



Лаборатория космических лучей
предельно высоких энергий НИИЯФ МГУ



Орбитальный детектор космических лучей предельно высоких энергий: статус и перспективы проекта «КЛПВЭ»

К.ф-м.н. зав. лабораторией НИИЯФ МГУ Климов П.А.

37-я Всероссийская конференция по космическим лучам
Москва, НИИЯФ МГУ, 2022

P. Klimov, M. Battisti, A. Belov, M. Bertaina, M. Bianciotto, S. Blin-Bondil, M. Casolino, T. Ebisuzaki, F. Fenu, C. Fuglesang, W. Marszal,, A. Neronov, E. Parizot, P. Picozza, Z. Plebaniak, G. Prevot, M. Przybylak, N. Sakaki, S. Sharakin, K. Shinozaki, J. Szabelski, Y. Takizawa, D. Trofimov, I. Yashin, M. Zotov. Status of the K-EUSO orbital detector of ultra-high energy cosmic rays. *Universe*, 8(2):88, 2022.

Регистрация КЛ ПВЭ с орбиты Земли

Основная проблема – малая статистика...

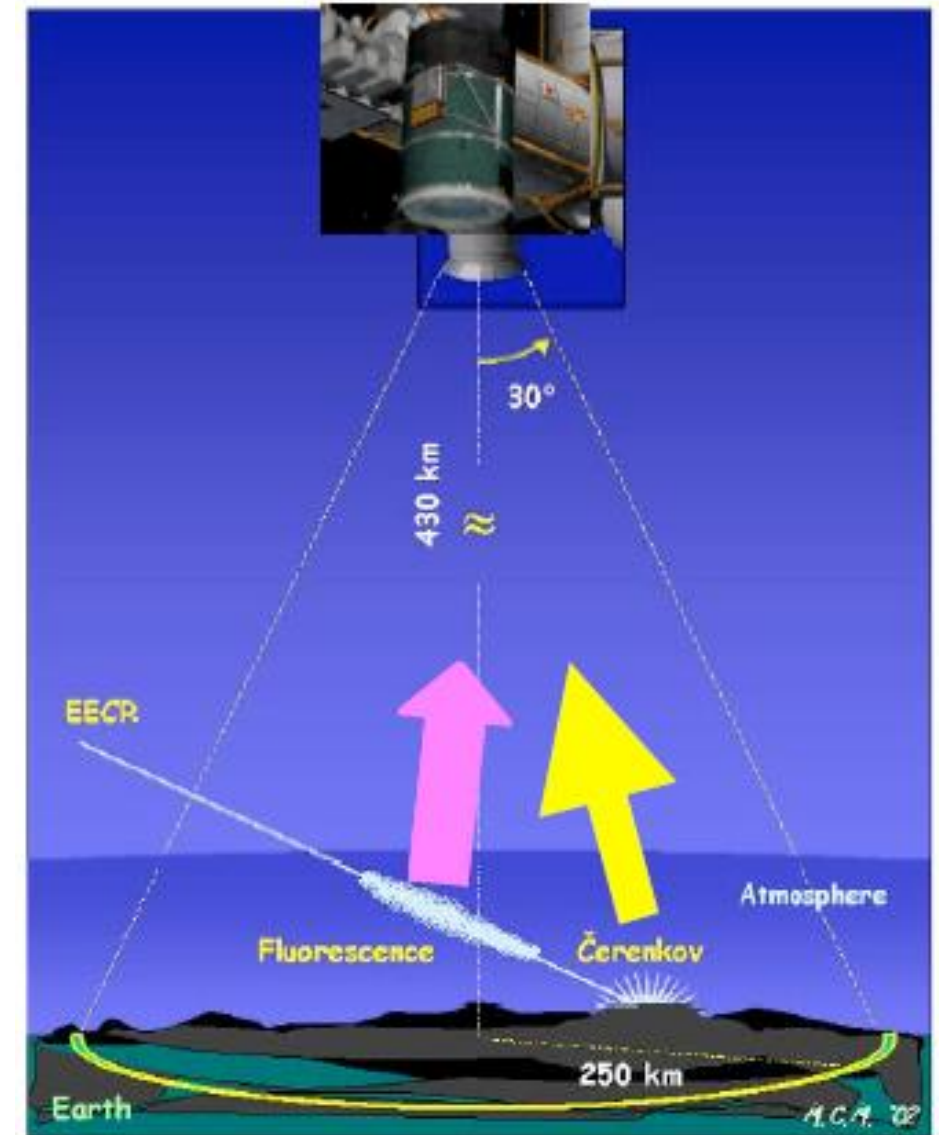
▶ Существующие установки:

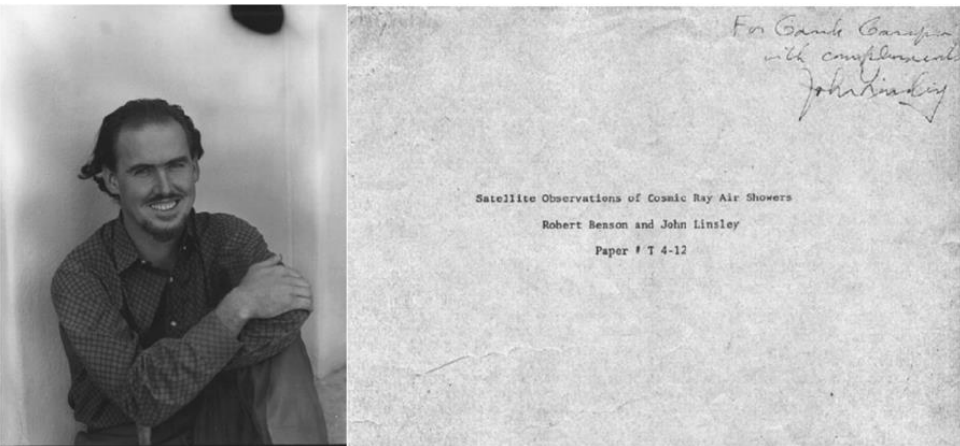
- ▶ Pierre Auger Observatory: 3,000 km²
~20 событий > 60 EeV/год
- ▶ Telescope Array: 700 km² Utah, USA
~5 событий > 60 EeV/год

Итого: Auger + TA < 30 событий/год

Поверхность Земли ~ $5 \cdot 10^8$ km²

~ $3.4 \cdot 10^6$ событий в год

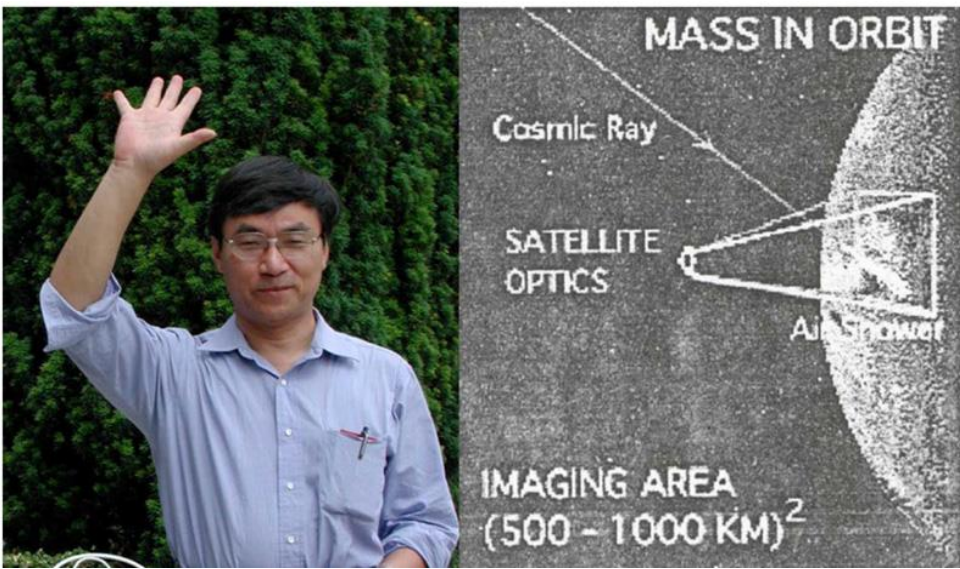




Benson, R. and Linsley, J., 1981, Satellite observation of cosmic ray air showers, In International Cosmic Ray Conference, 17th, Paris, France, July 13–25, Conference Papers. Volume 8

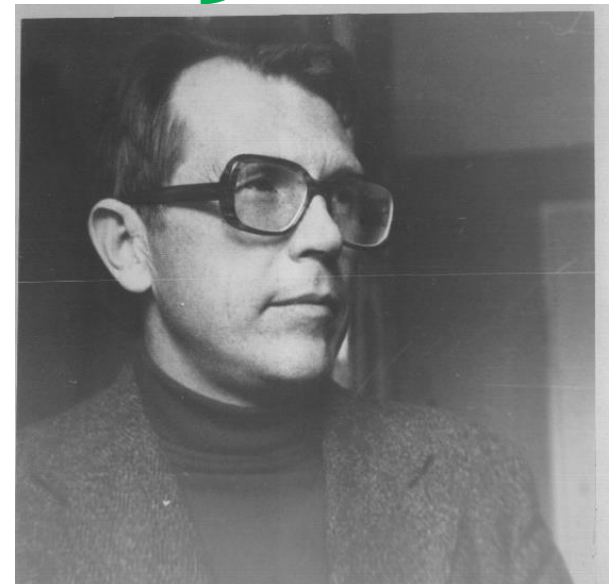
- 1) OWL – two Schmidt telescopes
 - 2) EUSO (JEM-EUSO) – wide field of angle Fresnel lens telescope. L. Scarsi – T. Ebisuzaki – P. Picozza
 - 3) TUS & KLYPVE – Fresnel mirror concept (M. Panasyuk, B. Khrenov)
- } POEMMA

} K-EUSO



Yoshiyuki Takahashi suggested the concept of MASS, the Maximum-Energy Auger (Air)-Shower Satellite, 1995

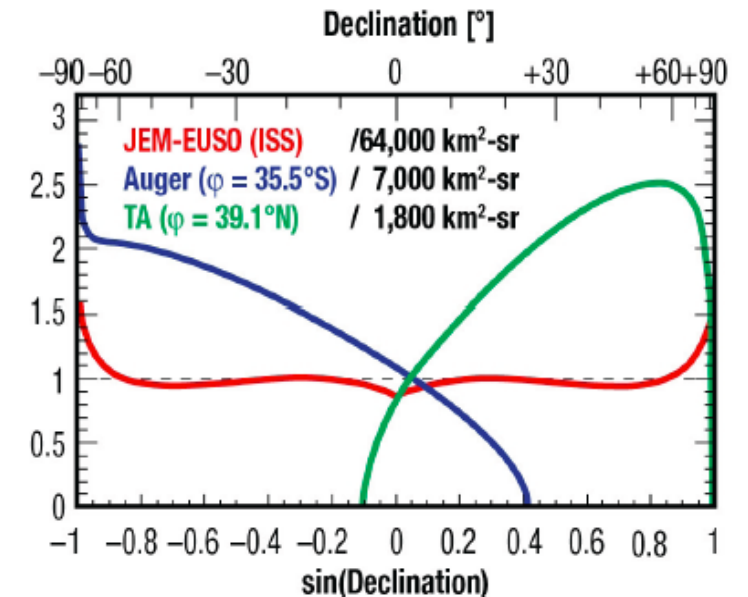
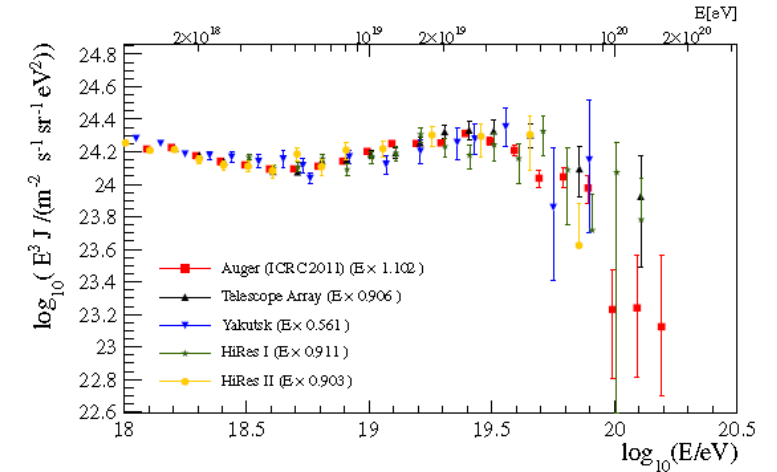
Figures from T. Ebisuzaki, **Space-based observation of the extensive airshowers**, EPJ Web of Conferences **53**, 01014 (2013)



Преимущества орбитального детектора

Важные экспериментальные трудности наземных экспериментов:

- Недостаточное количество событий в области предельно высоких энергий
- Наблюдение неполной небесной сферы
- Систематические отличия между разными установками
- Орбитальный детектор обеспечивает равномерный обзор всей небесной сферы. Это важно для изучения анизотропии КЛ ПВЭ.
 - Крупномасштабной (дипольный анализ...)
 - Поиск локальных источников (hotspot)
 - Сравнение спектра (потока) в различных регионах с равной экспозицией
- Большое поле зрения детектора
- Прозрачность верхней атмосферы
- «Фиксированное» расстояние до ШАЛ ($H_{\text{sat}} \gg h_{\text{max}}$)

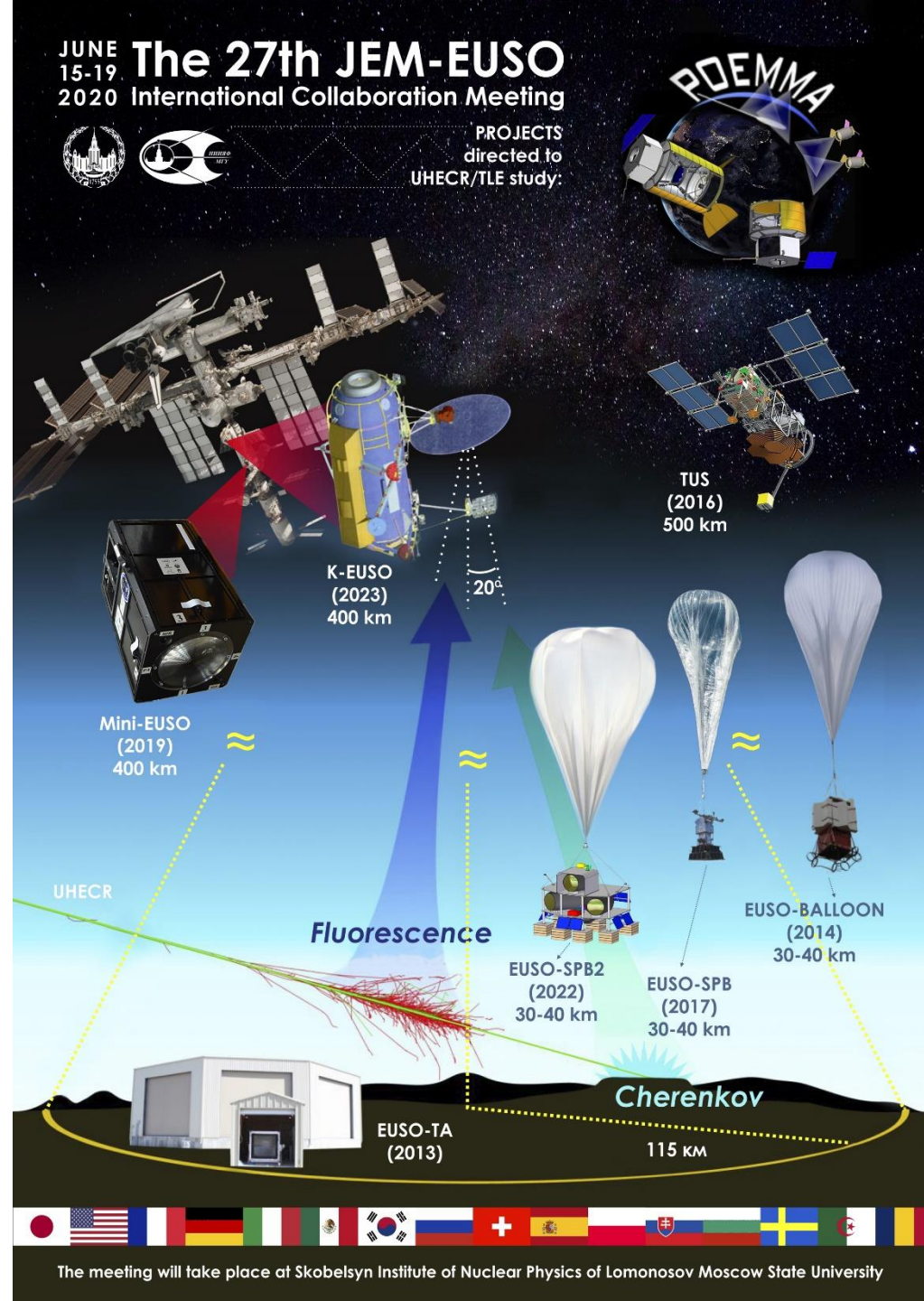


JEM-EUSO Program

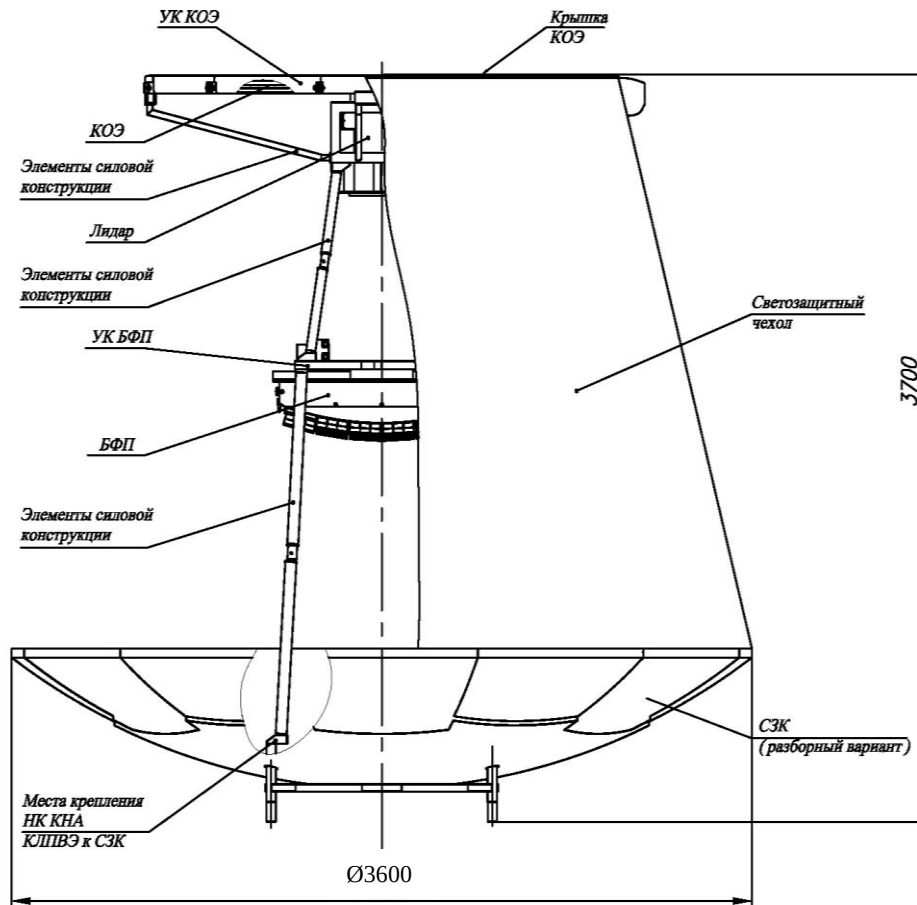


- EUSO-TA 2013
- EUSO-BALLOON 2014
- TUS 2016
- EUSO-SPB-01 2017
- MINI-EUSO/UV 2019
- New EUSO-TA 2020
- EUSO-SPB-02 2022
- *КЛПВЭ (K-EUSO)*
- РОЕММА

Исследование спектра, массового состава и поиск источников КЛ за пределом ГЗК

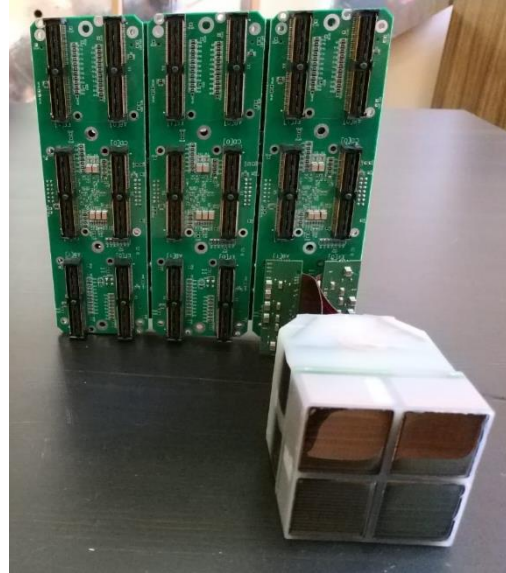
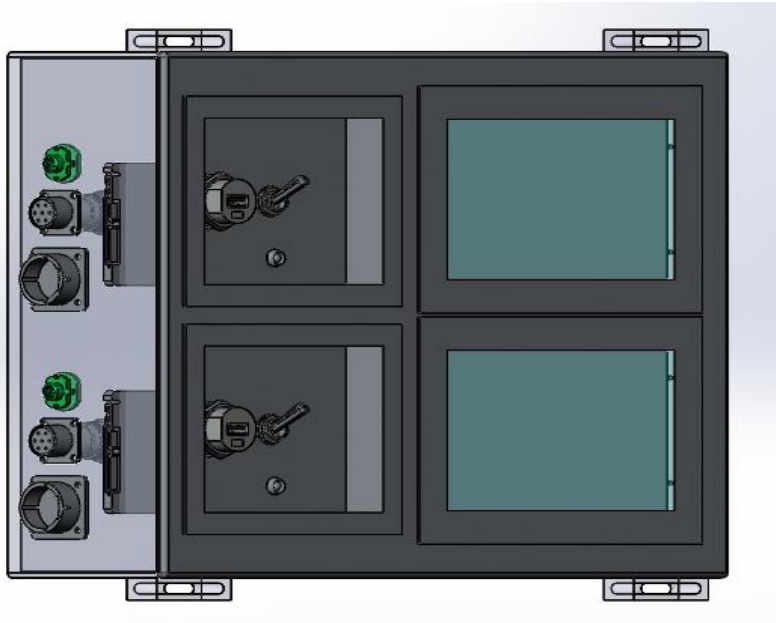


Результаты проработки на стадии эскизного проектирования



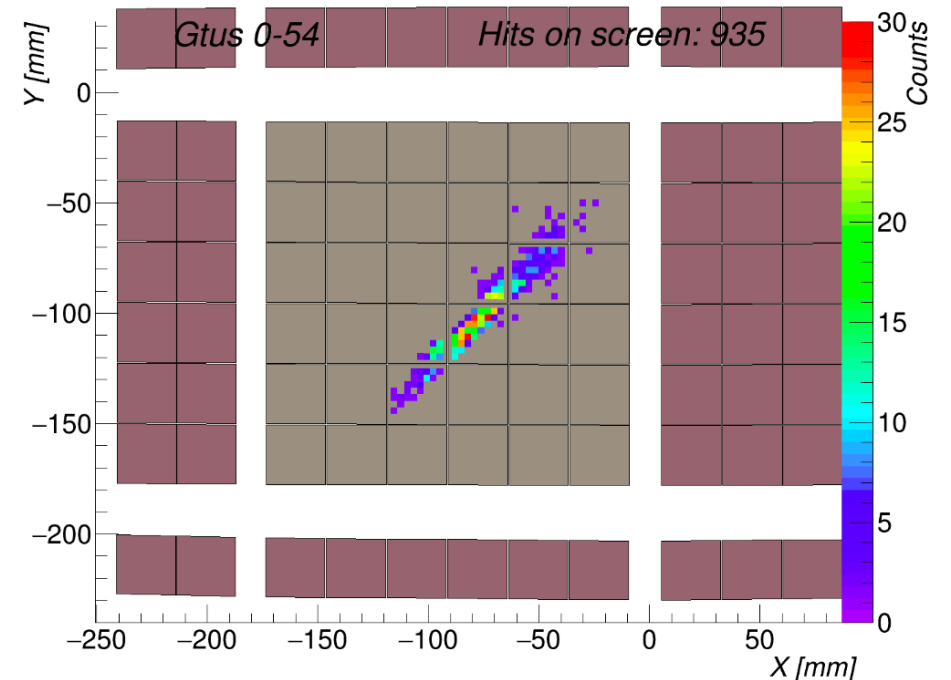
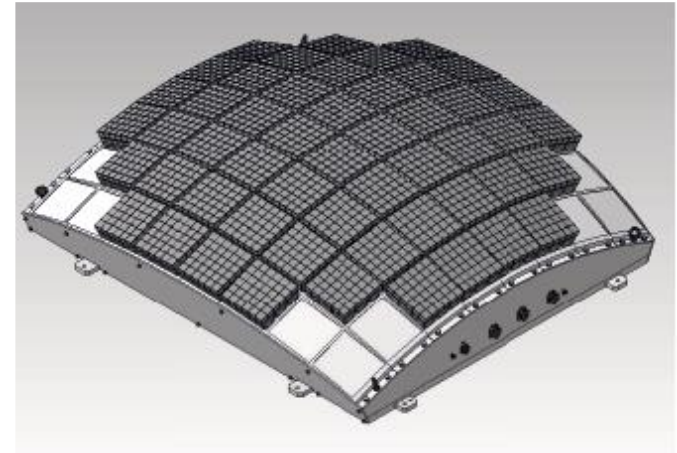
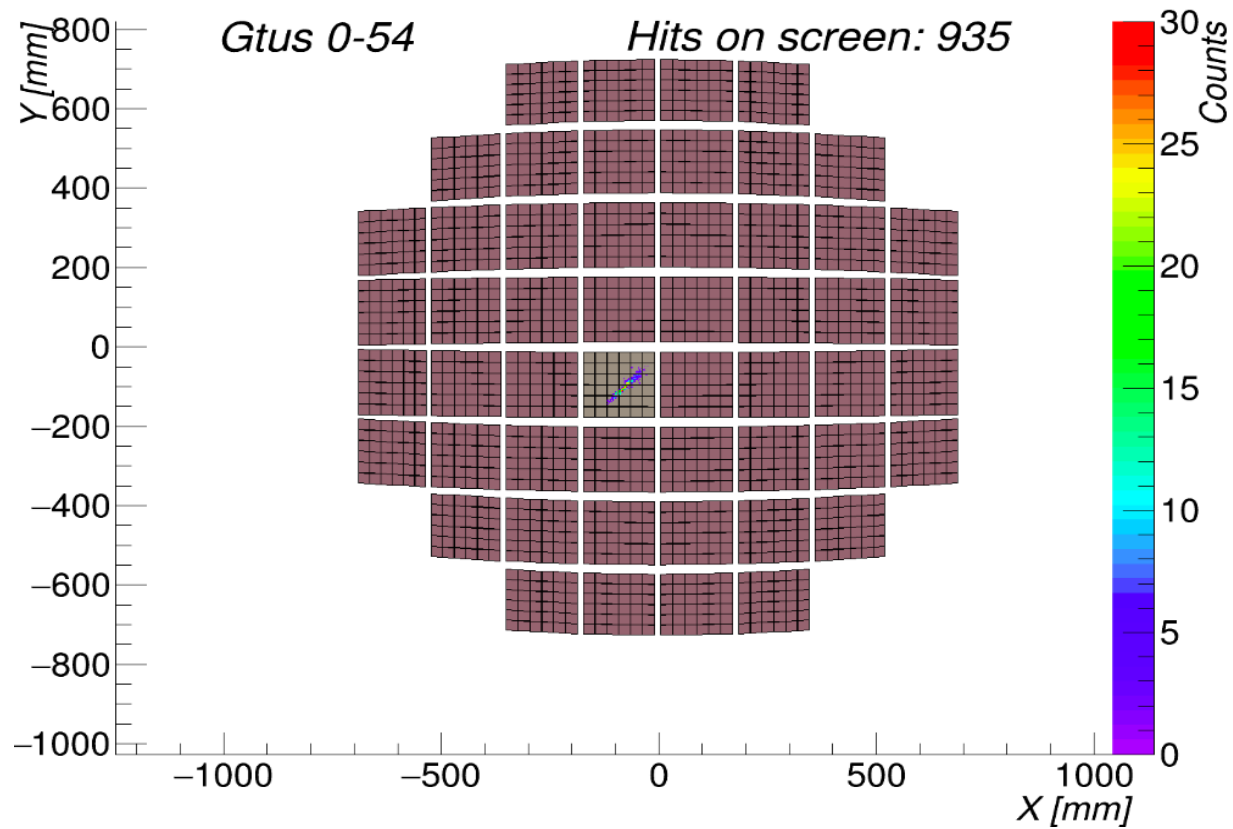
Камера Шмидта $D_m=3.6$ м, диаметр входного окна 2.5 м

Изготовление макетов прибора



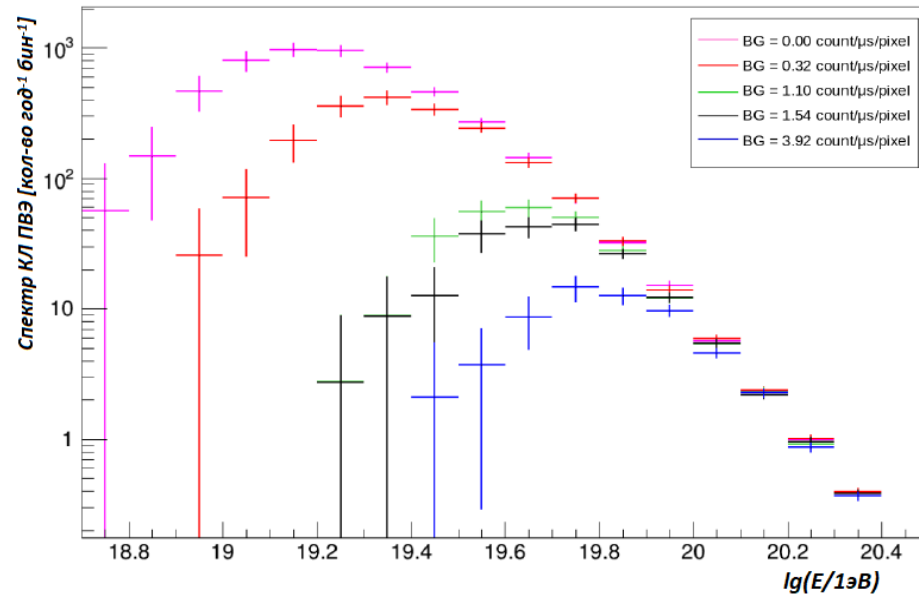
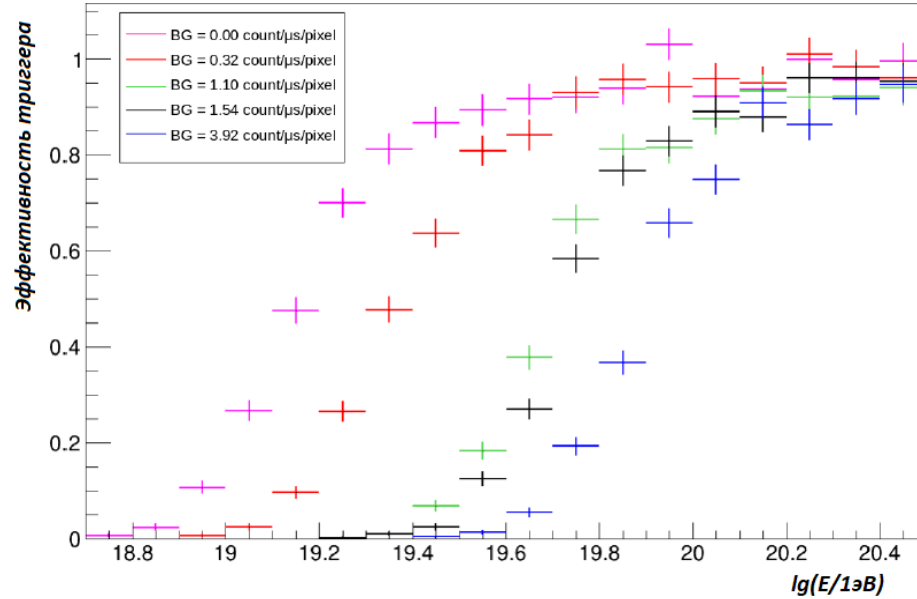
- ✓ Элементы электроники (модуль фотоприемника, блок обработки данных)
- ✓ Элементы оптической системы (модуль зеркала)

Моделирование работы детектора



Трек ШАЛ на фотоприемнике «КЛПВЭ», снизу - в увеличенном виде изображен модуль фотоприемника, куда попал сигнал. Цветом обозначен интегральное значение сигнала (для простоты фон выключен).

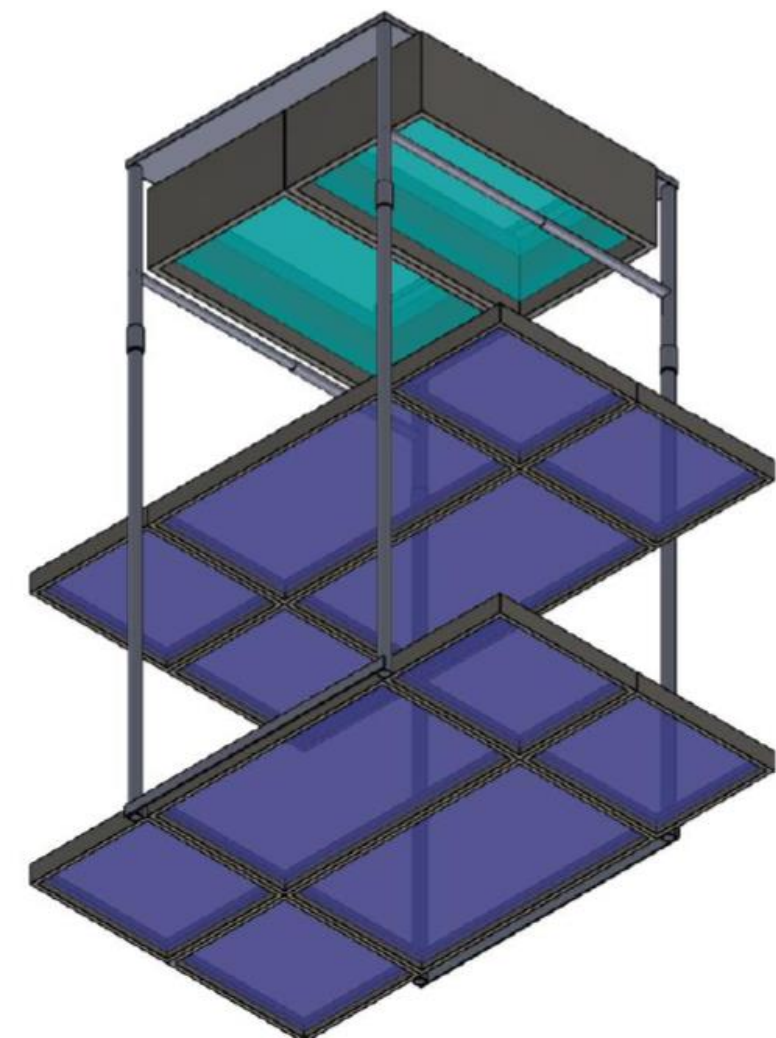
Эффективность триггерной системы и ожидаемое число событий в год (спектр)



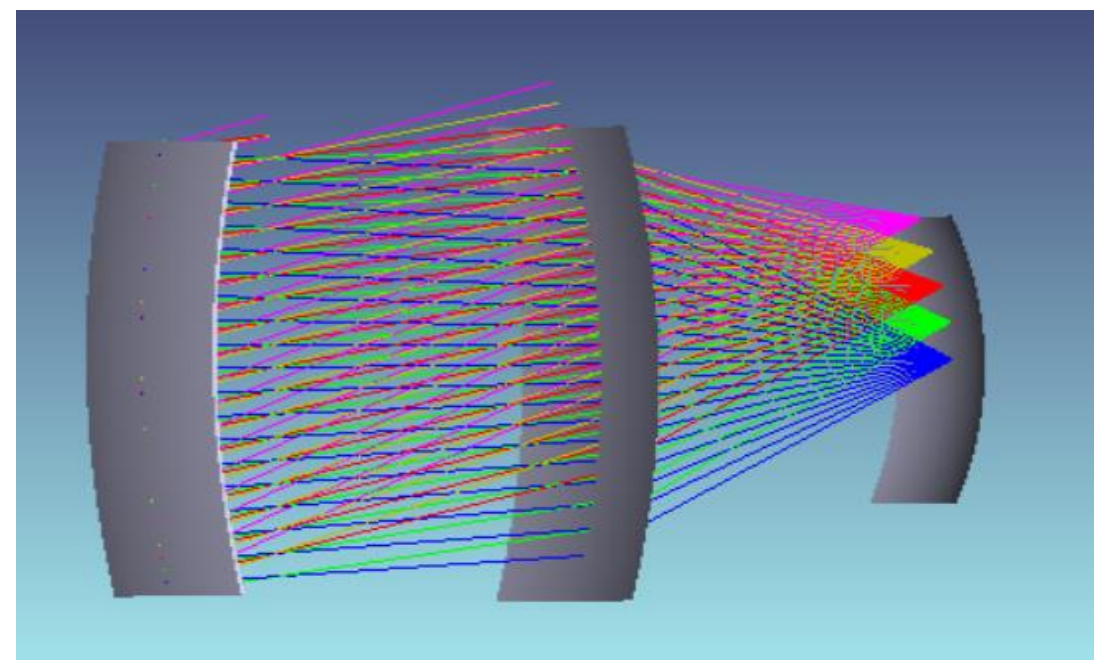
Спектр по данным РАО (ICRC2017)

$\lg(E/1\text{эВ})$	19,4	19,5	19,6	19,7	19,8	19,9	20,0	20,1	20,2	20,3	20,4
$\geq E$ [ЭэВ]	22	28	35	45	56	71	89	112	141	178	224
A	120	96	68	42	22	10,3	4,5	1,8	0,7	0,3	0,08
Б	313	250	177	109	58	27	12	5	1,9	0,7	0,2

Altitude	≈ 400 km
Field of View	0.3 sr (48 000 km ²)
Pixel size	3 mm $\times$ 3 mm
Spatial/Temporal Resolution	0.6 km (pixel) / 2.5 μ s (GTU)
Entrance Pupil Area	~ 3 m ²
Number of PDMs/channels	44/101,376
Dimensions (unfolded)	$\approx 125 \times 250 \times 400$ cm ³

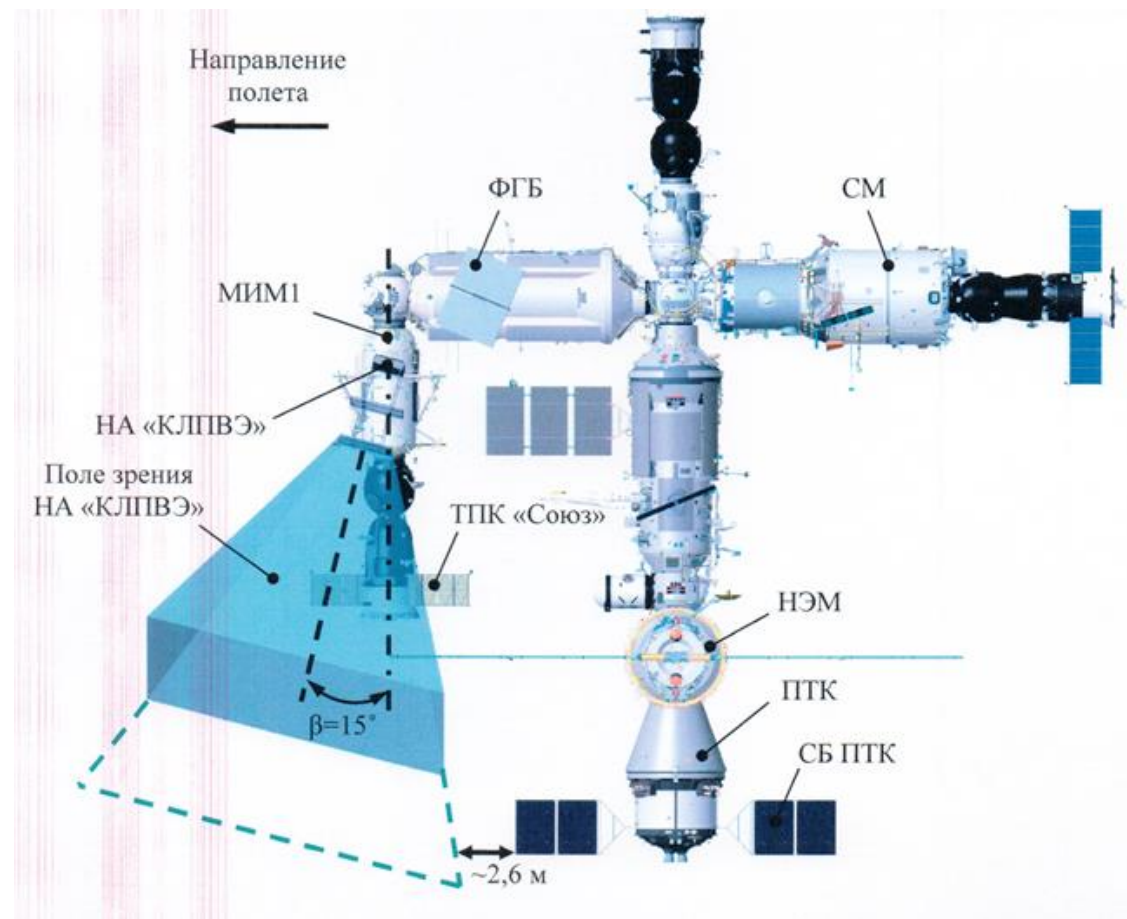
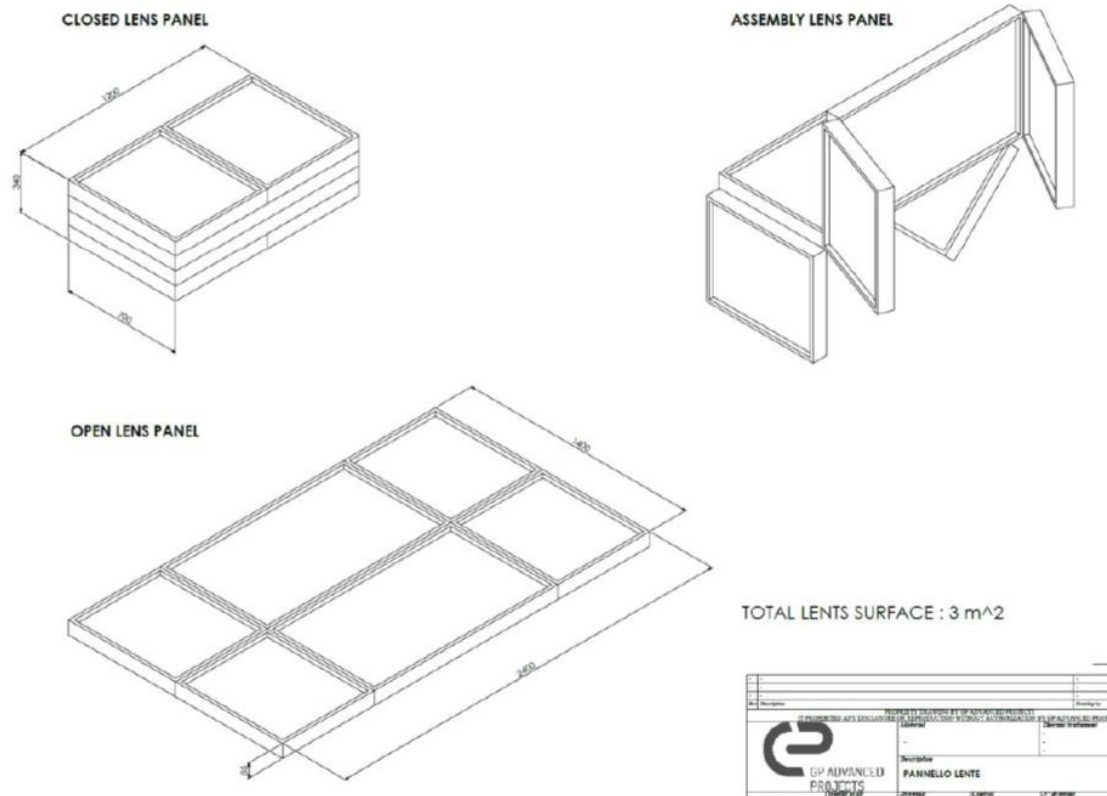


Упрощенный линзовый вариант

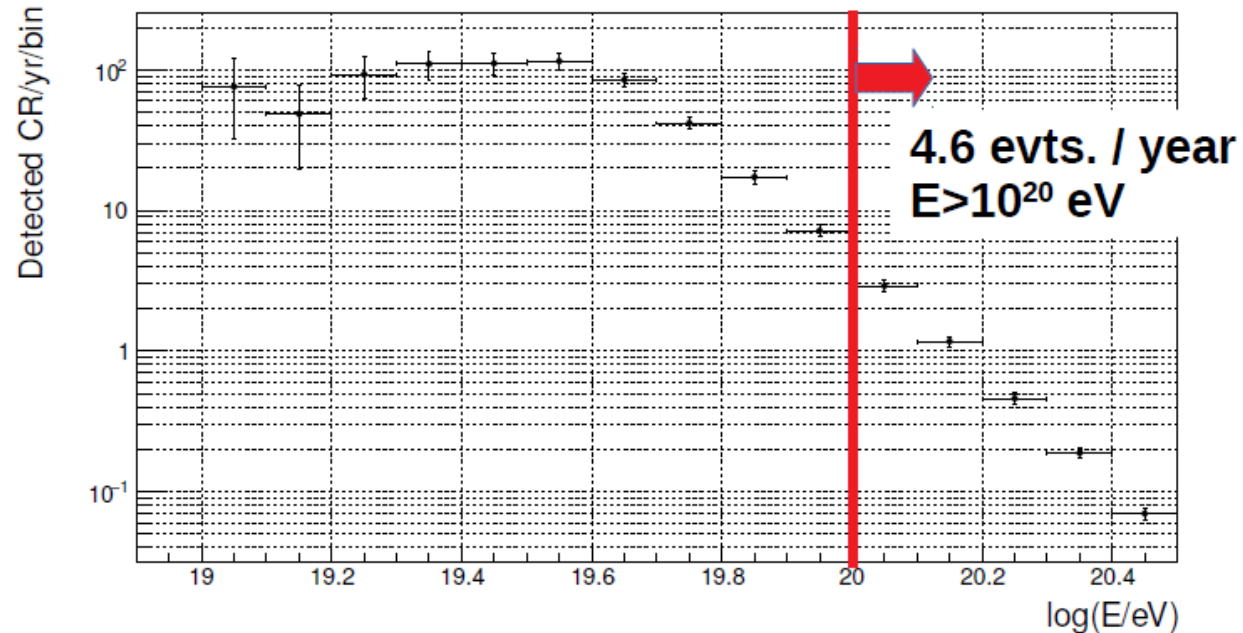
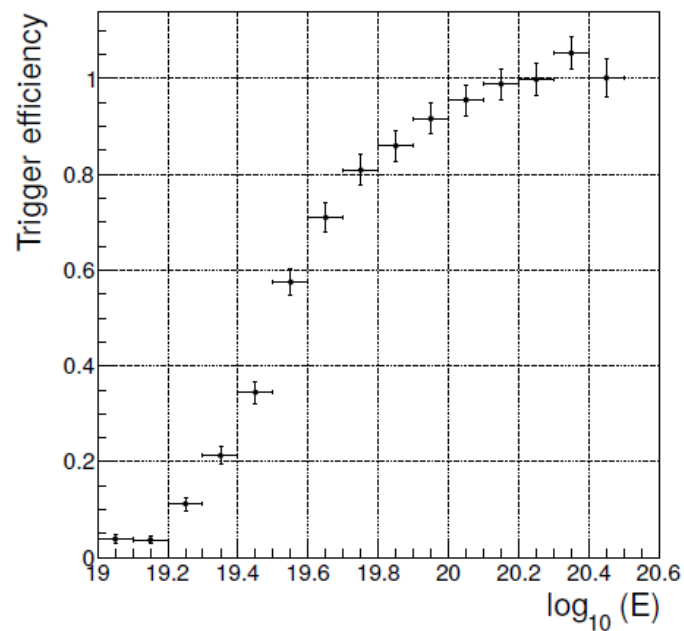
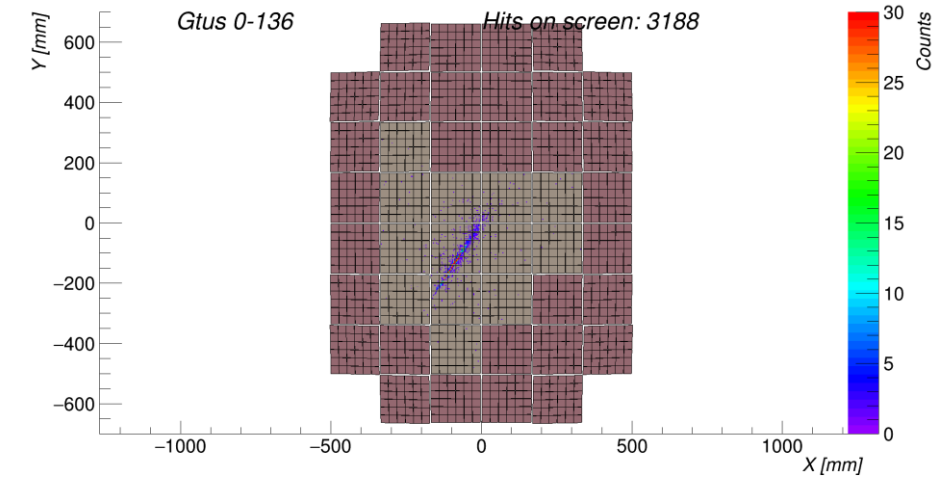


γ	5°		10°		15°		20°	
ϕ	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
d_{RMS} , mm	2.61	2.68	2.84	2.95	3.11	3.10	3.86	3.32
S_{eff} , m ²	1.53	1.49	1.30	1.34	0.98	1.22	0.56	0.94
EE	0.79	0.78	0.76	0.74	0.71	0.71	0.47	0.65

Доставка и размещение на МКС

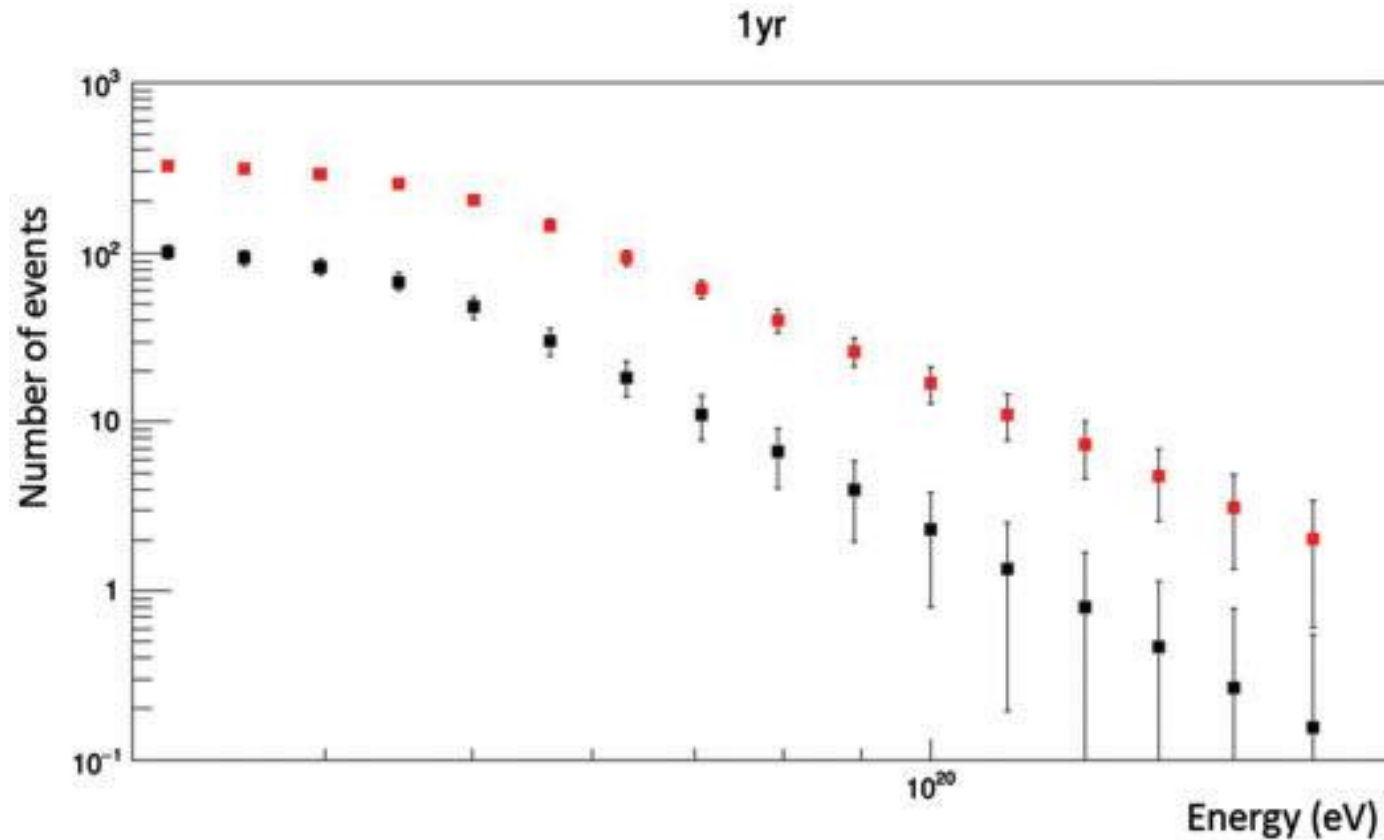


Моделирование работы линзового варианта детектора



- ✓ Эффективность 50% достигается около 40 ЭэВ.
- ✓ Предполагая спектр Оже, ожидаемая частота регистрации КЛ ПВЭ: ~65 событий в год с $E > 50$ ЭэВ, включая ~4 с $E > 100$ ЭэВ.
- ✓ Оба полушария будут наблюдаться одним детектором!

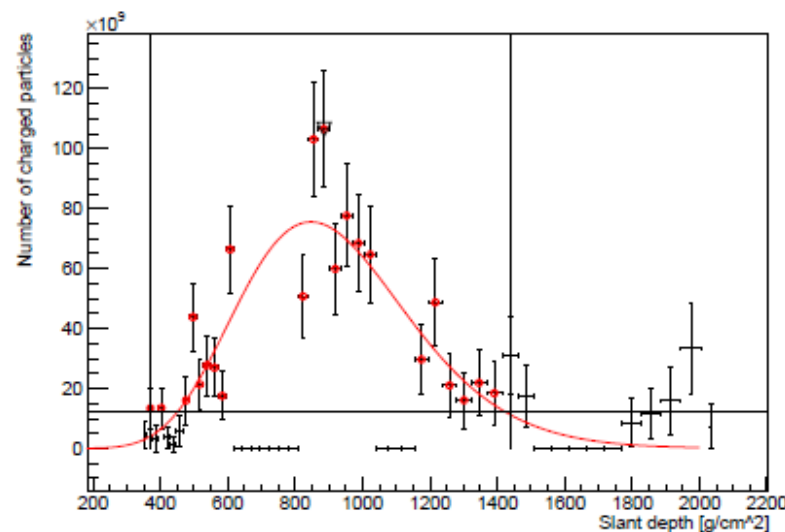
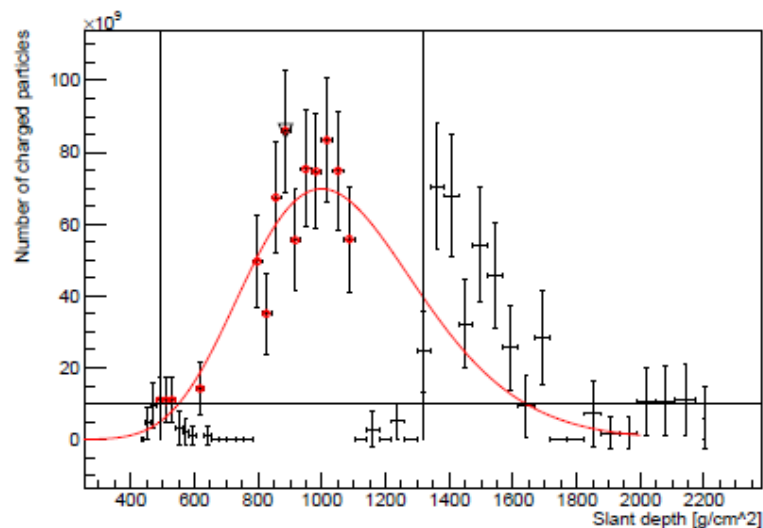
TA vs PAO by K-EUSO measurements



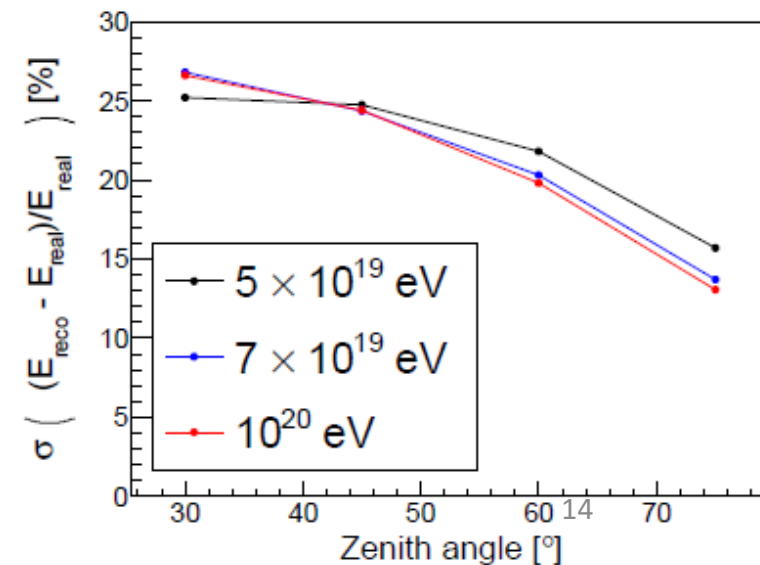
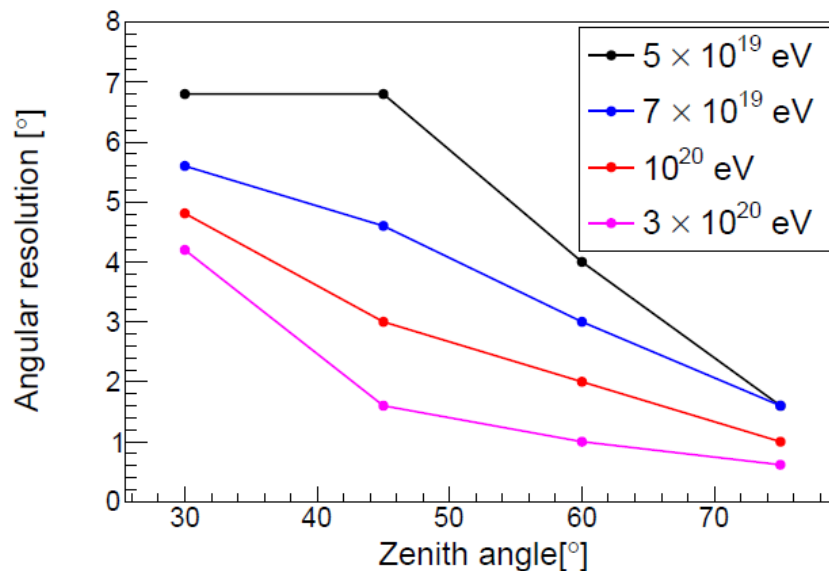
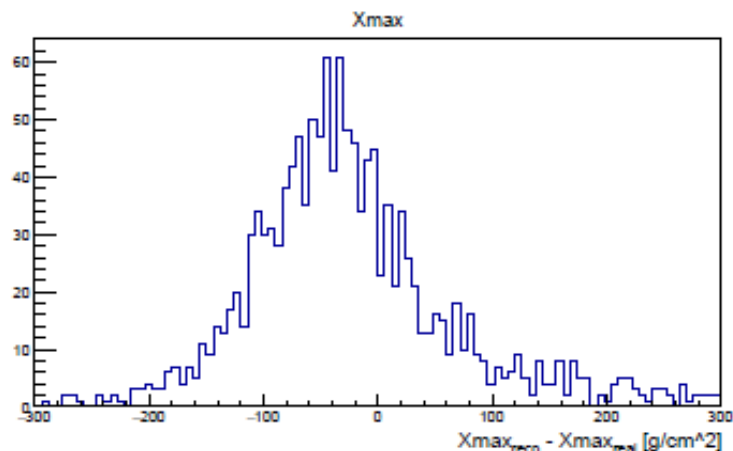
Prog. Theor. Exp. Phys. **2017**, 12A107
DOI: 10.1093/ptep/ptx169

Integral number spectra as observed on each hemisphere of the whole sky after one year of K-EUSO Schmidt observation. The red points represent the number of events in the north, based on TA, the black points correspond to southern hemisphere events using the PAO spectrum.

Реконструкция параметров частицы

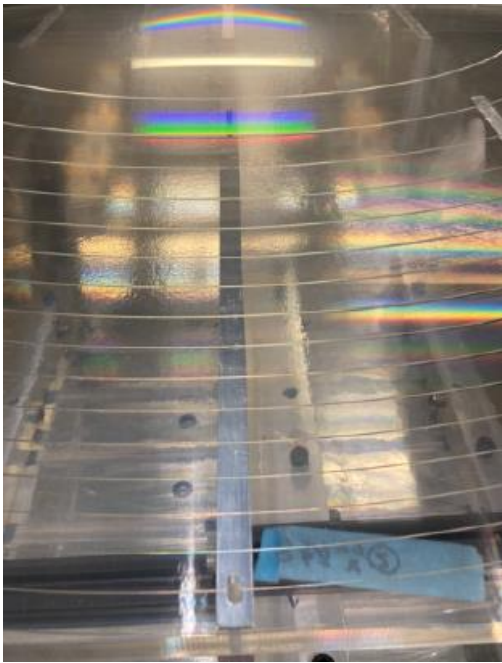


- ✓ Энергетическое разрешение:
15-25 %
- ✓ Угловое разрешение:
1° - 7° (зависит от
энергии и зенитного угла).
- ✓ Точность определения $X_{\max}$:
50-90 г/см²

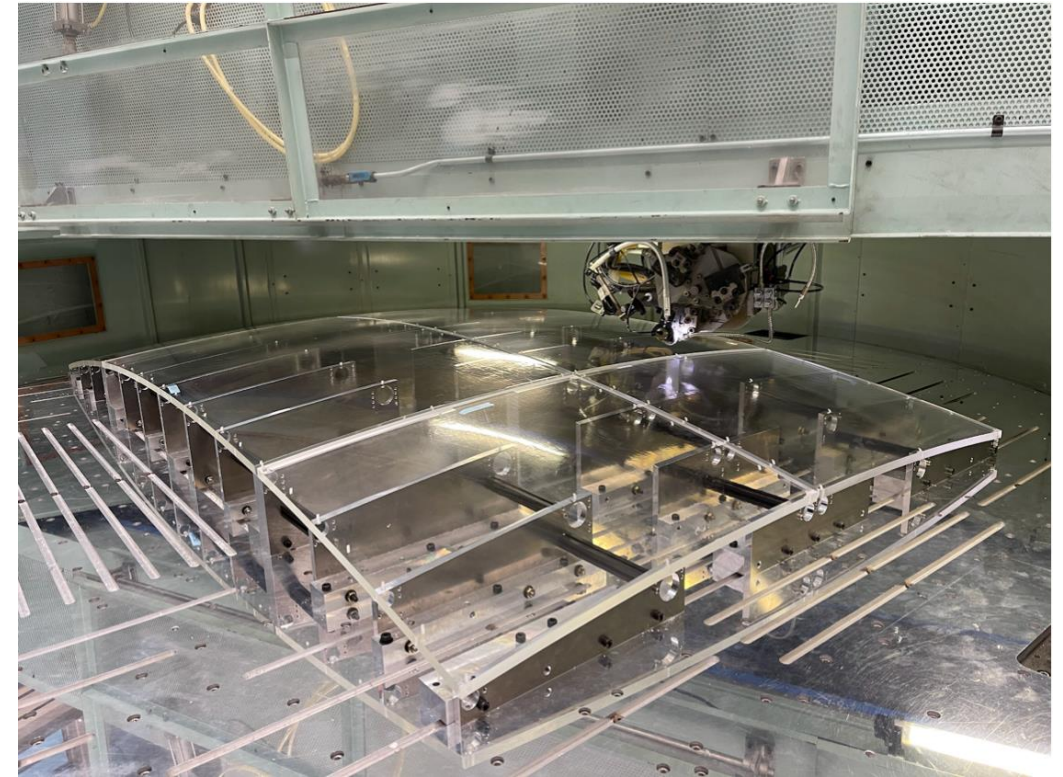


Изготовление оптической системы

- Линзы изготавливаются в РИКЕН (Япония)
- Ожидаемый срок готовности - 2022

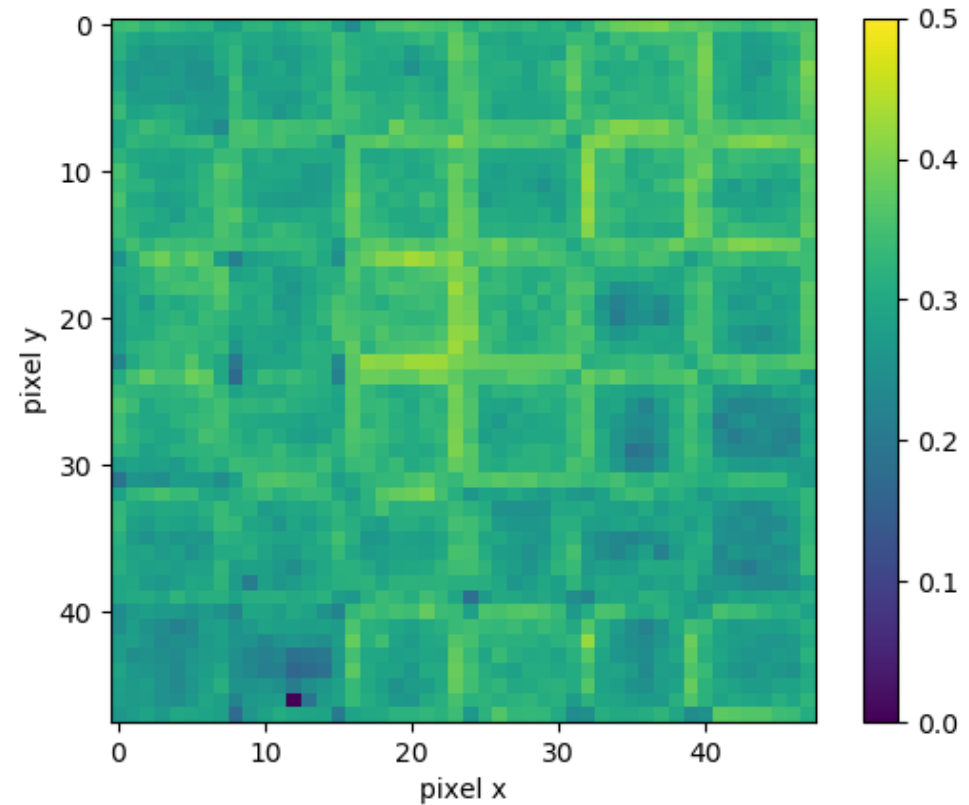
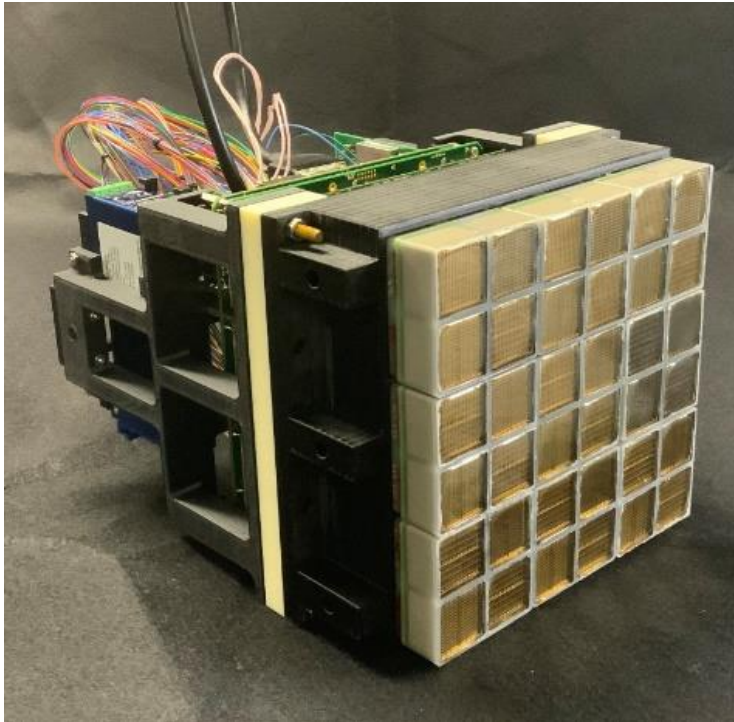


Формирование и тестирование
френелевской структуры



Формирование сферической формы линзы

Изготовление и тестирование элементов фотоприемной поверхности



Модуль фотоприемника (слева) и результаты калибровочных измерений (справа).

Заключение

- ✓ Проект «КЛПВЭ» способен обеспечить равномерный обзор всей небесной сферы с порогом регистрации КЛ ПВЭ около 50 ЭэВ и годовой статистикой событий более 60 шт.
- ✓ «КЛПВЭ» являлся центральным проектом коллаборации JEM-EUSO. Хотя работы над ним приостановлены в виду отсутствия финансирования со стороны Роскосмоса, неопределенностью сроков эксплуатации МКС и политической ситуацией.
- ✓ Обсуждается реализация проекта на Российской станции РОСС или автономных космических аппаратах аналогично проекту РОЕММА.

