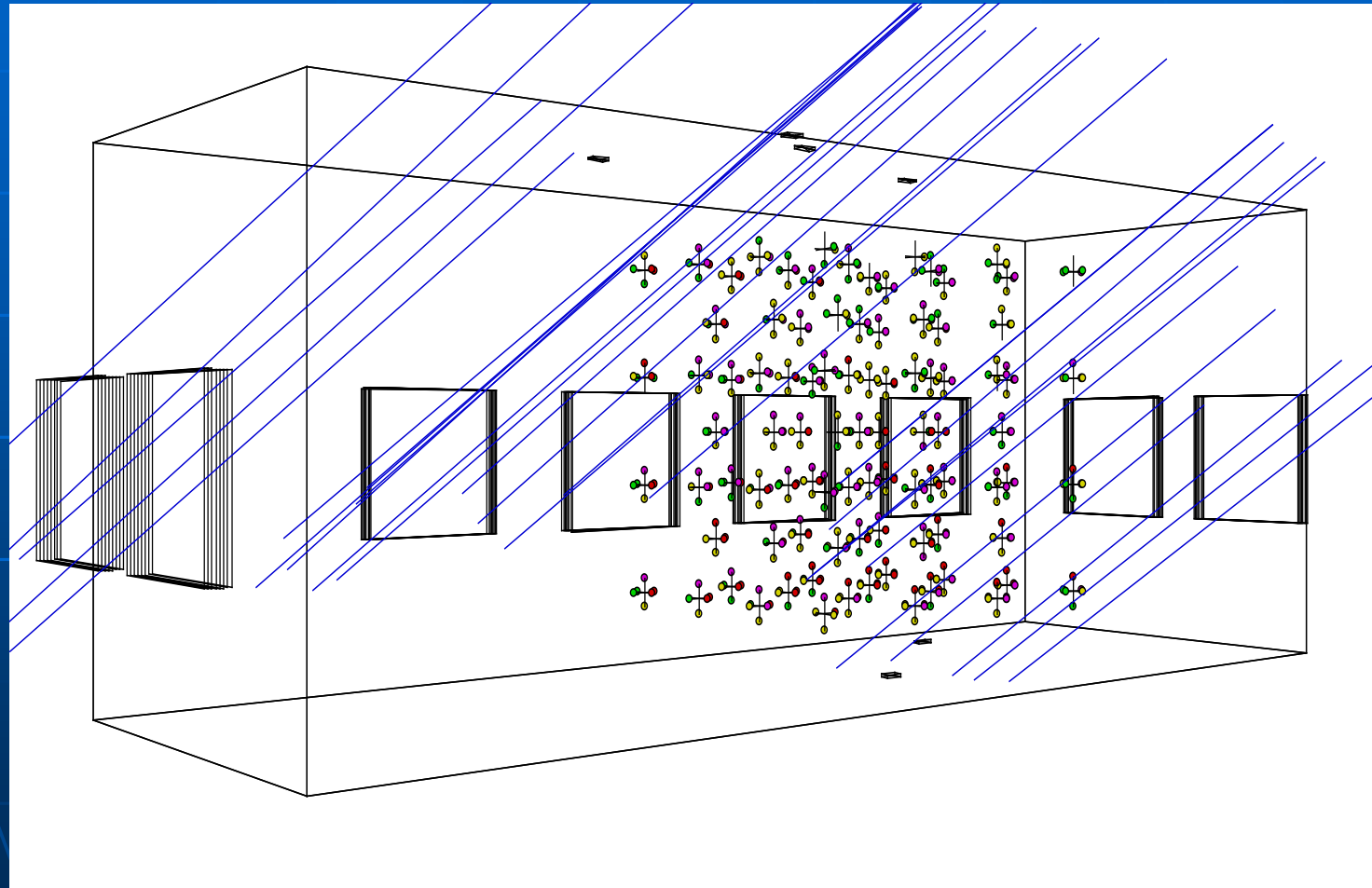
Черенковский водный детектор НЕВОД



Боковой координатно-трековый детектор ДЕКОР



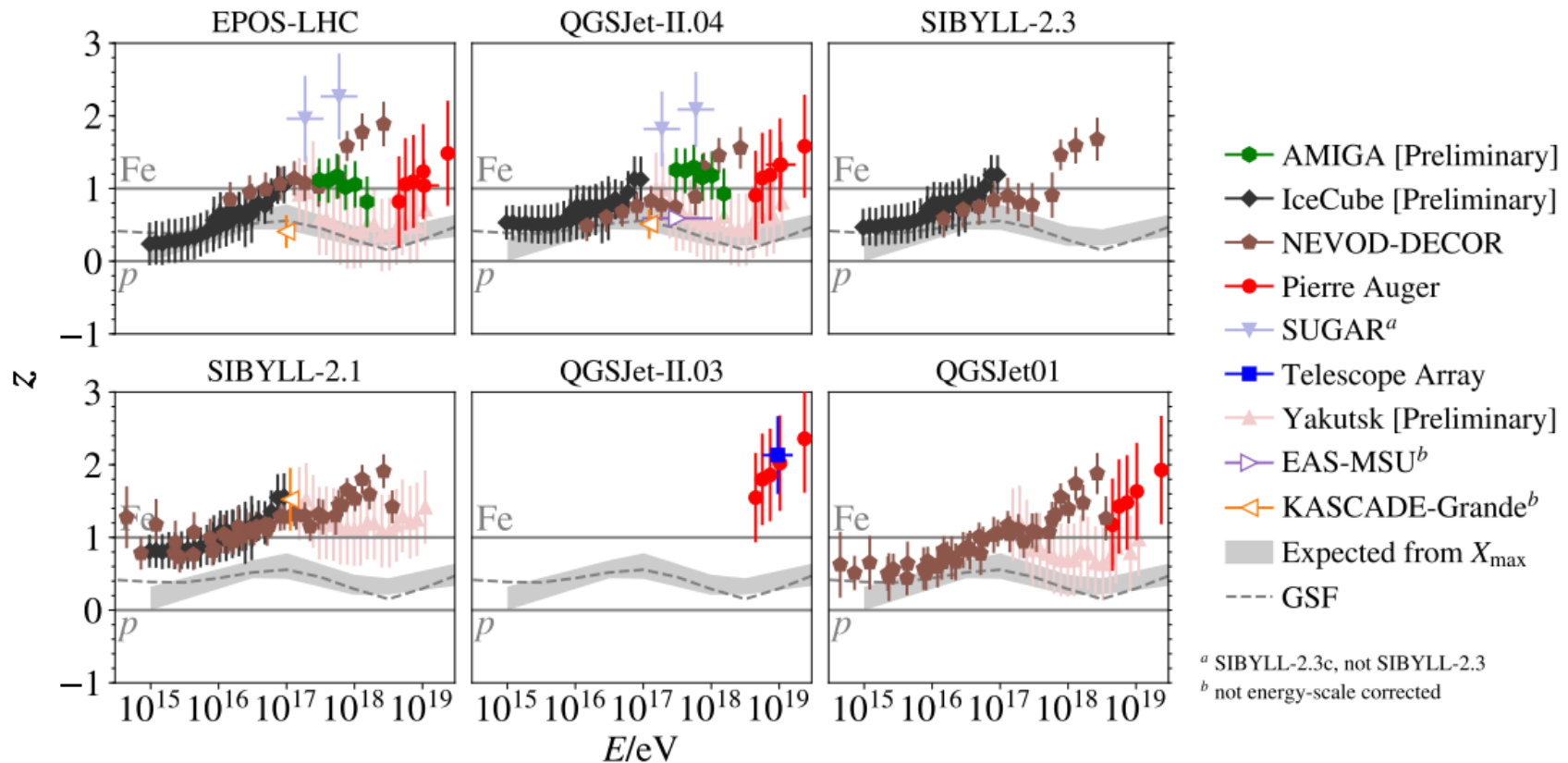
Геометрическая реконструкция события с группой мюонов



Combining muon measurements

(WHISP: Working group in Hadronic Interactions and Shower Physics)

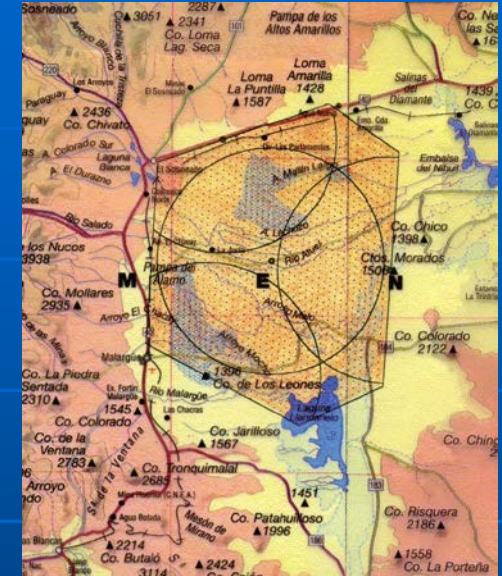
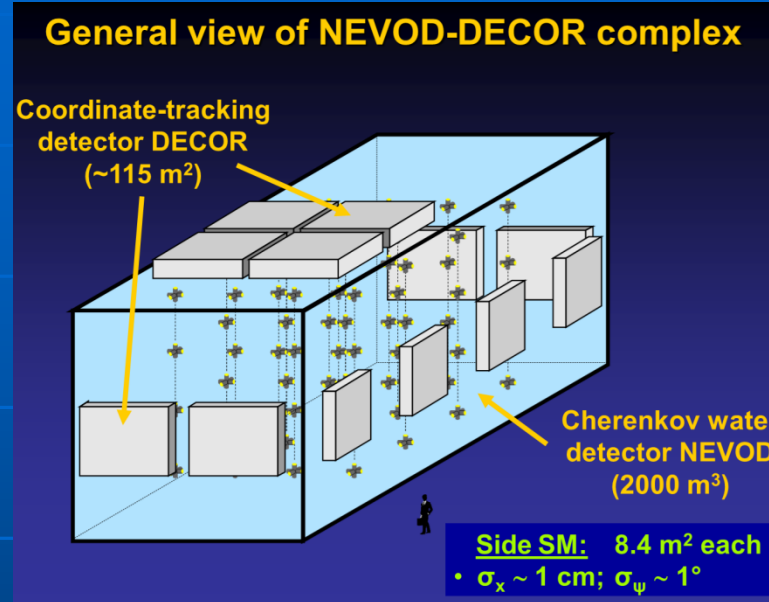
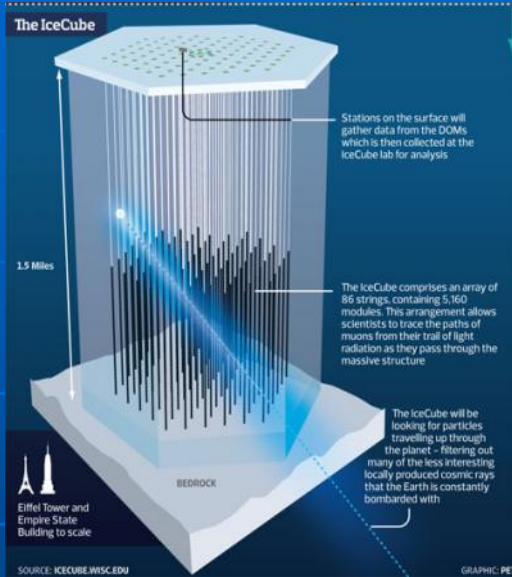
2018



$$z = \frac{\ln(N_{\mu}^{det}) - \ln(N_{\mu p}^{sim})}{\ln(N_{\mu Fe}^{sim}) - \ln(N_{\mu p}^{sim})}$$

Lorenzo Cazon. 36th International Cosmic Ray Conference - ICRC2019

IceCube, NEVOD-DECOR, Pierre Auger



IceCube

$S = 1 \text{ km}^2$
 $10^{15} \div 10^{17} \text{ eV}$
 2018

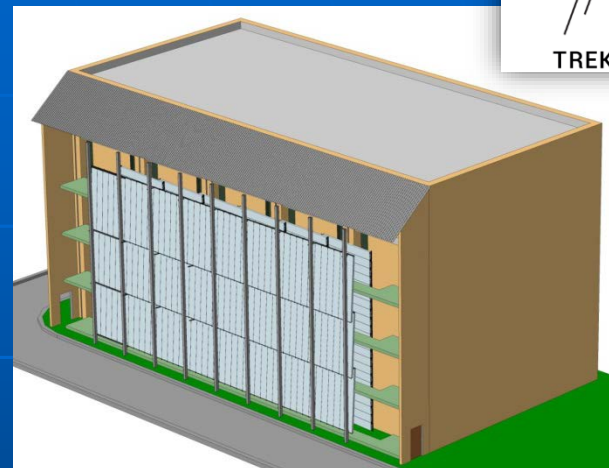
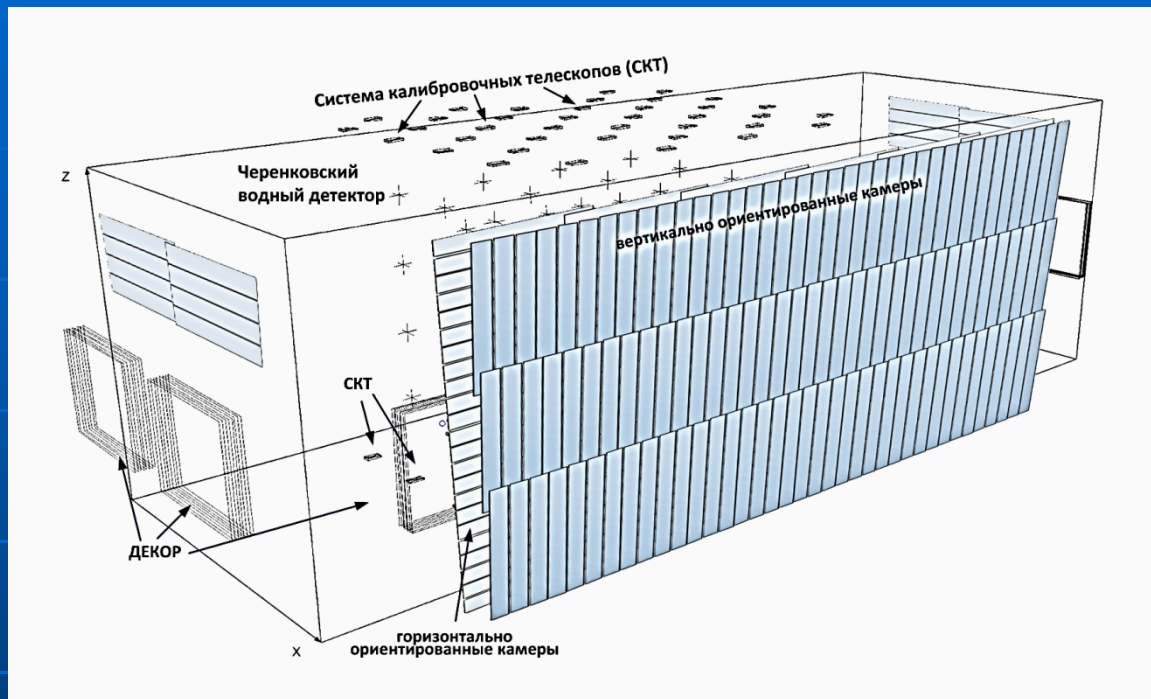
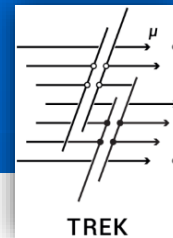
NEVOD-DECOR

$S = 100 \text{ m}^2$
 $3 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{18} \text{ eV}$
 2010

Pierre Auger

$S = 3 \cdot 10^3 \text{ km}^2$
 $3 \cdot 10^{18} \div 3 \cdot 10^{19} \text{ eV}$
 2013

Координатно-трековый детектор ТРЕК



264 дрейфовые камеры
Полное перекрытие апертуры ЧВД
Площадь детектора—254 м² (в 8 раз больше)
Разрешение двух треков ~ 3 мм (в 10 раз

меньше)





Новый квазисферический модуль КСМ-6М

Планируется создать две новых вертикальных плоскости по 16 КСМ в каждой. Объем пространственной решетки увеличится с 800 до 1200 м³.

ФЭУ-200

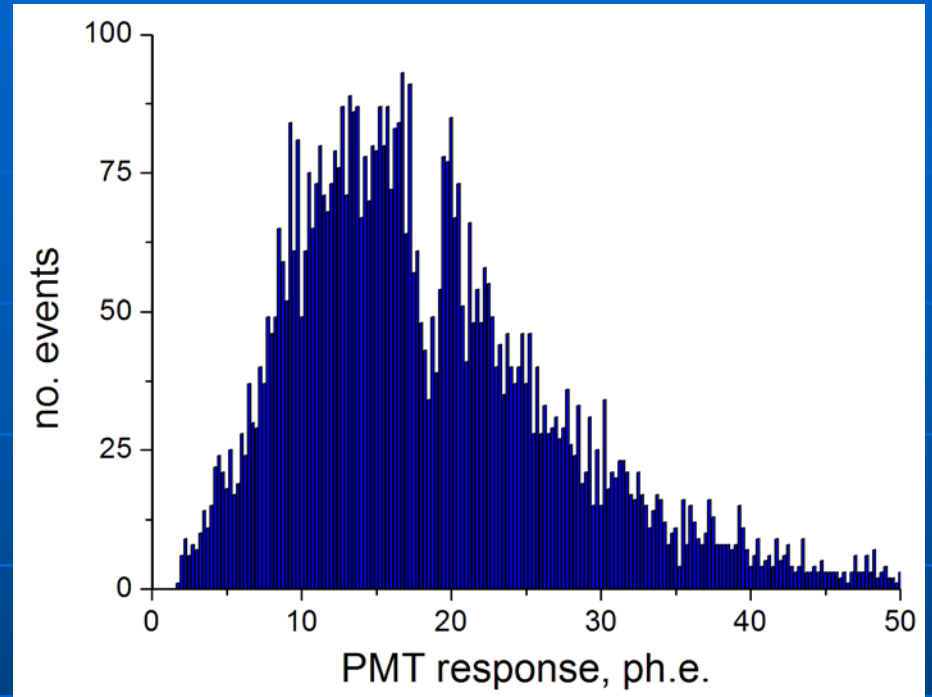
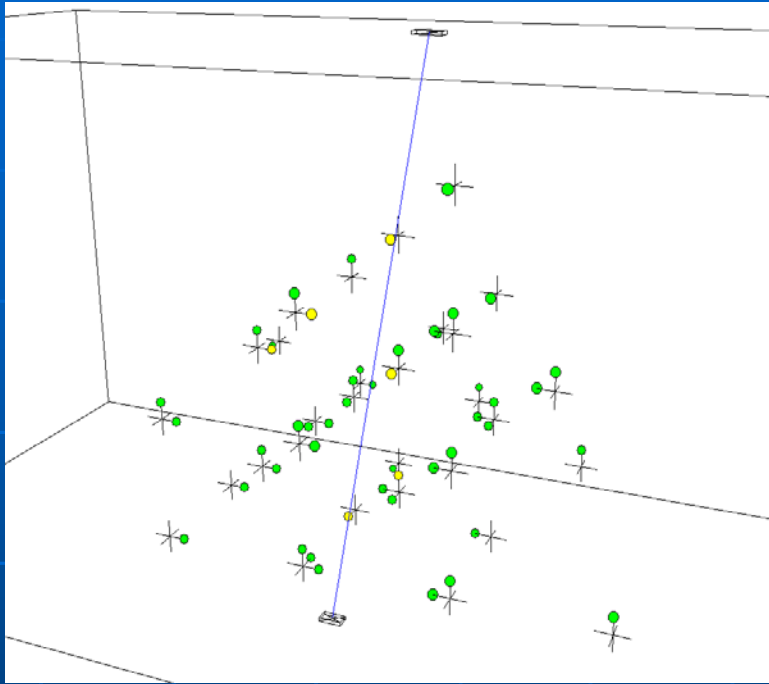
Hamamatsu R877

Новый оптический модуль основан на ФЭУ Hamamatsu R877.



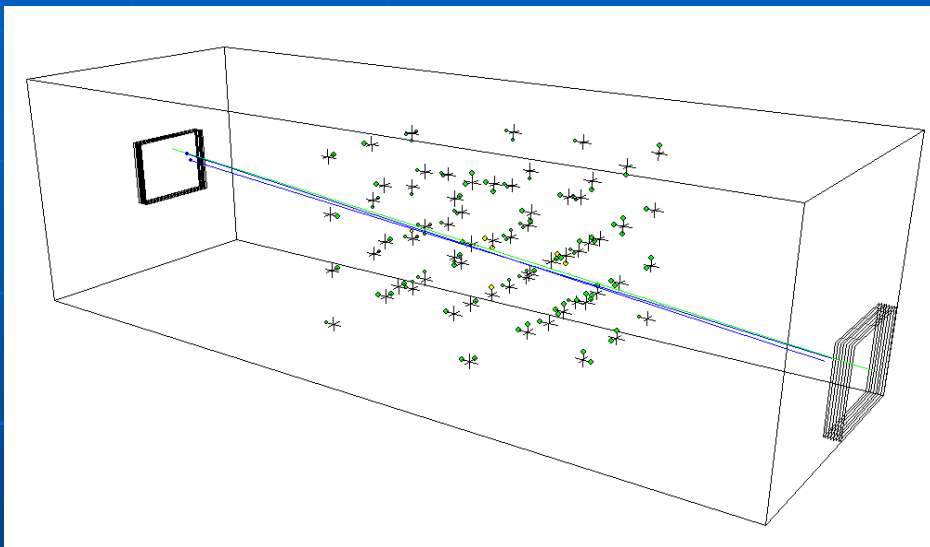
	ФЭУ-200	R877
Катод		плоский
Материал		бищелочной
Каолба	170 мм	133 мм
Катод	150 мм	110 мм
Дин. Сист.	жалюзи	коробчатая
Число динодов	12	10
НУ	1500	1250

Response of PMTs on near-vertical muons selected by means of calibration telescopes



PMT in OM	D, m	N _{ev}	Eff, %	<Amp>, ph.e.
1	0.97	9206	93.9	12.9
2	0.72	6549	96.1	18.5
3	0.97	7538	95.2	13.8
4	0.72	8036	95.7	15.5
6	1.0	16744	90.4	7.7
6	1.25	15390	85.4	6.2

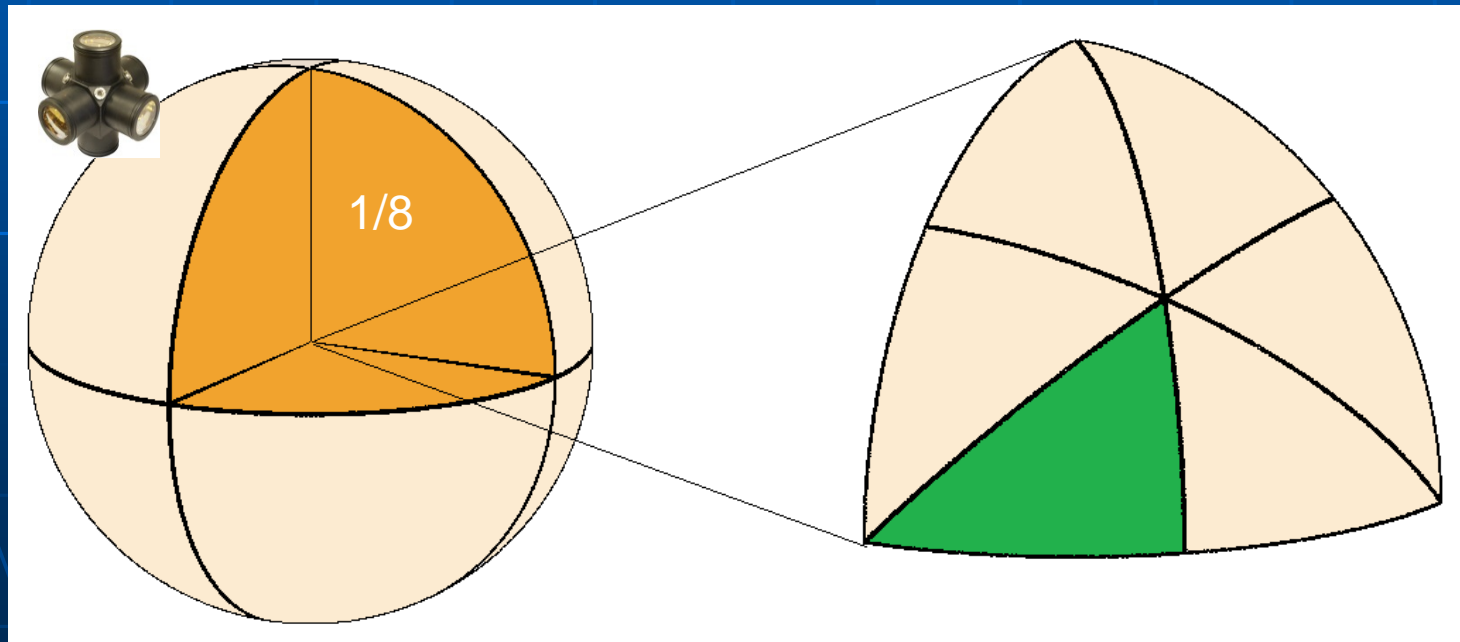
Отклик КСМ-6М на одиночные окологоризонтальные мюоны



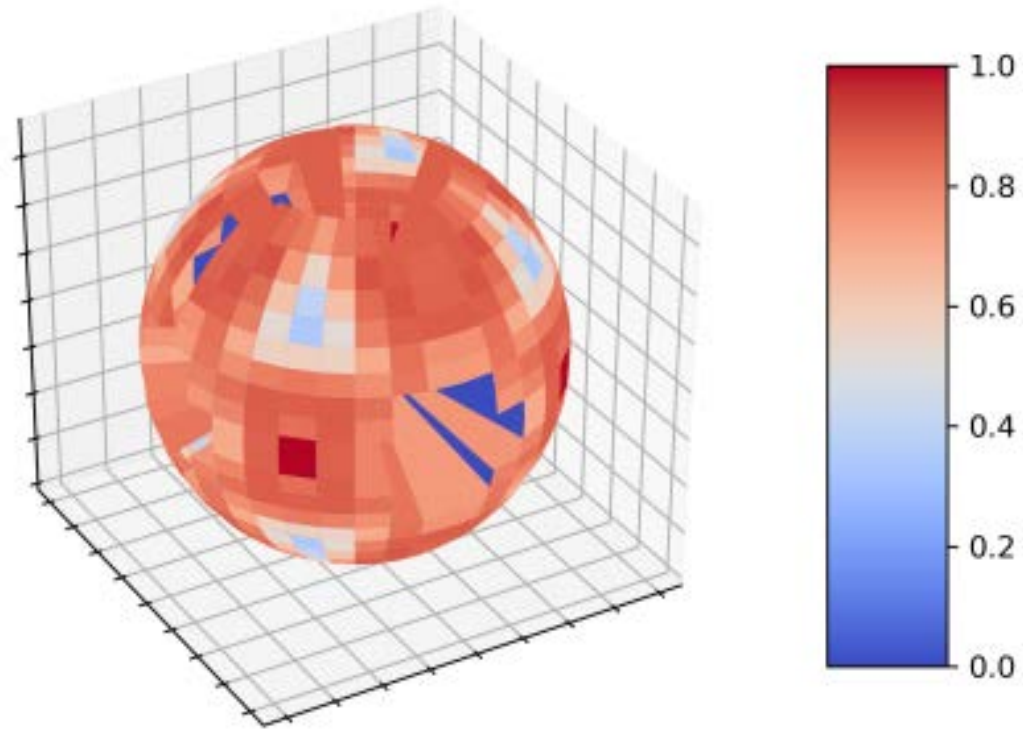
Среднее значение косинуса 0.88 ± 0.16 .

Исследование сферичности модуля. Подход

- исследуется не отдельно взятый модуль, а средние характеристики отклика КСМ пространственной 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:



Сферичность отклика КСМ-6М



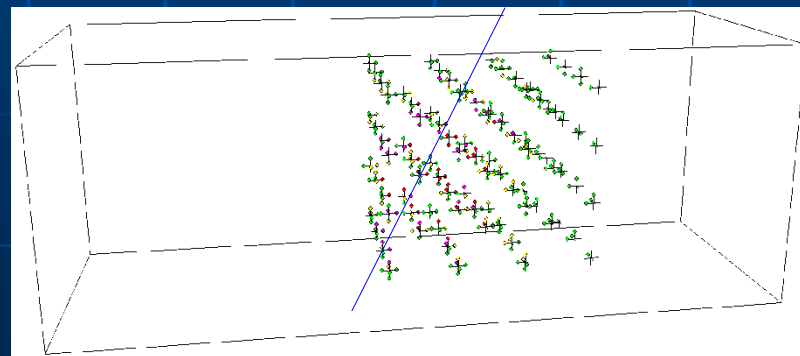
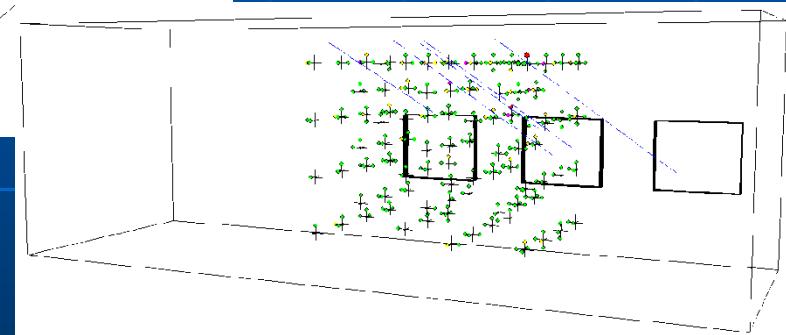
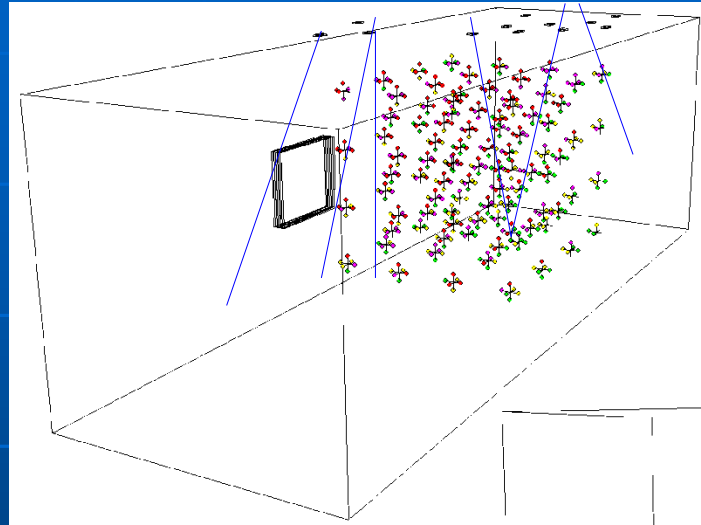
Сферичность отклика ~14 %.

События с большим энерговыделением

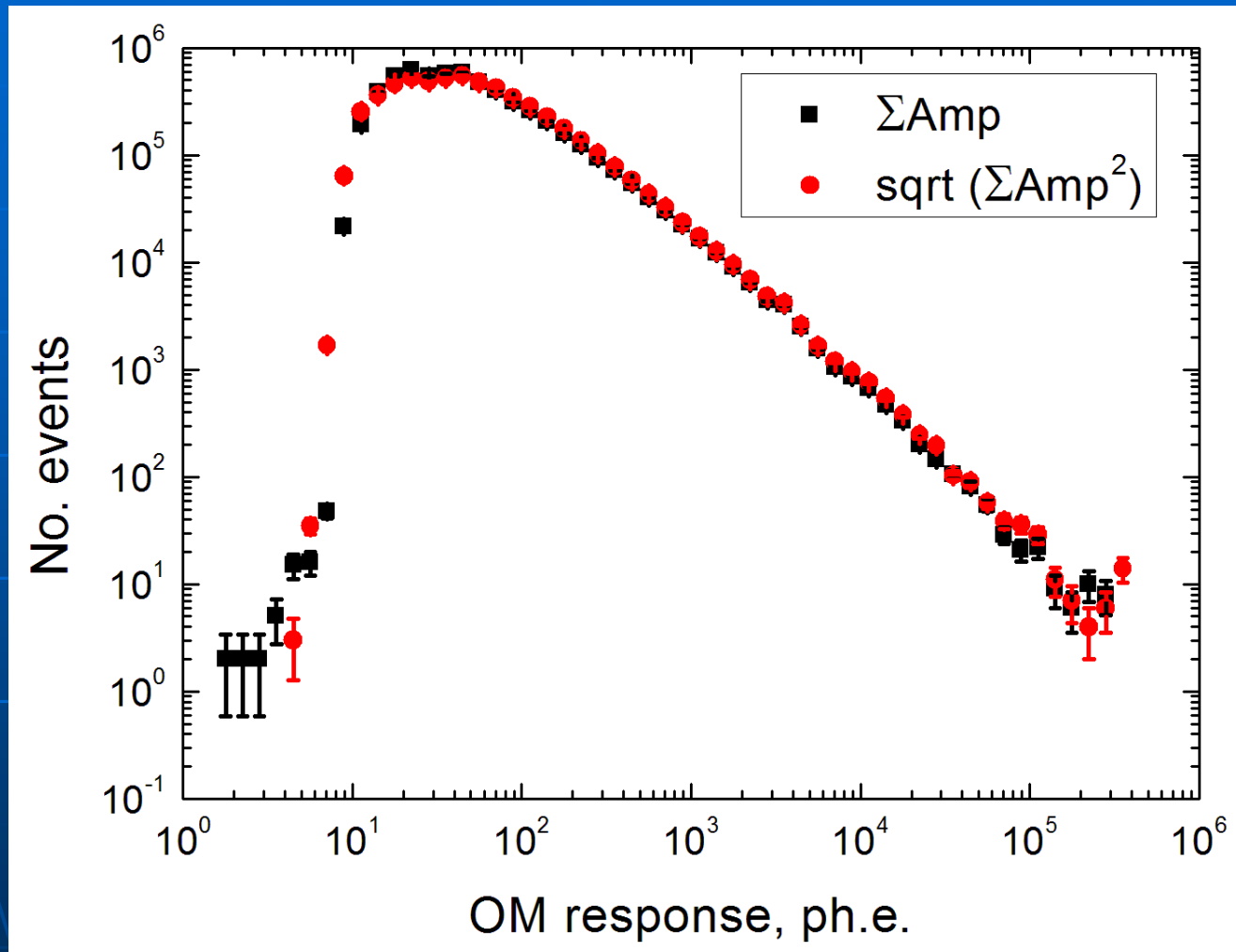
Экспериментальный комплекс имеет специальный триггер "60с" ($\sim 4 \text{ с}^{-1}$) для регистрации событий с большим энерговыделением.

В том числе:

- ШАЛ;
- группы мюонов;
- каскады, генерируемые мюонами и адронами.

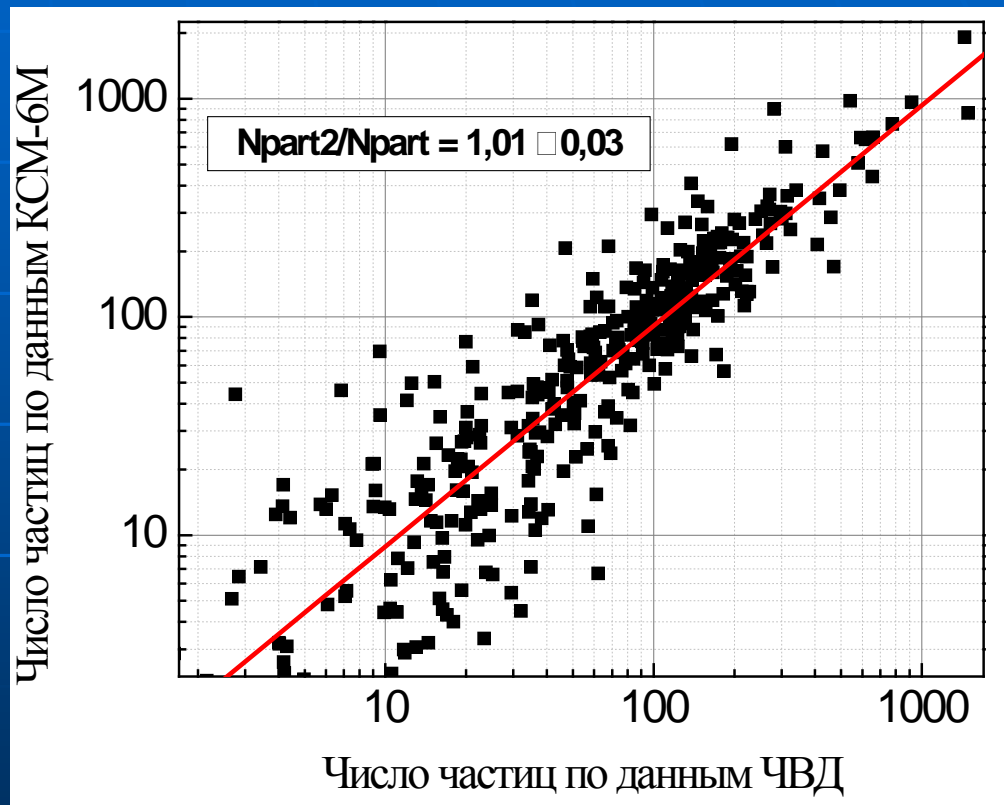
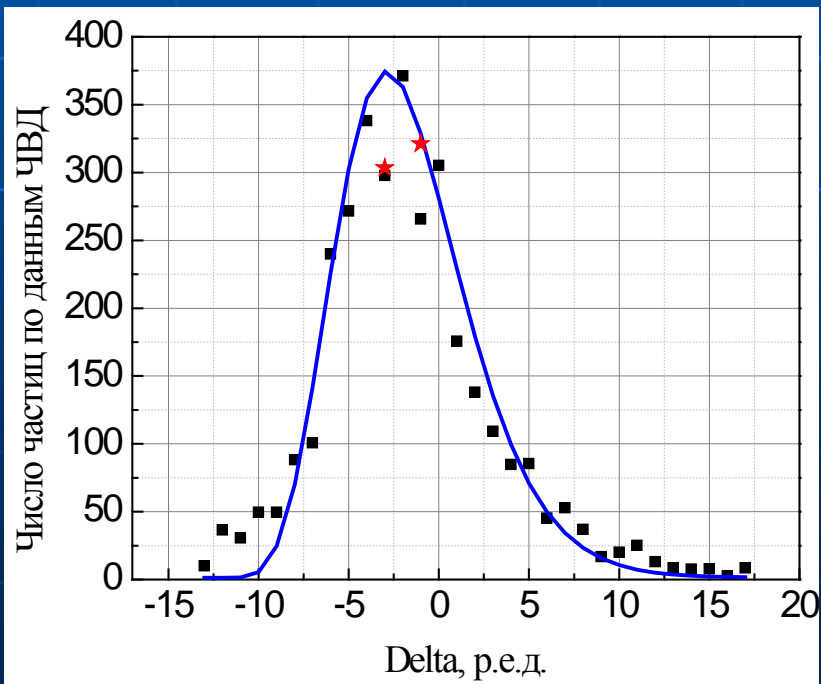
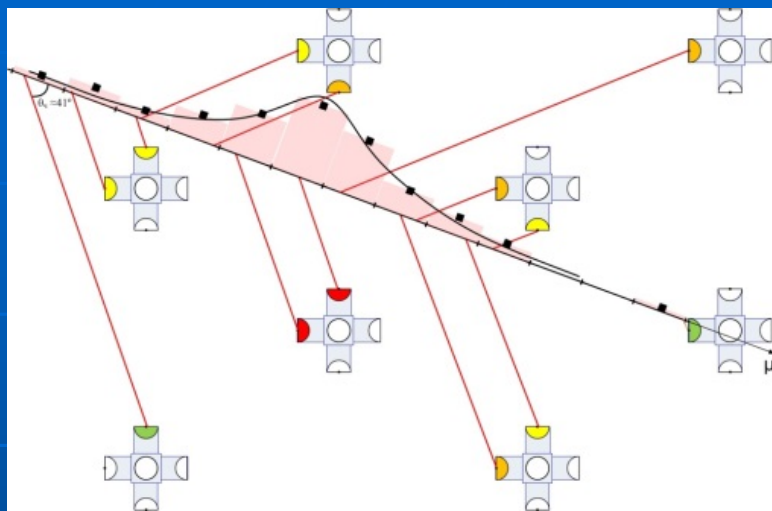


Отклик КСМ-6М в событиях с большим энерговыделением



Показатель наклона спектра $\gamma = 2.4$ (близок к показателю наклона спектра энерговыделений ШАЛ).

Отклик КСМ-6М при регистрации каскадных ливней



Заключение

- Разработан оптический модуль КСМ-6М на базе ФЭУ Hamamatsu R877;
- Проведены годовые испытания в воде;
- Сферичность КСМ-6М 14 %;
- Рекордный диапазон линейности $6 \cdot 10^5$ ф.э.;
- Телесный угол 4π.

Спасибо за внимание!

