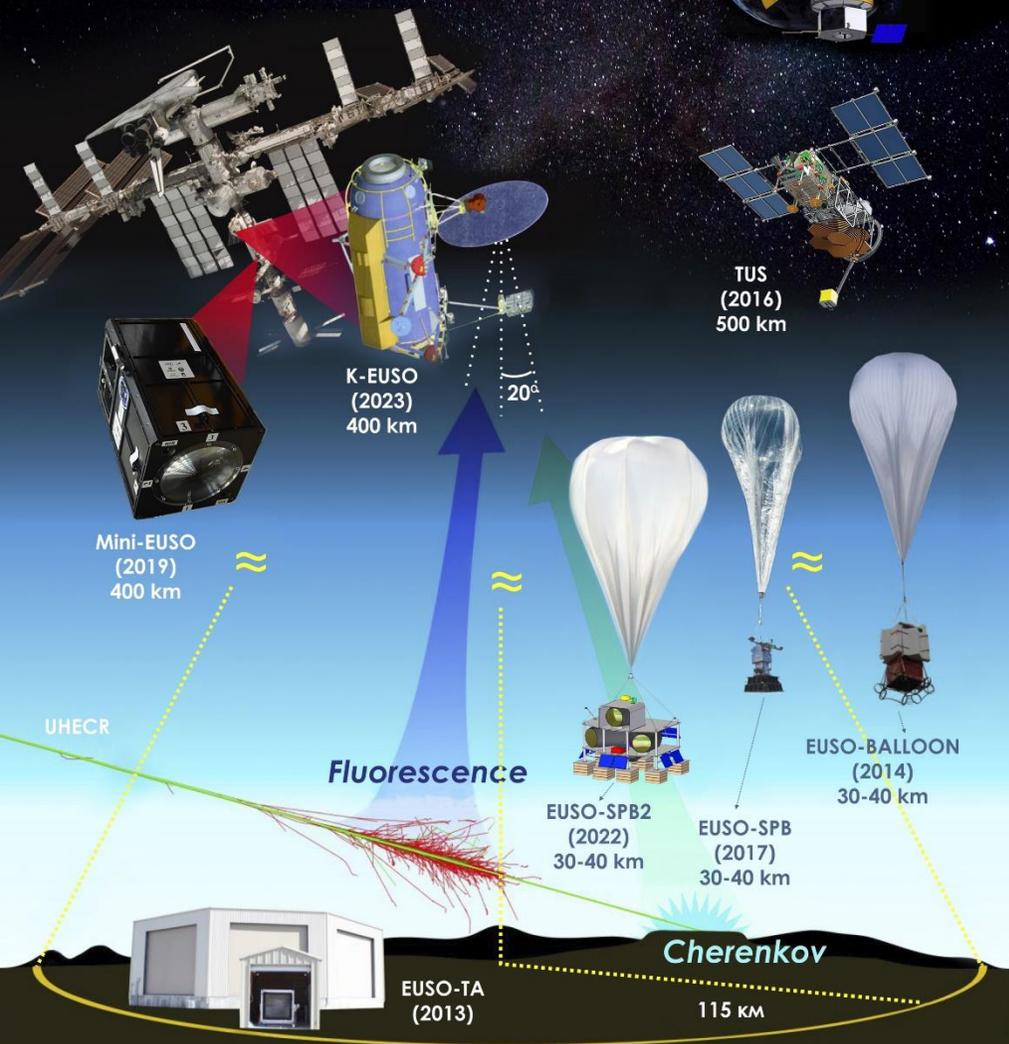




JEM-EUSO
 Collaboration Meeting
 PROJECTS
 directed to
 UHECR/TLE study:



Измерения КЛ ПВЭ с орбиты Земли: от проекта «ТУС» к К-EUSO и далее

Павел Климов
 НИИЯФ МГУ

От имени коллаборации JEM-EUSO



The meeting will take place at Skobel'syn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University

36-я Всероссийская конференция по космическим лучам, 2020 г.

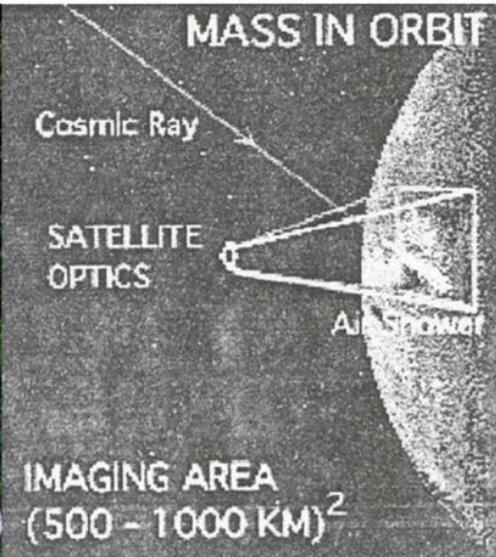
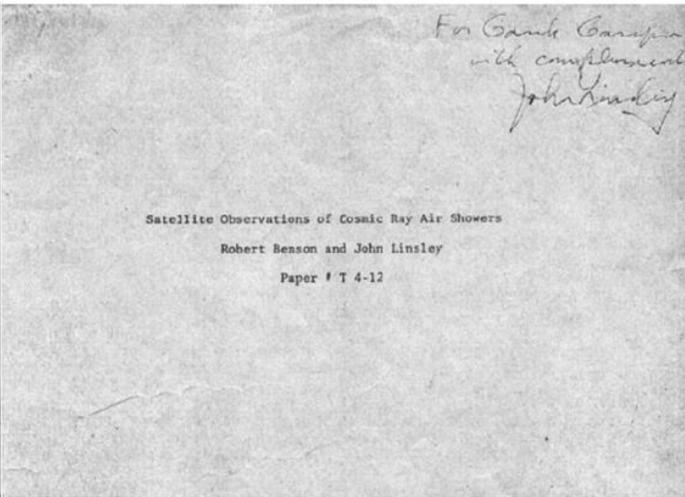
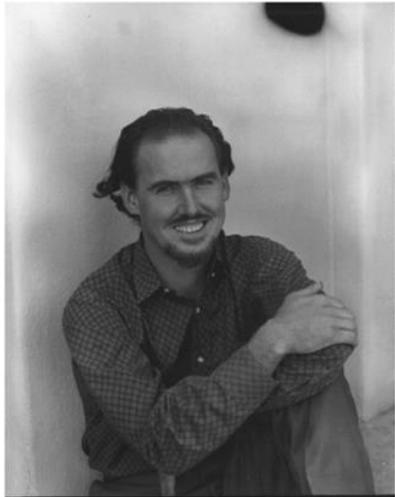
Немного истории

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



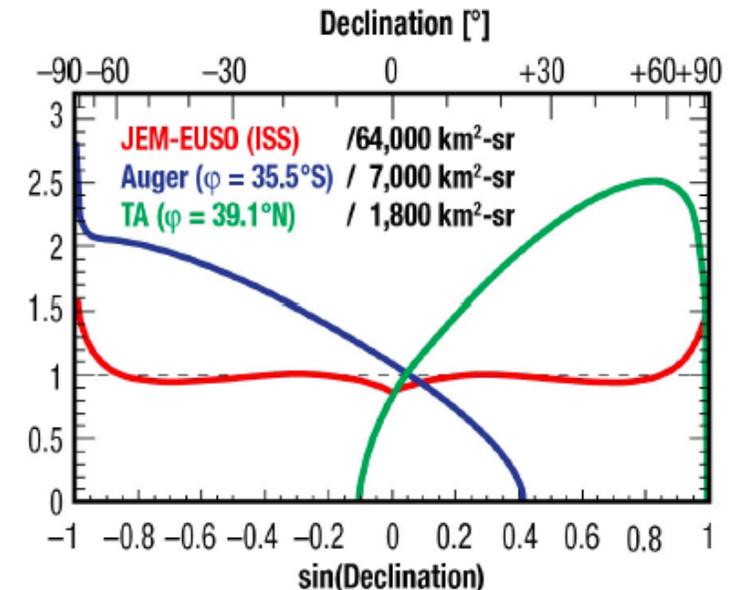
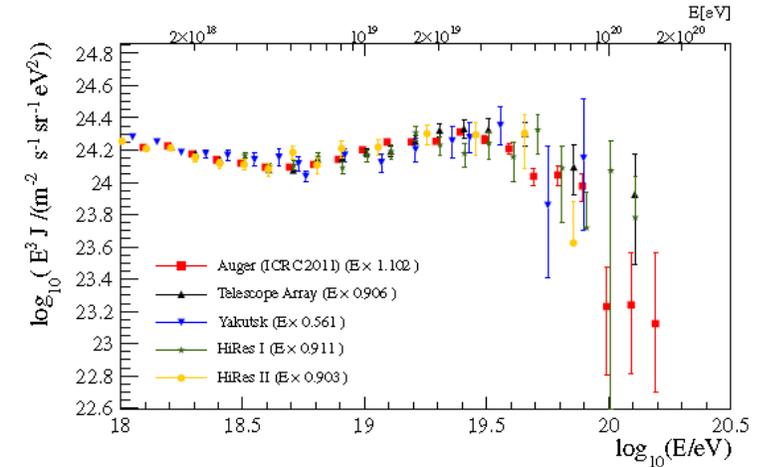
Yoshiyuki Takahashi suggested the concept of MASS, the Maximum-Energy Auger (Air)-Shower Satellite, 1995

Рисунки из работы Т. Ebisuzaki, **Space-based observation of the extensive airshowers**, EPJ Web of Conferences **53**, 01014 (2013)

Преимущества орбитального детектора

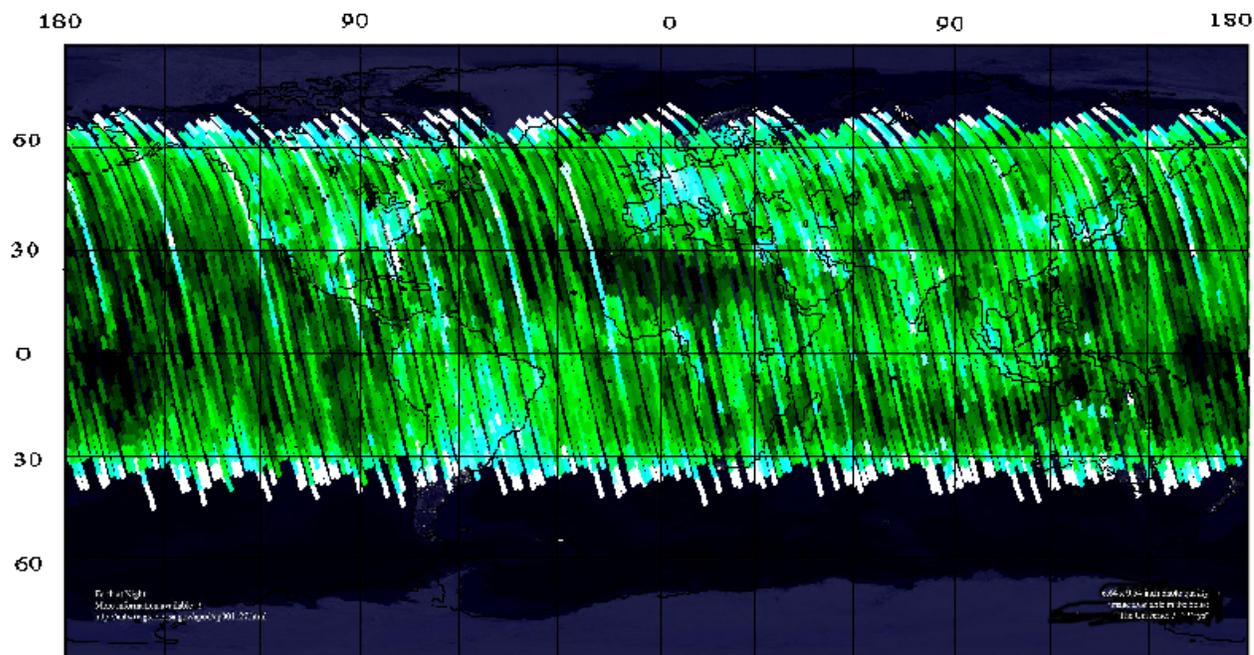
Важные экспериментальные трудности наземных экспериментов:

- Недостаточное количество событий в области предельно высоких энергий
- Наблюдение неполной небесной сферы
- Неустранимые 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 ($N_{\text{sat}} \gg h_{\text{max}}$)



Проблемы орбитального детектора

- Работа в условиях быстропеременного УФ свечения ночной атмосферы Земли

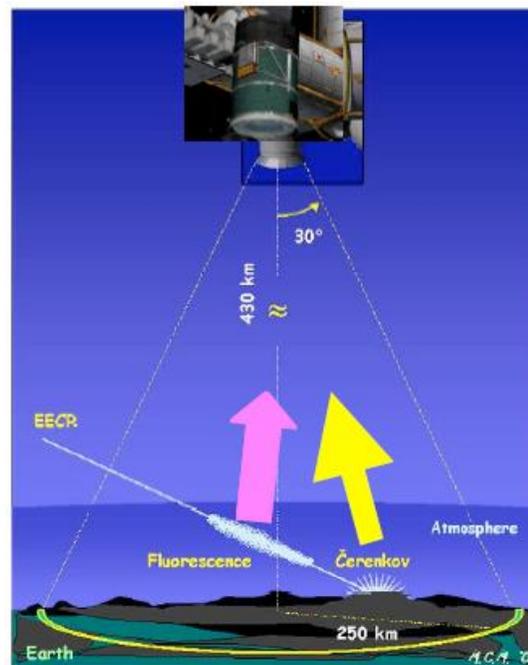


Данные спутника «Татьяна-2»

+ Специфика космического эксперимента

- Необходимость сочетания в одном приборе трех характеристик:

- Большое поле зрения (широкоугольность)
- Большая апертура (площадь оптической системы)
- Высокое временное разрешение.



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
- K-EUSO 2023
- POEMMA

JUNE 15-19 2020 The 27th JEM-EUSO International Collaboration Meeting

PROJECTS directed to UHECR/TLE study:

UHECR

Fluorescence

Cherenkov

POEMMA

TUS (2016) 500 km

K-EUSO (2023) 400 km

Mini-EUSO (2019) 400 km

EUSO-BALLOON (2014) 30-40 km

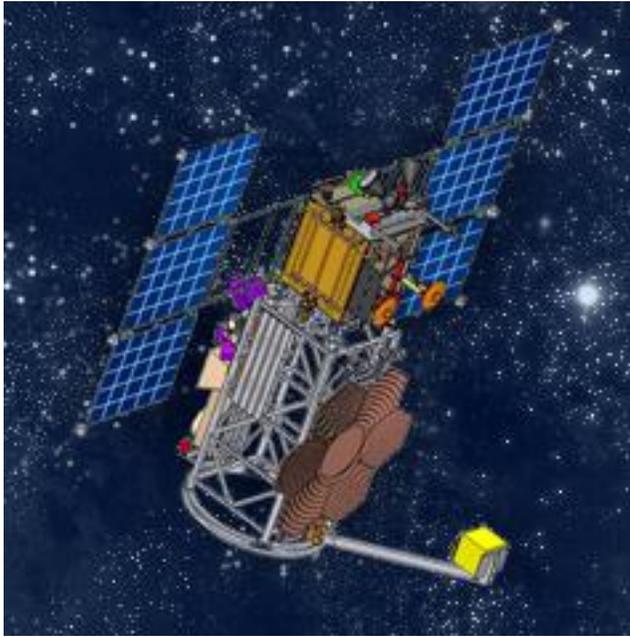
EUSO-SPB2 (2022) 30-40 km

EUSO-SPB (2017) 30-40 km

EUSO-TA (2013) 115 km

The meeting will take place at Skobel'syn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University

Проект «ТУС» (Трековая Установка)



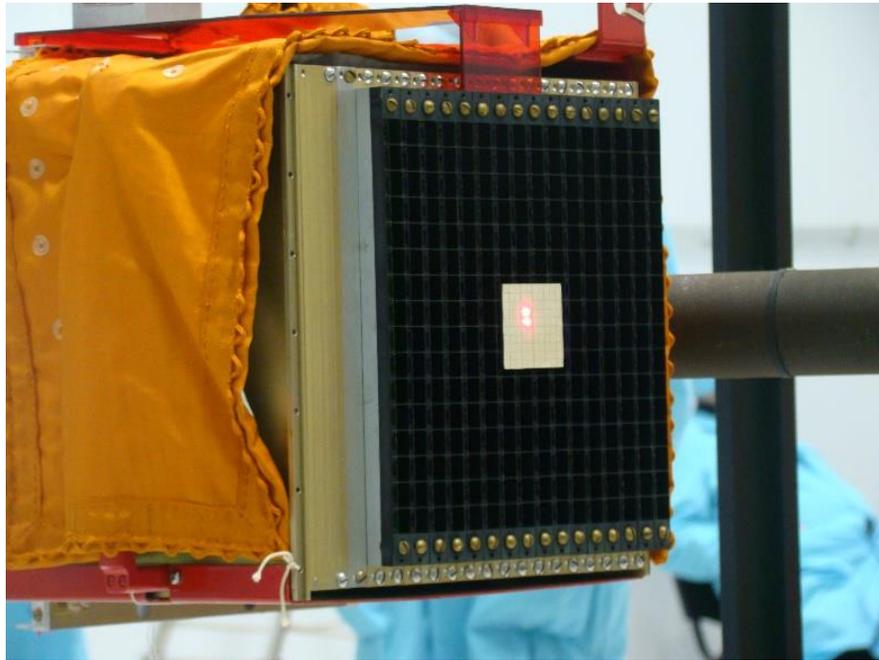
Дата запуска – 28.04.2016
Время работы – до 12.2017
Орбита:

- 500 км
- 97.8°

Поле зрения	±4,5 degree
Число каналов	16 modules of 16 PMTs
Размер пикселя	10 mrad (5×5 km)
Площадь зеркала	~2 m ²
Время экспозиции	30%

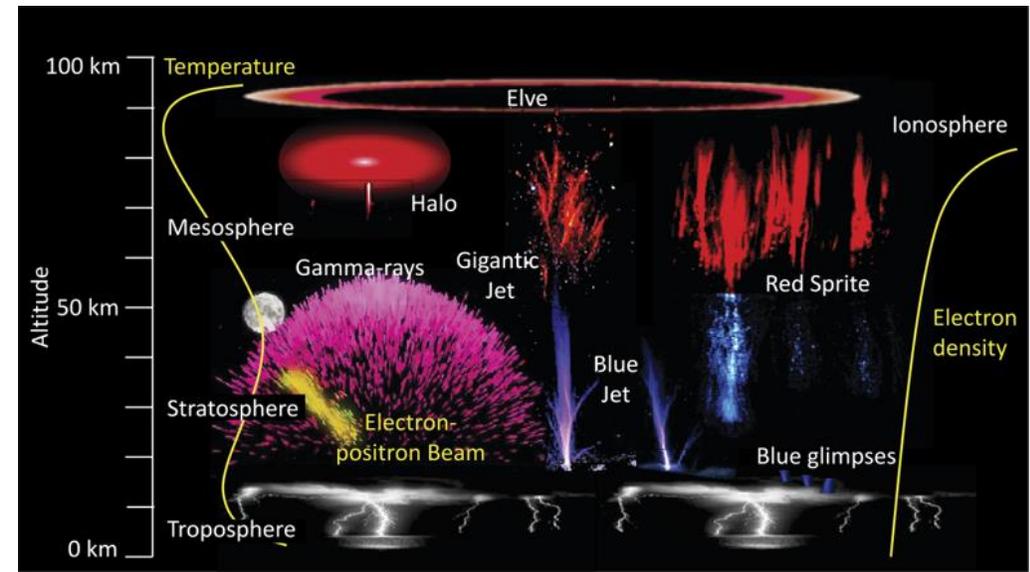


Многофункциональность фотоприемника



Система АРУ позволяет работать при всех уровнях излучения атмосферы

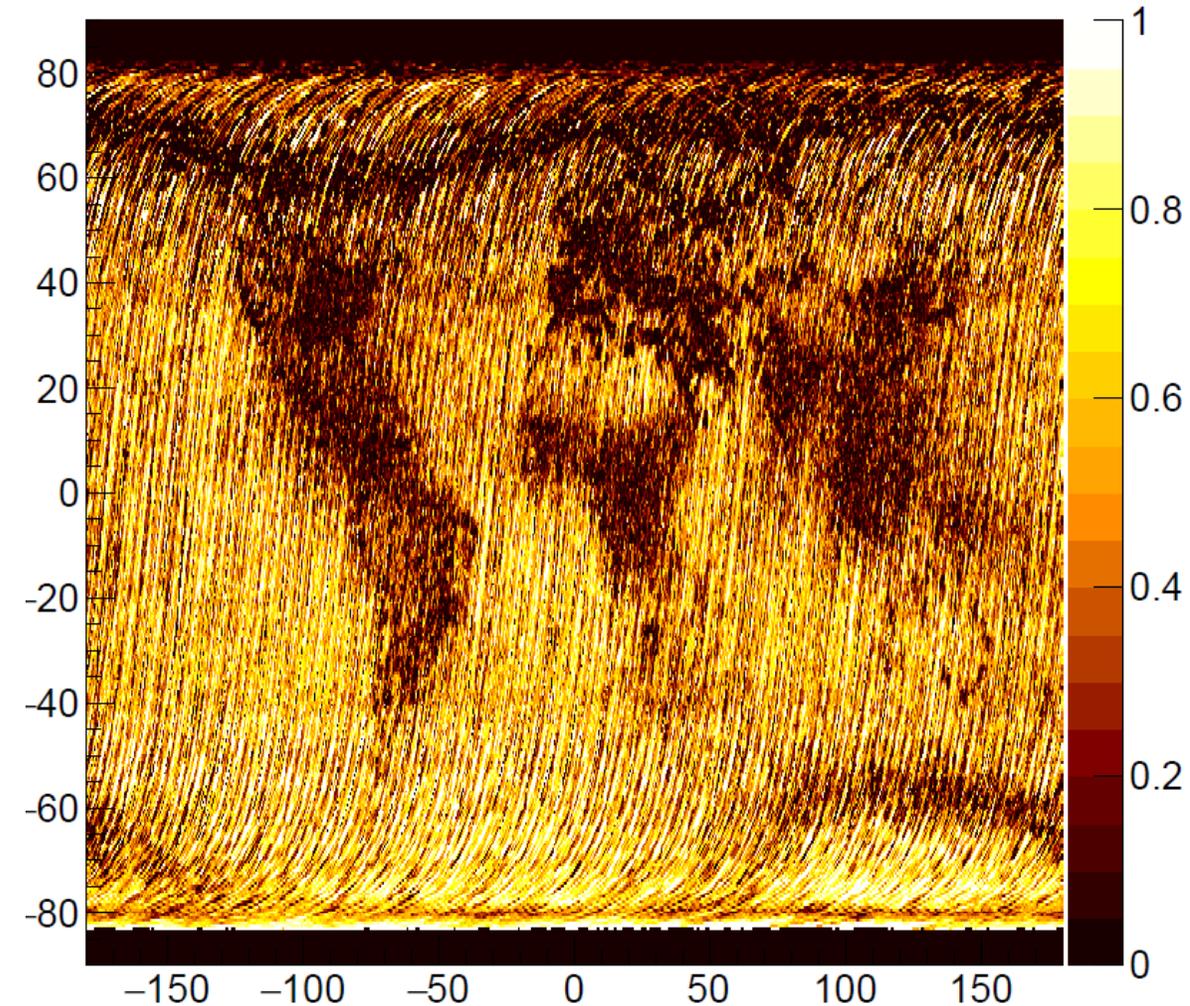
Phenomena	Time sample	Oscillogram length
EAS	$\tau = \tau_0 = 0,8 \mu\text{s}$	$\Delta T = 256\tau = 205 \mu\text{s}$
Short TLE (elves)	$\tau = 2^5\tau_0 = 25,6 \mu\text{s}$	$\Delta T = 256\tau = 6,6 \text{ ms}$
Long TLE (sprites, jets)	$\tau = 2^9\tau_0 = 0,4 \text{ ms}$	$\Delta T = 256\tau = 105 \text{ ms}$
Micro-meteor	$\tau = 2^{13}\tau_0 = 6,6 \text{ ms}$	$\Delta T = 256\tau = 1,7 \text{ s}$



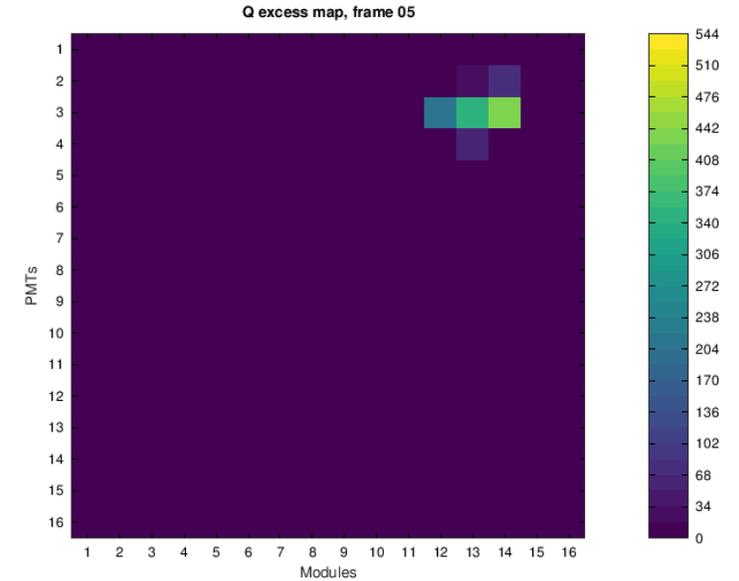
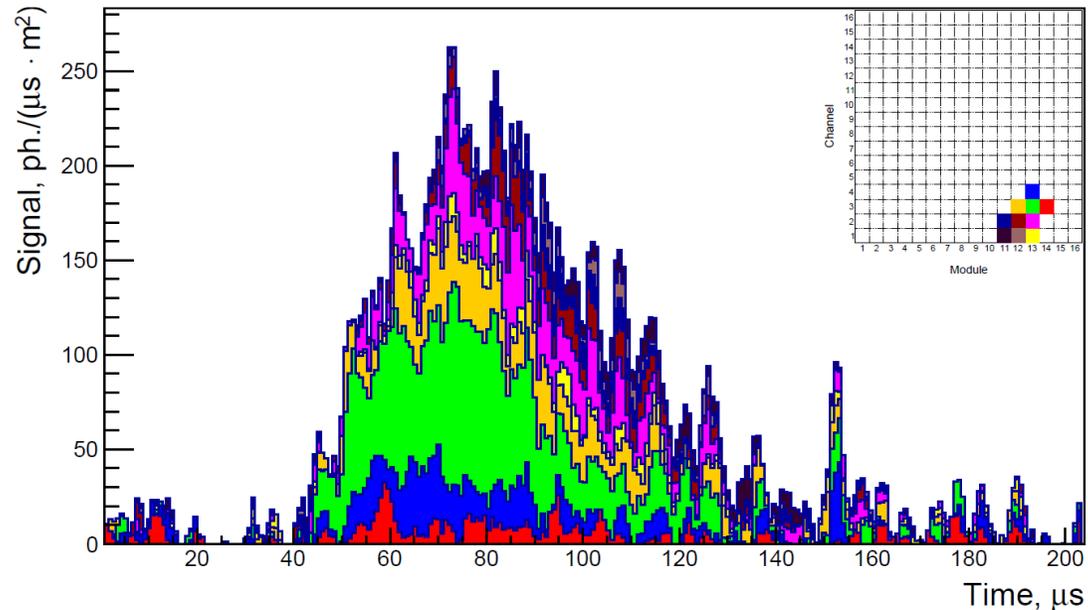
Время работы и экспозиция ТУС



- ✓ Запущен на борту КА «Ломоносов» 28.04.2016. Время активного существования до 12.2017 (с перерывами)
- ✓ Зарегистрировано более 200 тыс. событий
- ✓ Суммарная экспозиция составила $\sim 1200\text{--}1400 \text{ km}^2\text{sr yr}$.
- ✓ Справа показана карта частоты триггера



EAS-like events in the TUS detector



- ✓ В событии наблюдается релятивистское движение.
- ✓ В предположении ШАЛ проведена реконструкция параметров первичной частицы.
- ✓ Экспозиция детектора мала, чтобы ожидать уверенной регистрации хотя бы нескольких событий
- ✓ Однако эксперимент продемонстрировал работоспособность методики, возможность распознавания и реконструкции релятивистского движения, но и проблемы: большое разнообразие фоновых явлений.

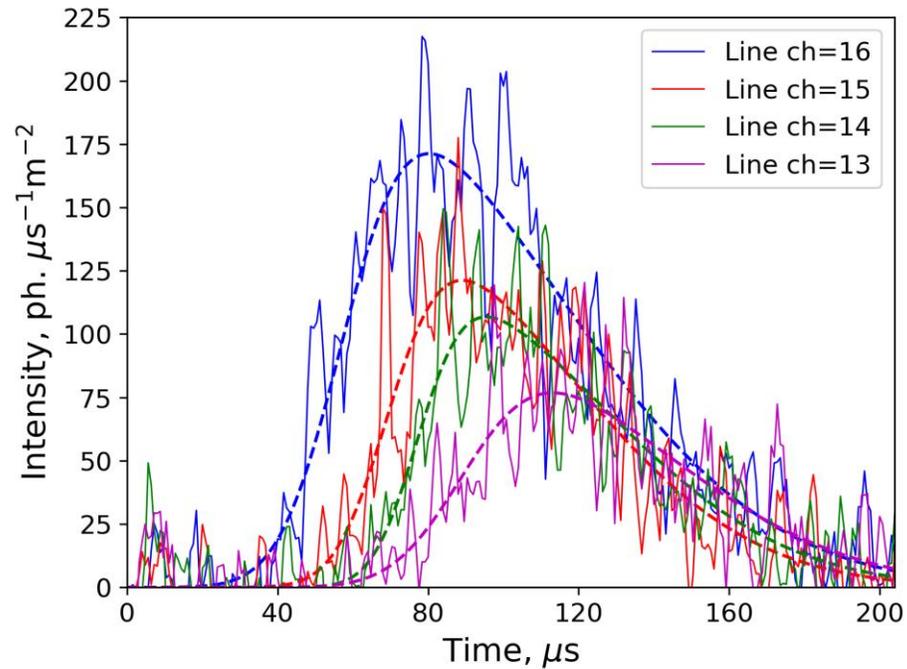
$$\phi_{\text{rec}} = (50 \pm 10)^\circ, \quad \theta_{\text{rec}} = (44 \pm 4)^\circ.$$

$$E \gtrsim 10^{21} \text{ eV}$$

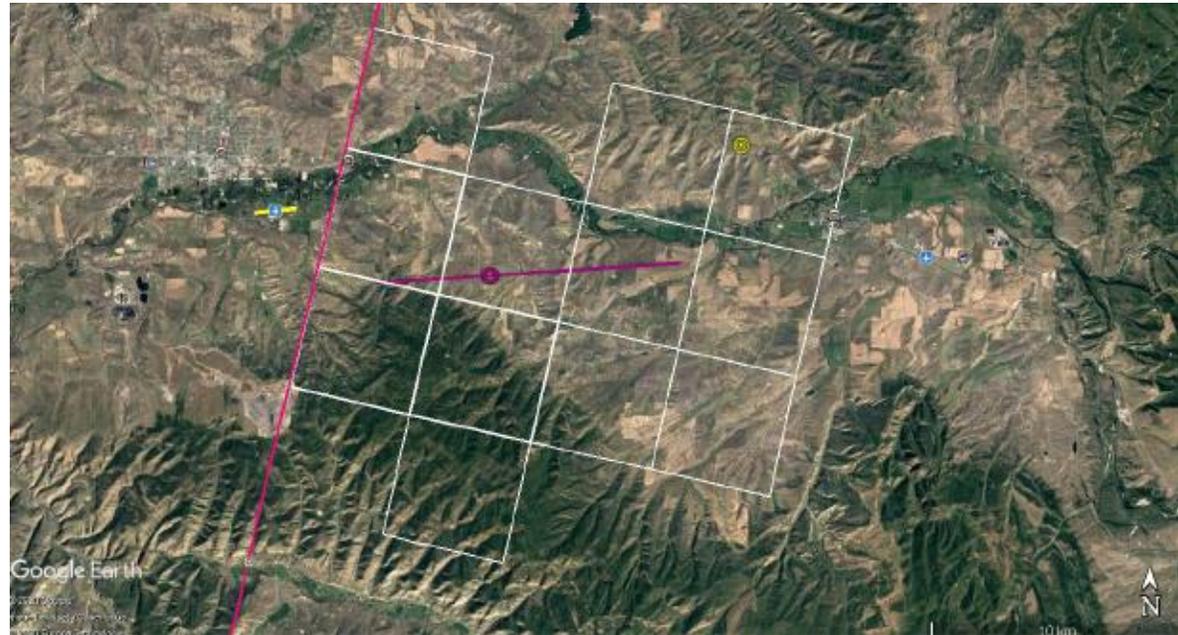
Khrenov et al, JCAP, 2020

EAS-like events reconstruction

Sergei Sharakin, Oliver Isac Ruiz Hernandez,
Kinematics reconstruction of the EAS-like events
registered by TUS detector, JINST (in press)



Event	Time (UTC)	Latitude	Longitude	Location	# hit pixels
TUS161003	05:48:59	44.08°N	92.71°W	Minnesota (USA)	10
TUS161031	10:25:18	61.30°N	155.69°W	Alaska (USA)	8
TUS170915	06:30:18	40.31°N	107.07°W	Colorado (USA)	12
TUS171010	04:26:04	34.83°N	77.39°W	North Carolina (USA)	15
TUS171029a	06:39:09	35.27°N	110.78°W	Arizona (USA)	8
TUS171029b	11:13:26	65.90°N	168.07°W	Alaska (USA)	9

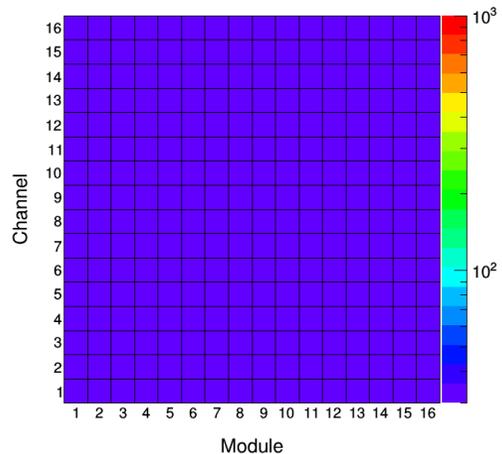


Наблюдается корреляция с аэропортами (как правило, направление реконструируемого трека совпадает с расположением взлетно-посадочной полосы)

Необычные вспышки внегрозовой природы

Вспышка на средиземном морем

EAS-20160905_230528_tick: 050

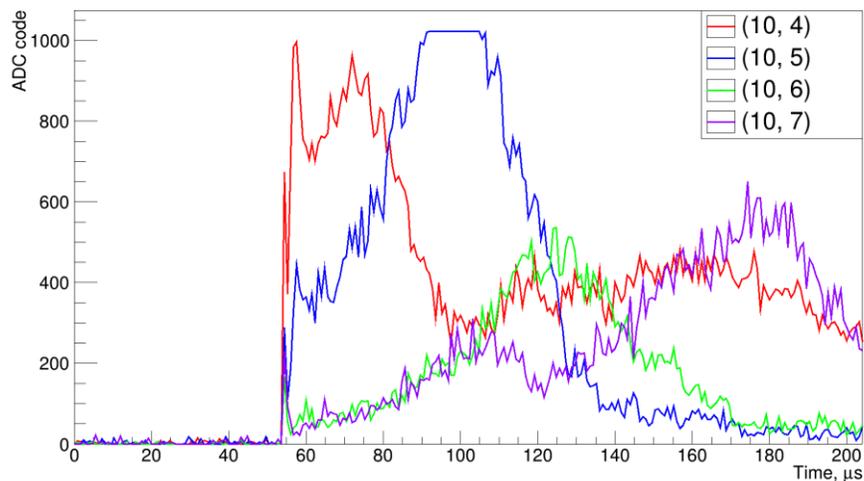
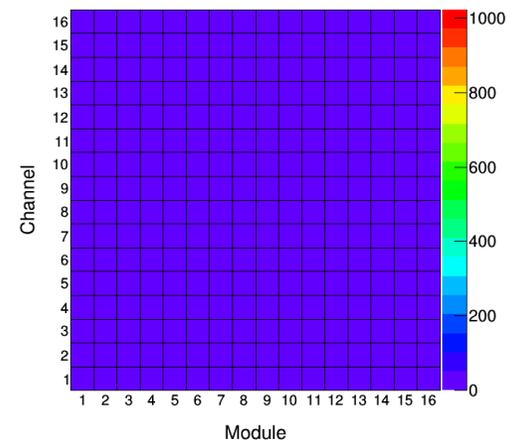


В течение 1 часа в радиусе 1000 км нет молний и гроз

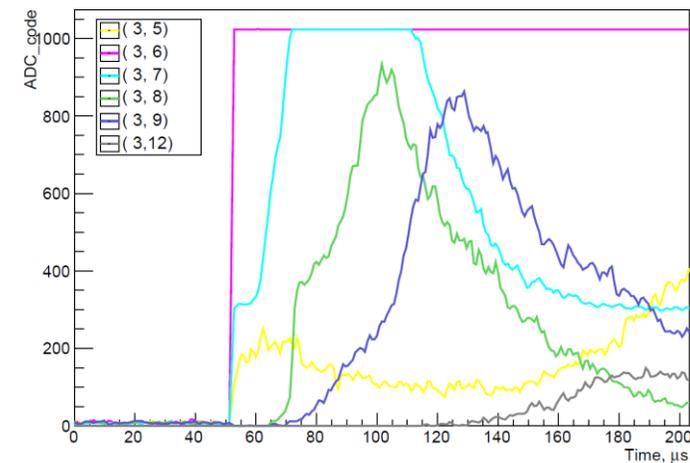
Присутствует направленное релятивистское движение начального мощного импульса после

Вспышка на индийском океаном

EAS-20170426_151956_tick: 000

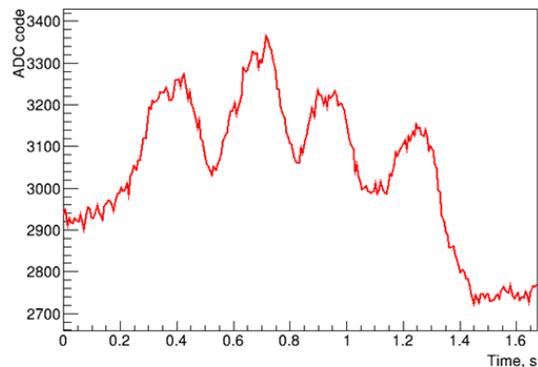
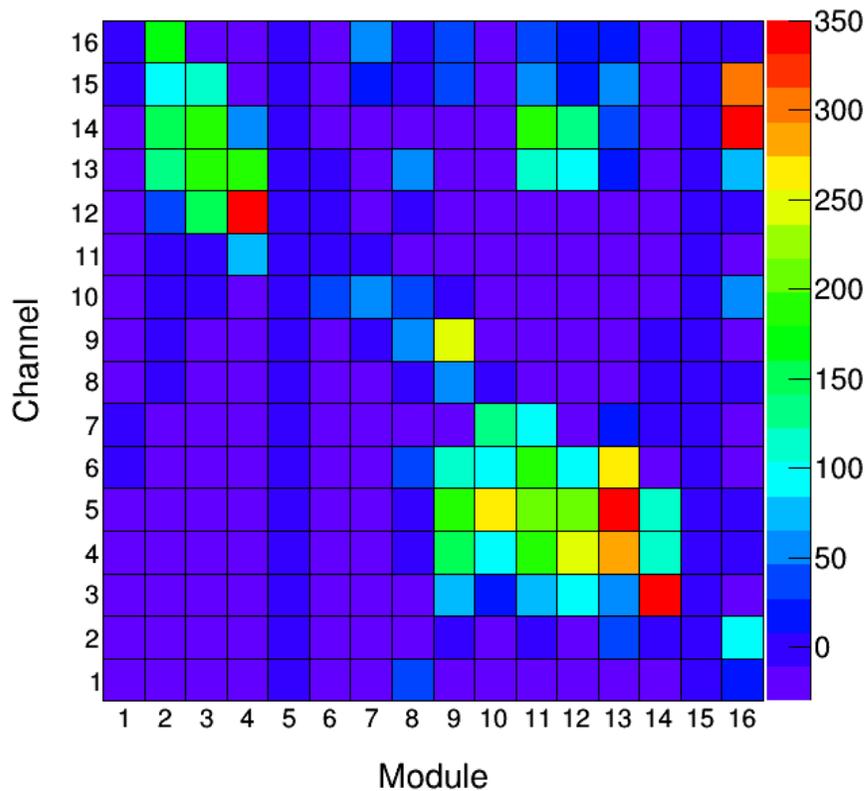


170426_151956_3rd Module

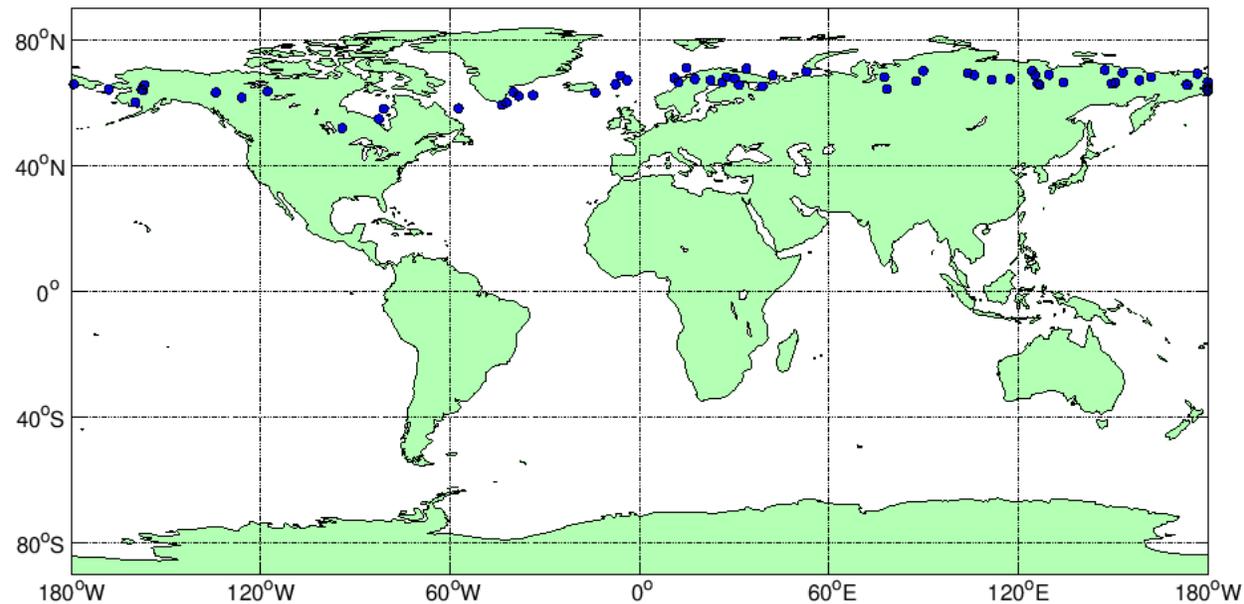


Пульсирующие свечения в авроральной области

EAS-20171110_133118_tick: 000



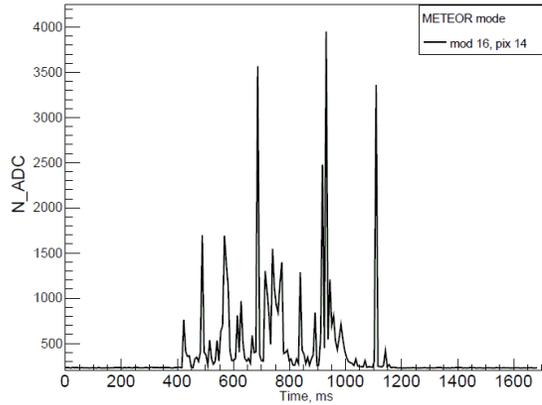
Географическое распределение событий



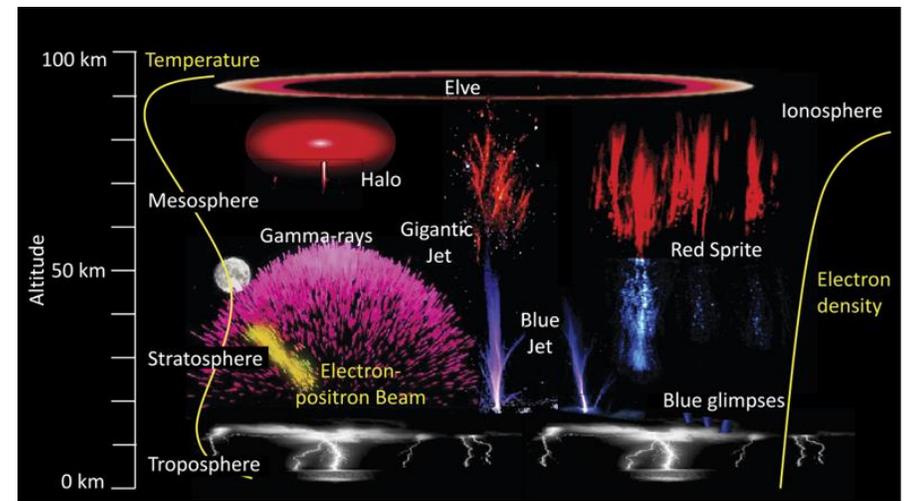
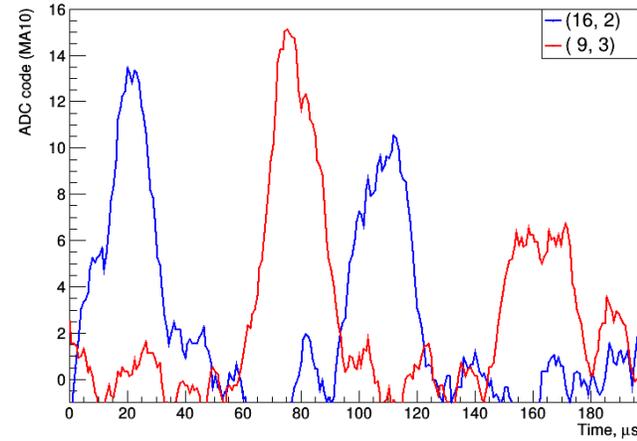
Пример карты каналов и осциллограммы события

Атмосферные явления

Digital Oscillogram

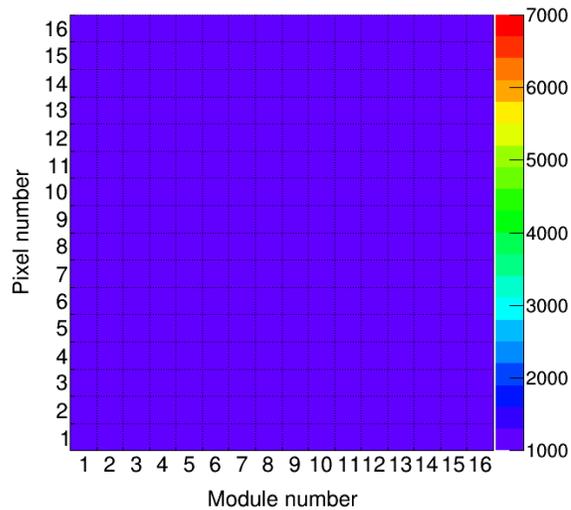


osc-eas_170410_130659

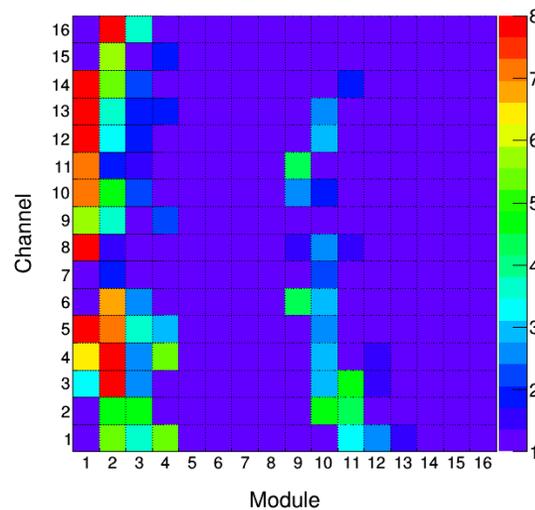


Метеоры

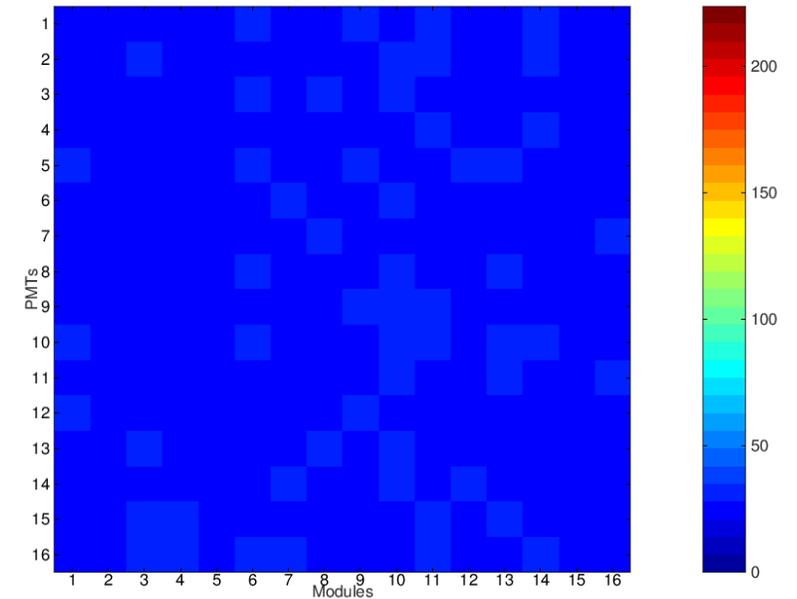
eas-20170102_023937_frame: 100



EAS-20170410_130659_ticks: 186 - 193



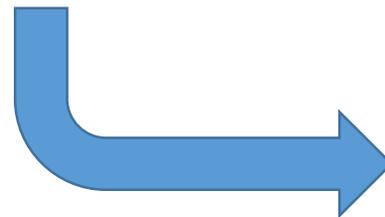
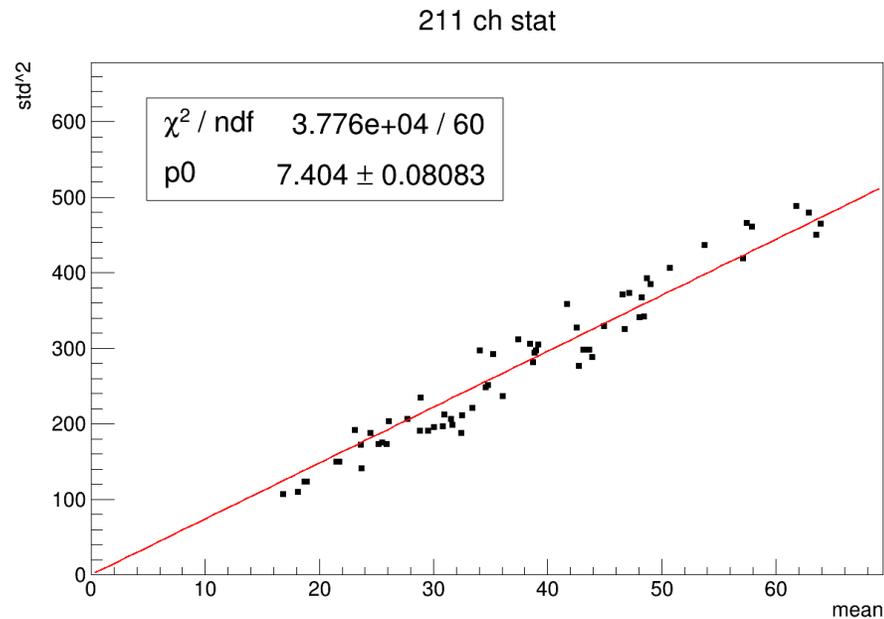
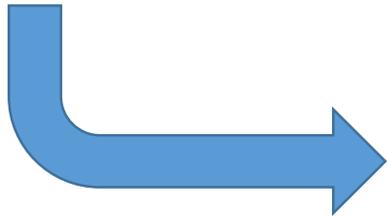
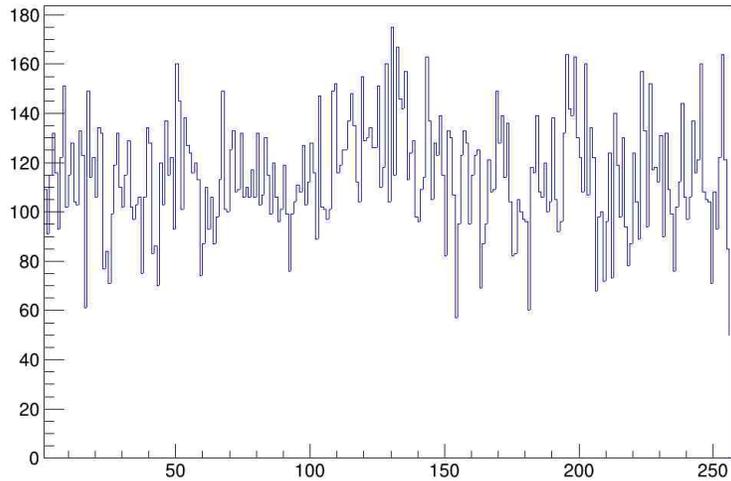
2017-01-03 14:31:08Z (#244). MET mode. Max=216@66. Frame 001



Молнии

Высоко атмосферные транзиенты

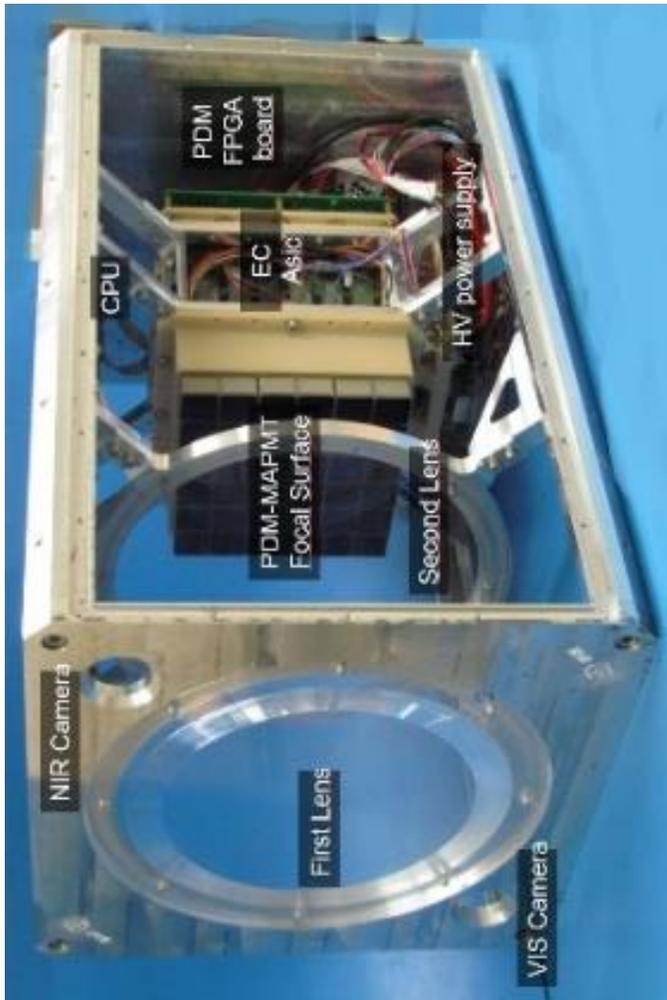
Методы полетной калибровки



$$G_f = \frac{2\alpha C}{q_e K} p_0 = 2 \cdot 10^6$$

Основные технические параметры НА

НА «УФ атмосфера» – линзовый телескоп



Габаритные размеры	370×370×620 мм
Диапазон длин волн наблюдения	УФ: 300 – 450 нм
Поле зрения	36° × 36° = 0.42 ср
Входной зрачок Диаметр Площадь	25 см 490 см ²
Фокусное расстояние	25 – 27 см
Размер ячейки	3 мм
Число ячеек	2304
число 64-канальных МАФЭУ	36
Разрешение изображения объекта в атмосфере	4.5 – 5 км
Площадь обзора атмосферы	260 км × 260 км = 6.8·10 ⁴ км ²
Максимальное временное разрешение	2.5 мкс

Детектор УФ атмосфера



Успешно запущен 22.08.2019, доставлен на
борт МКС 27.08.2019



УФ атмосфера (Mini-EUSO)
на борту МКС

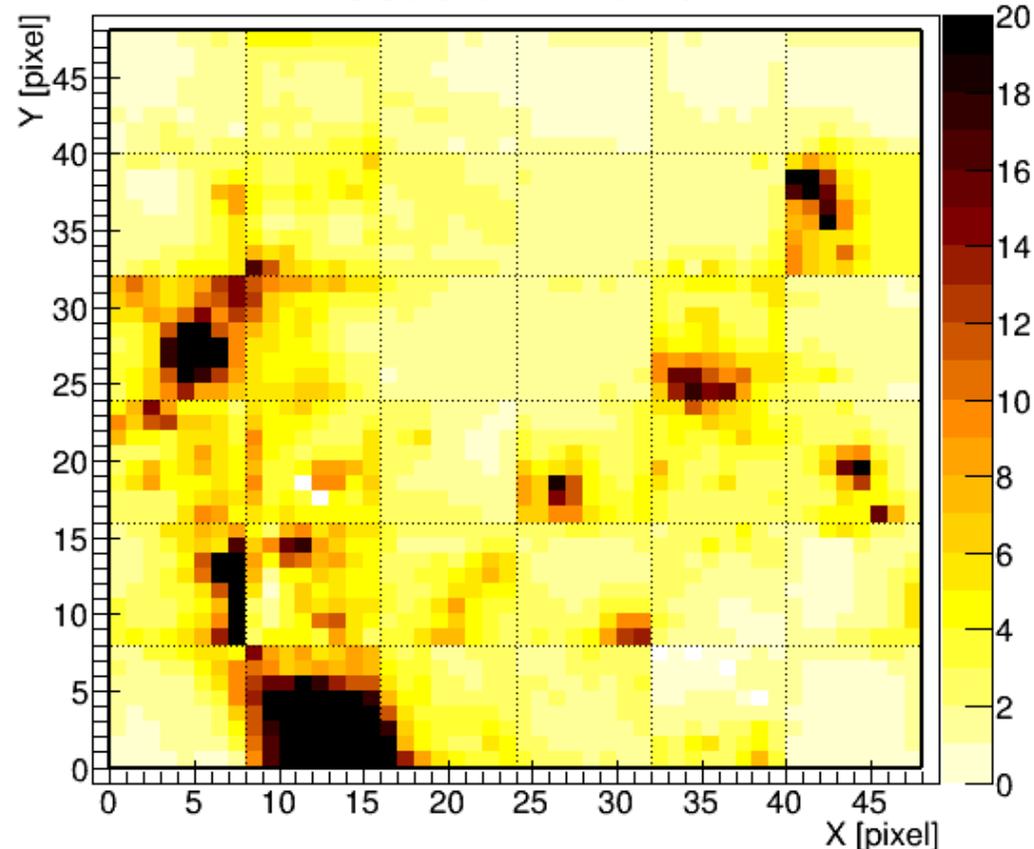


Мониторинг УФ свечения

Измерения основного телескопа

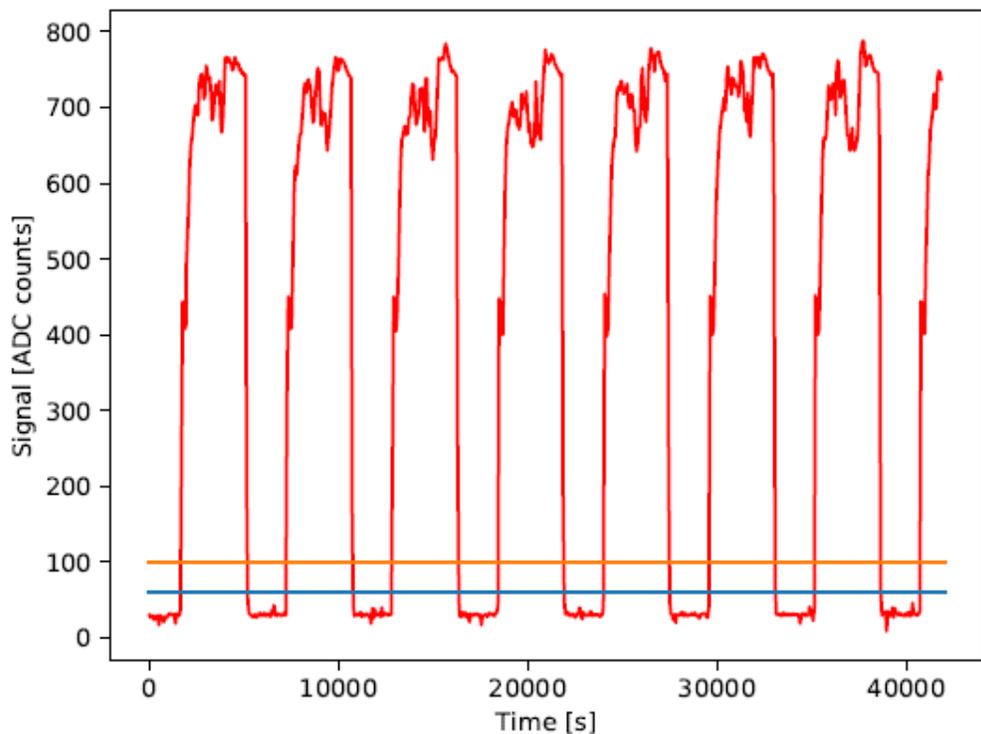
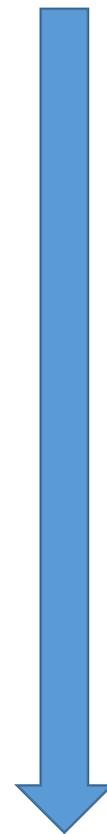
GTU: 27800, pkt: 217, GTU in pkt: 24,

UTC time: 2019-11-27 18:47:06



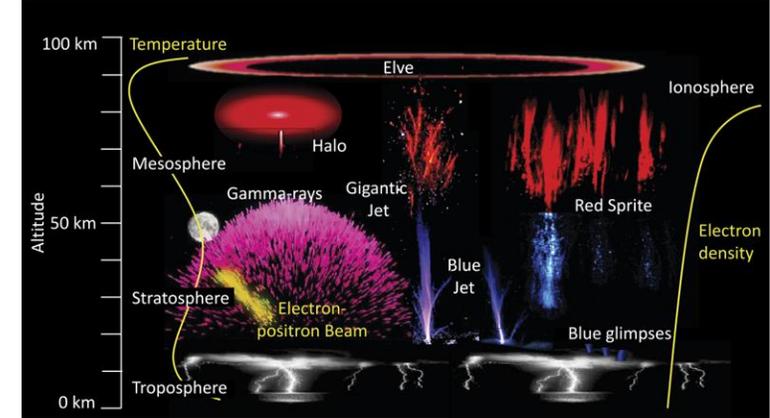
CPU_RUN_MAIN_2019_11_27_18_45_33_950Cathode3FullPDMonlyself.root

V_{MKC}

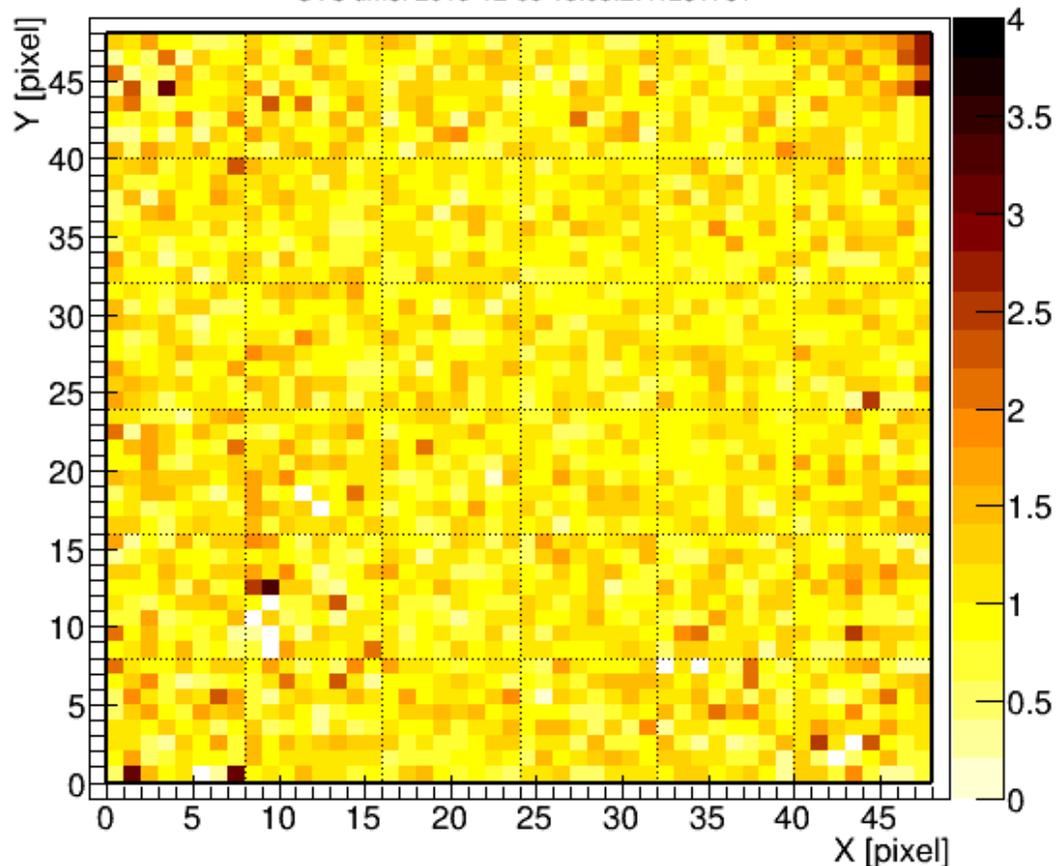


Данные датчика День/Ночь

Транзиентные атмосферные явления ELVE

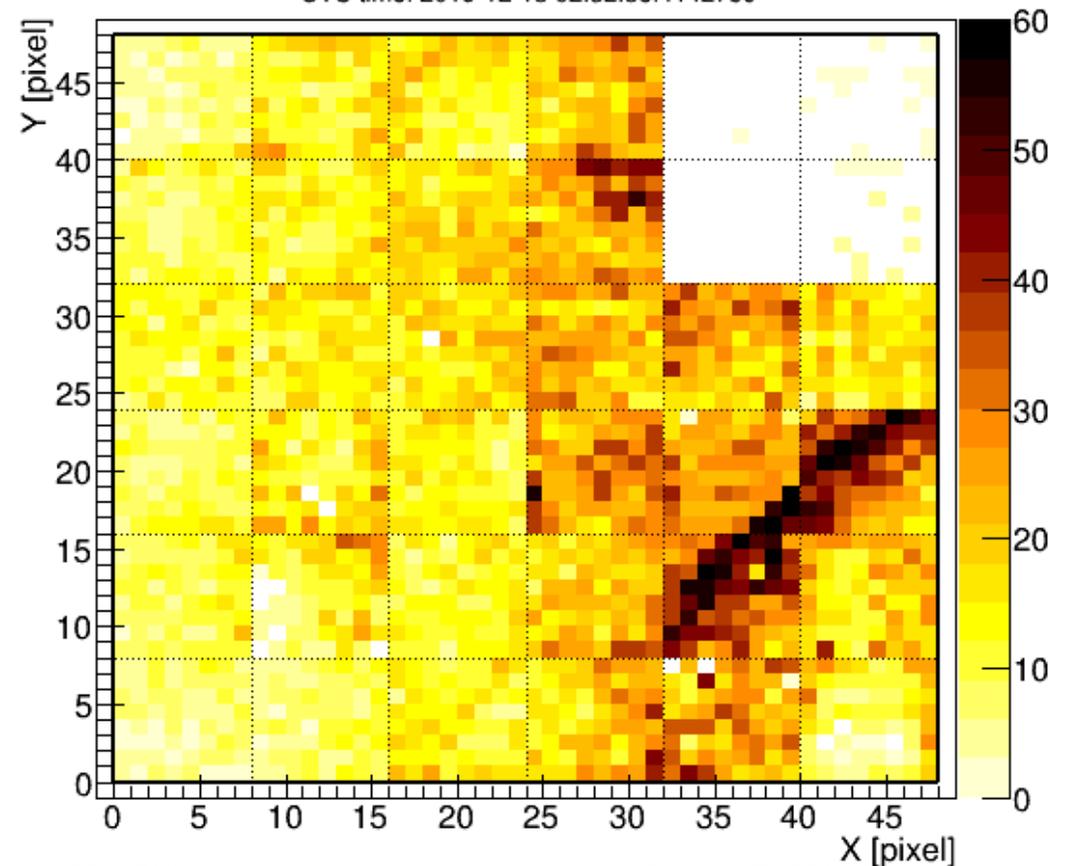


GTU: 57400, pkt: 448, GTU in pkt: 56,
UTC time: 2019-12-09 15:03:27.1281781



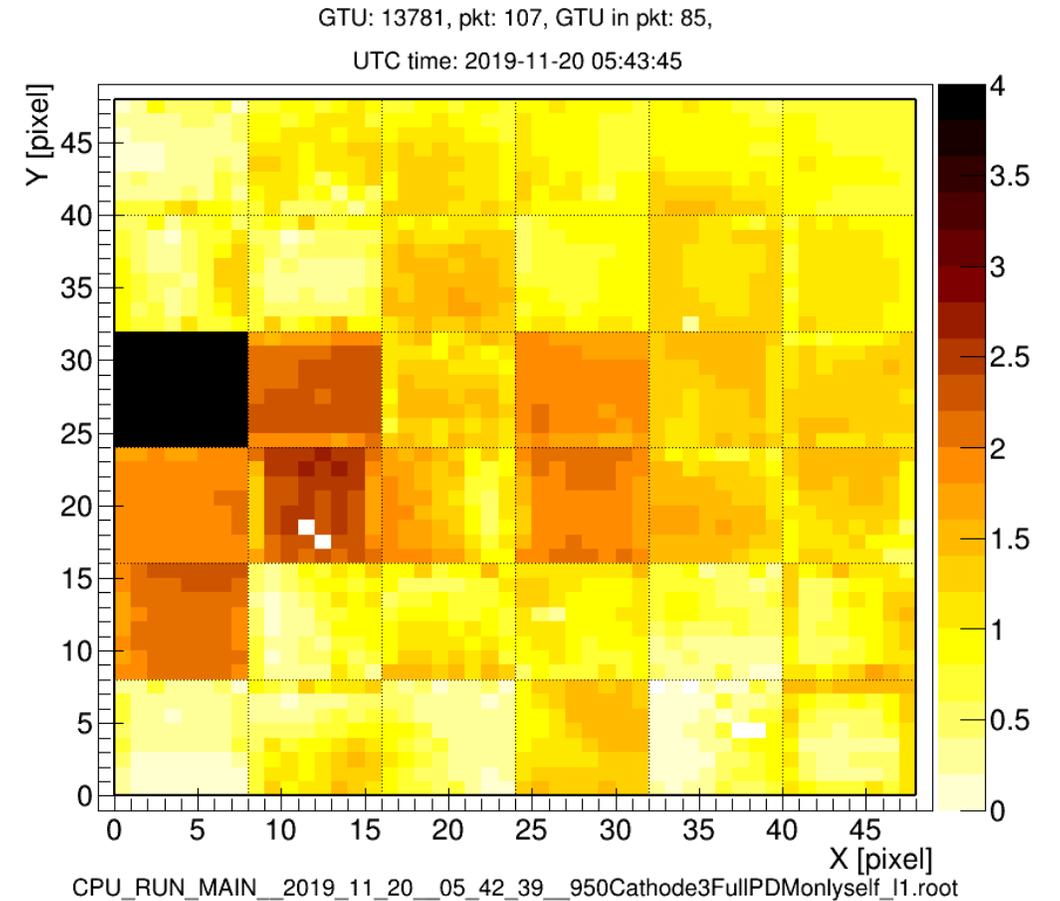
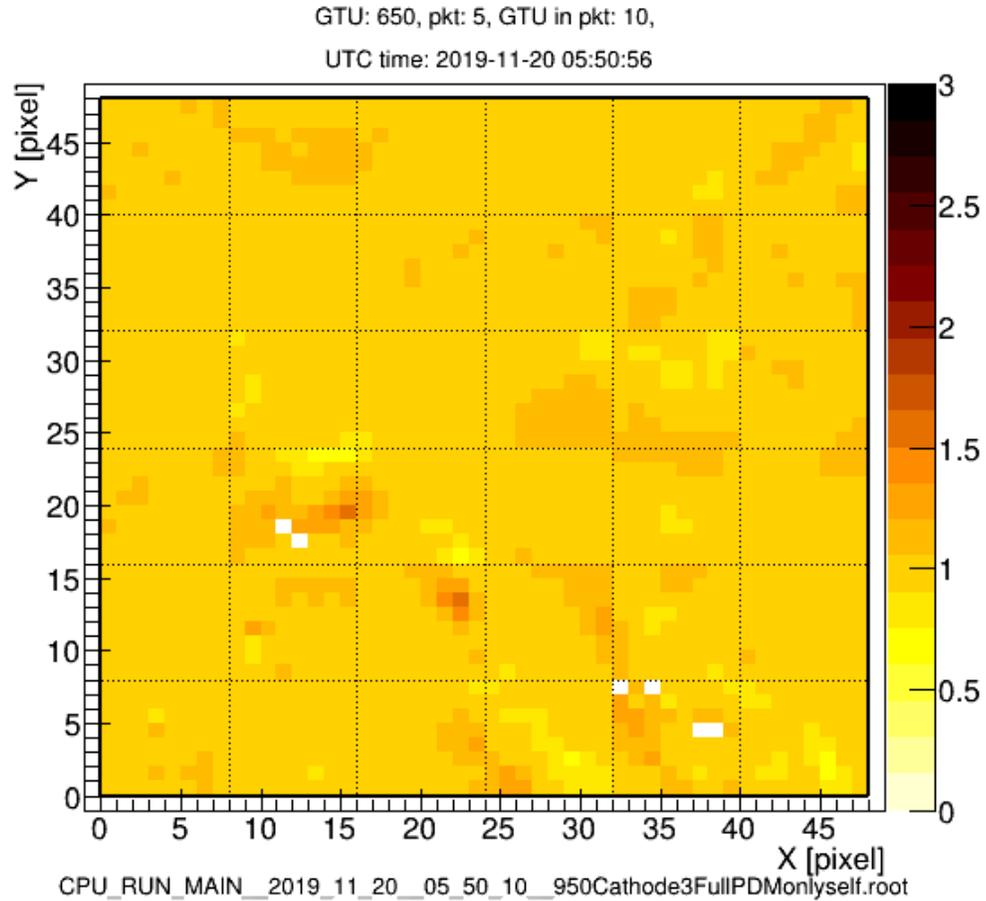
CPU_RUN_MAIN_2019_12_05_18_41_09_950Cathode3FullPDMonlyself.root

GTU: 88832, pkt: 694, GTU in pkt: 0,
UTC time: 2019-12-13 02:32:38.4142759

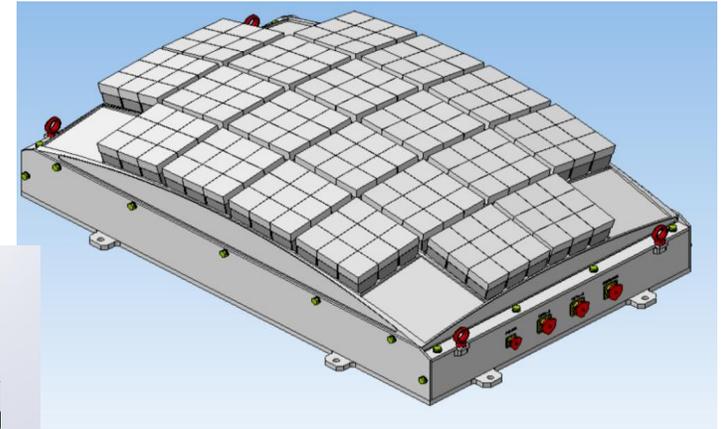
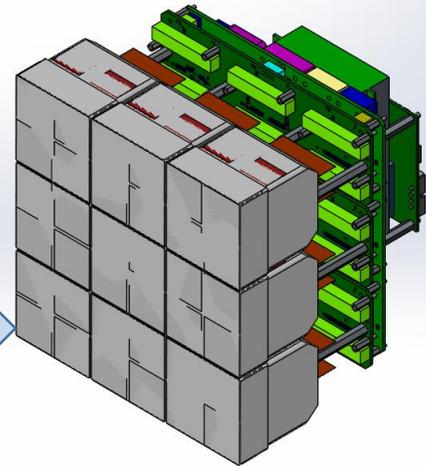
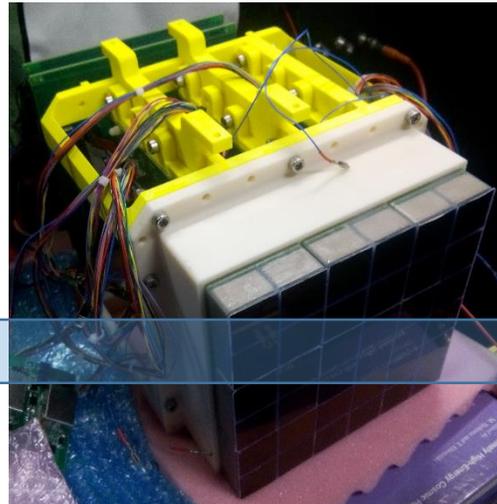
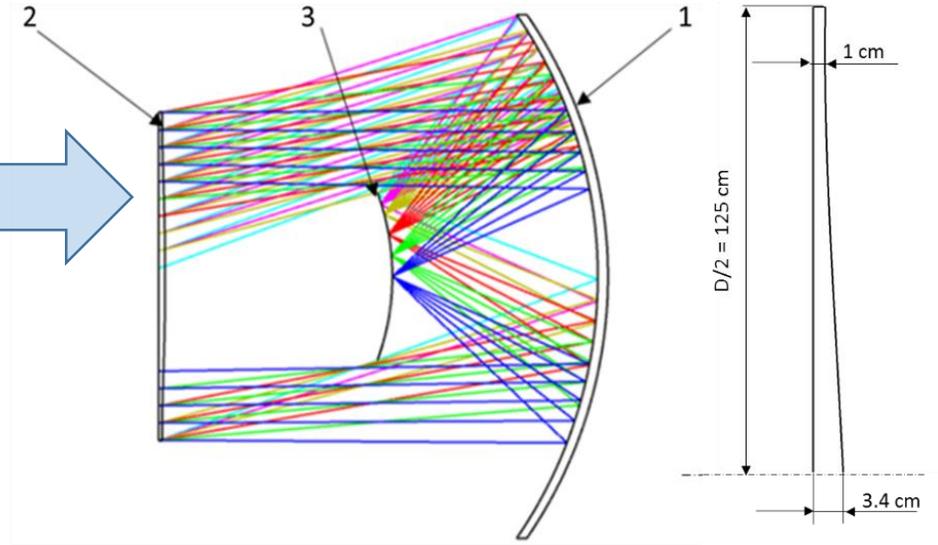
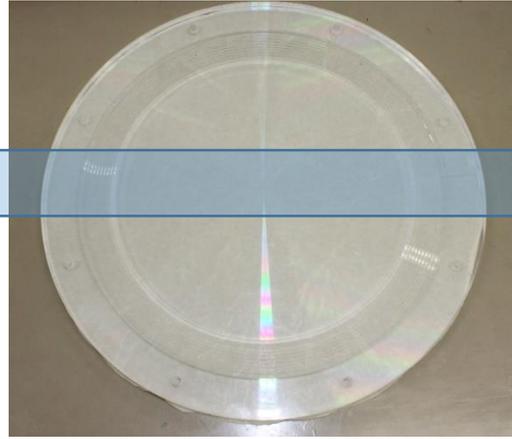


CPU_RUN_MAIN_2019_12_05_18_49_30_950Cathode3FullPDMonlyself.root

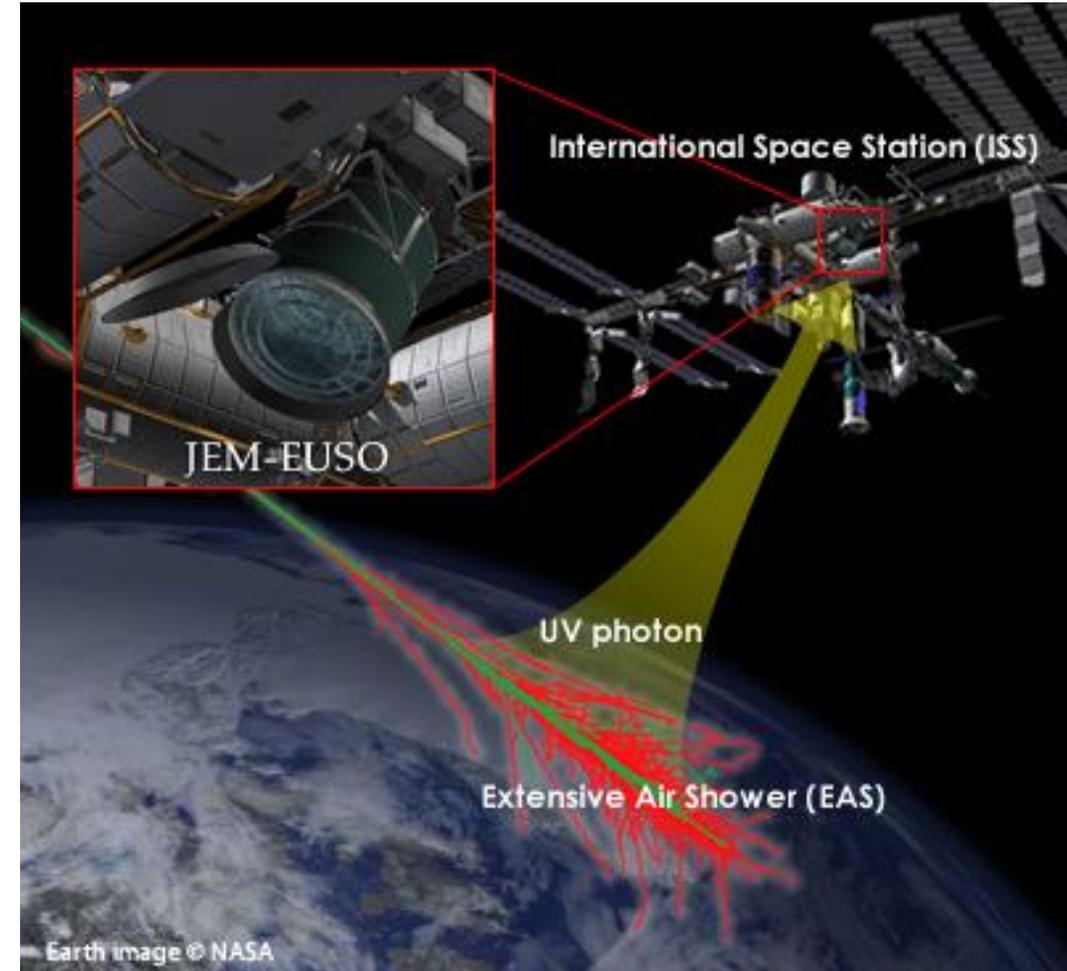
Метеоры



За время работы детектора зарегистрировано более 1000 метеоров



Проект «КЛПВЭ»



Проект «КЛПВЭ»

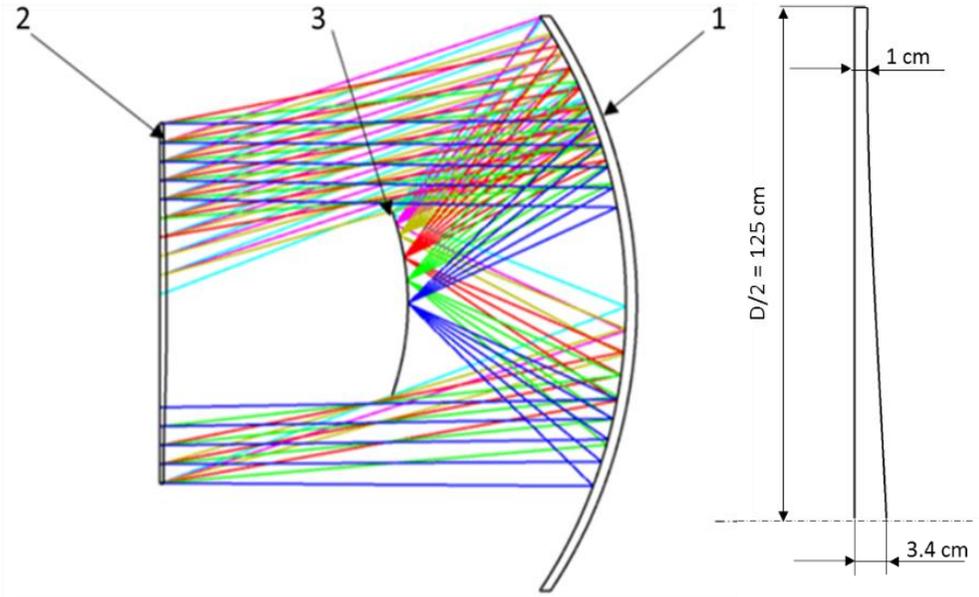


The design of the detector should provide measurements of UHECR with a threshold near 50 EeV with statistics of **~100 events per year**.

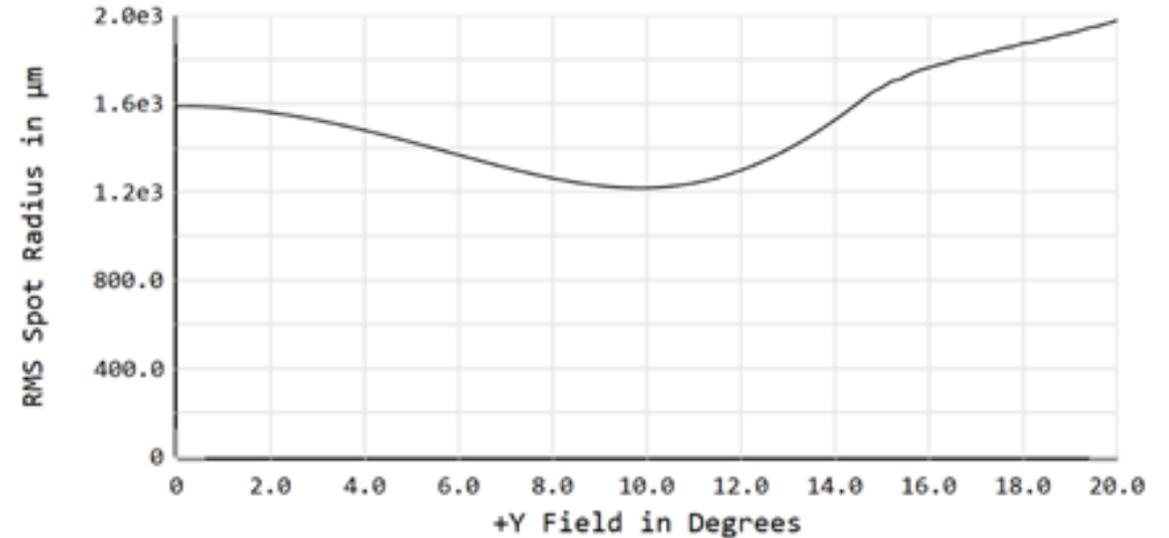
The main task is the energy spectrum and anisotropy measurements with uniform exposure over the celestial sphere

- Scientific objectives:
 - UHECR fluorescent radiation measurements from space
- Placement:
 - Russian Segment of the ISS
- Main technical parameters
 - ✓ K-EUSO – Telescope with an optical Schmidt scheme (a large area of the entrance window and a wide field of view)
 - ✓ Mirror diameter – 3.6 m
 - ✓ Time resolution 1-2.5 μ s
 - ✓ FOV **40 degrees**.
 - ✓ Angular resolution $\sim 10^{-6}$ sr
 - ✓ **Mass ~ 500 - 850 kg**

Оптическая система КНА «КЛПВЭ»



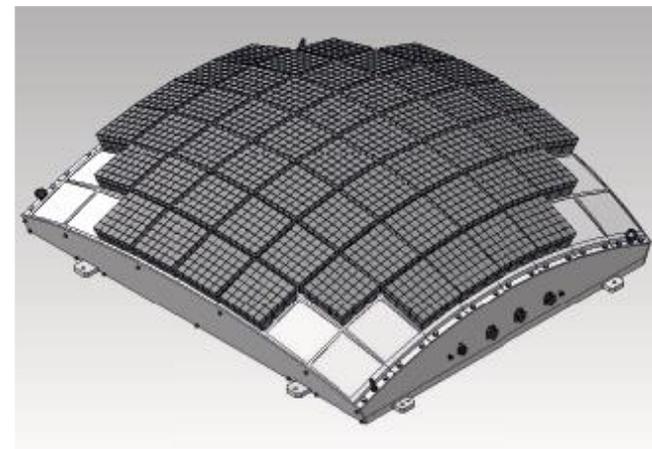
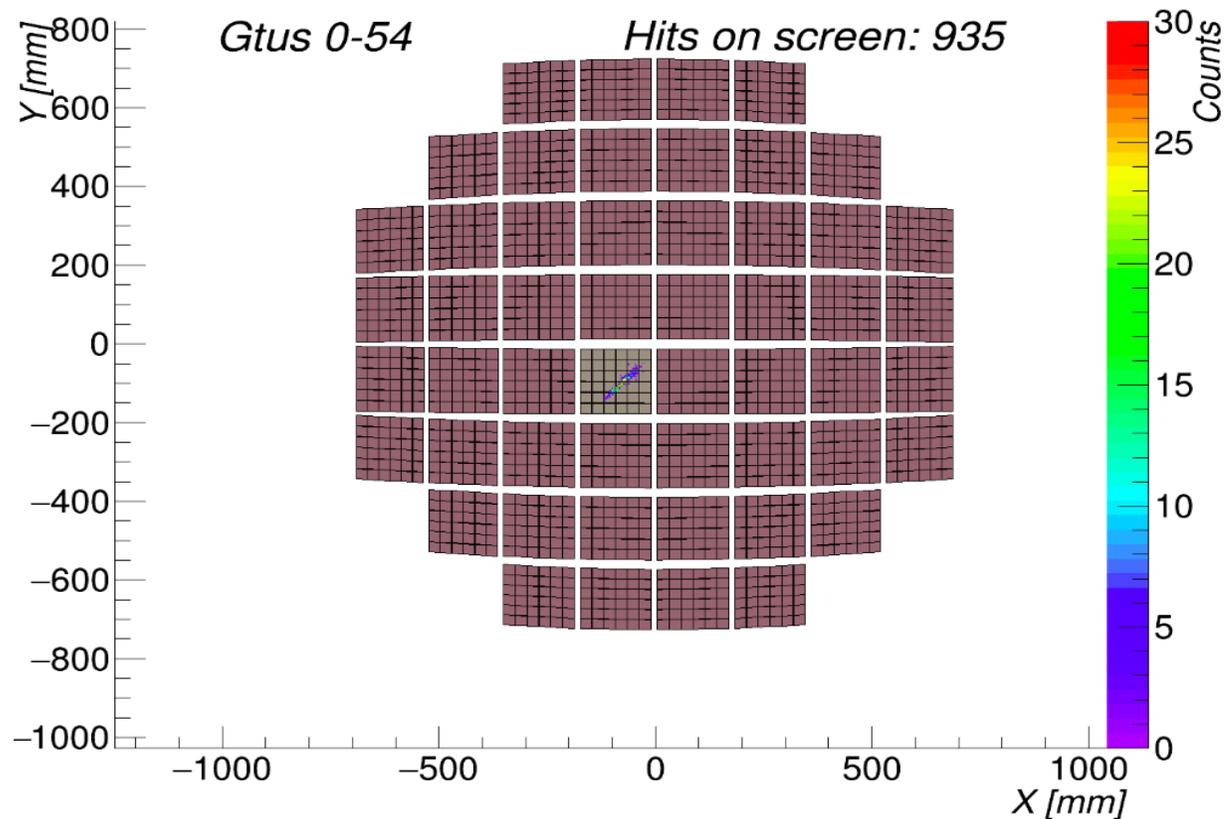
Характеристики системы, полученные в результате оптимизации параметров СЧ ОС.



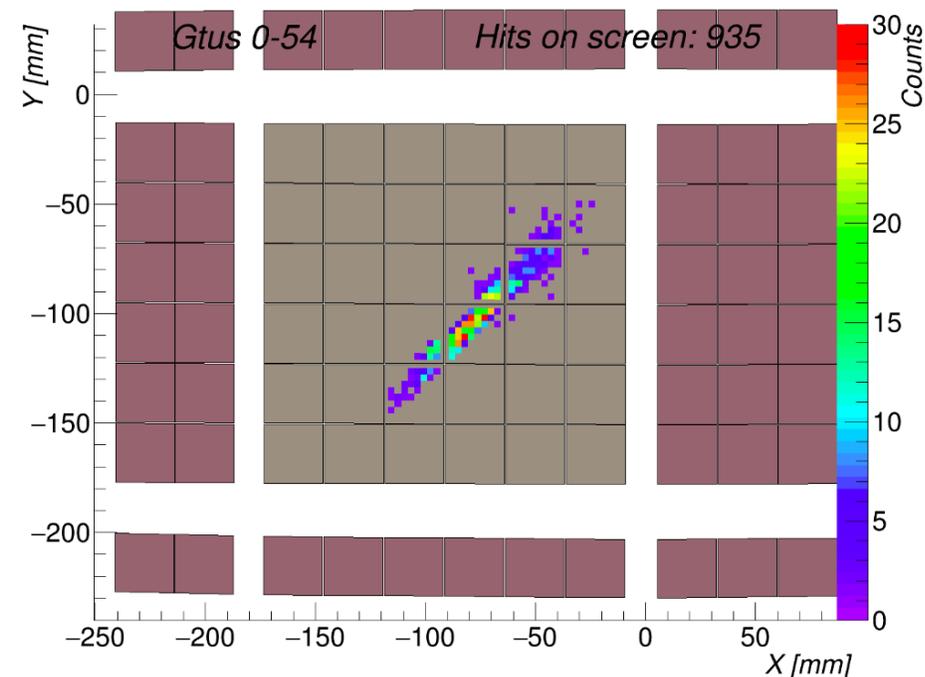
Параметр	Значение, мм
Диаметр корректора (КОЭ)	2500
Диаметр зеркала (СЗК)	4000
Диаметр световой ФП	1280
Радиус кривизны зеркала	3450
Радиус кривизны ФП	1800
Осевая длина системы	3426

Полевой угол	0°	5°	10°	15°	20°
Доля энергии в пикселе	0,74	0,92	0,89	0,75	0,55

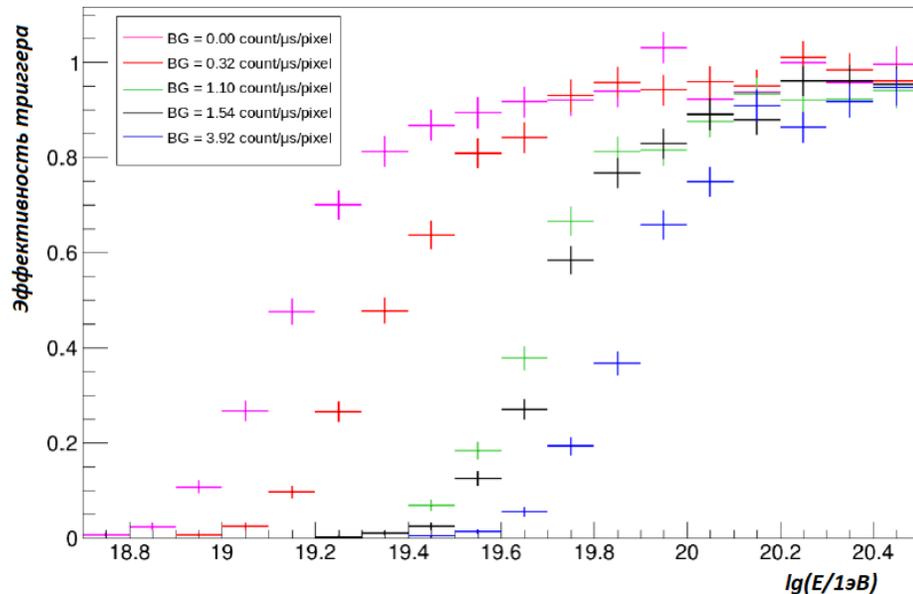
Моделирование работы детектора



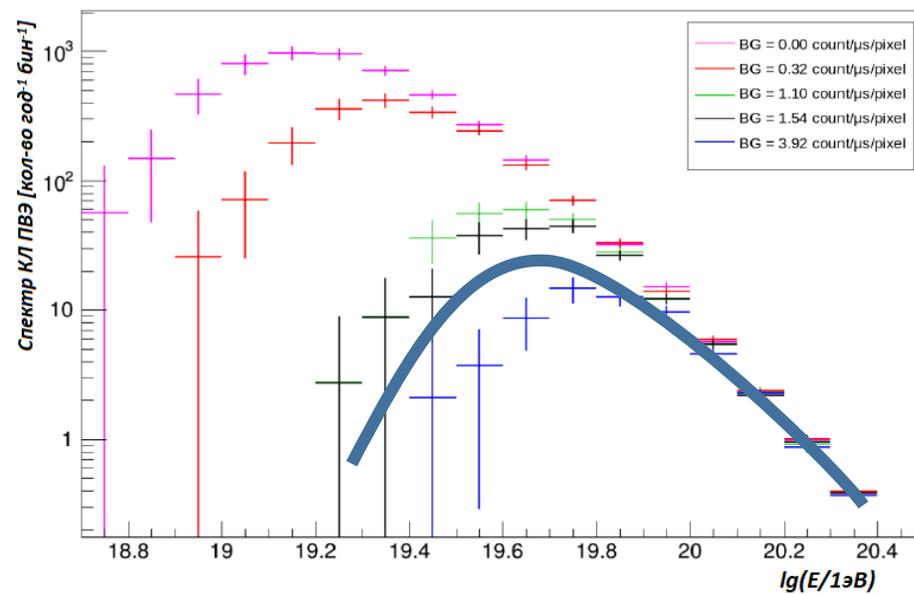
Трек ШАЛ на фотоприемнике «КЛПВЭ», снизу - в увеличенном виде изображен модуль фотоприемника, куда попал сигнал. Цветом обозначен интегральное значение сигнала (для простоты фон выключен).



Эффективность триггерной системы и экспозиция детектора «КЛПВЭ»



Figures by Alessandro Liberatore

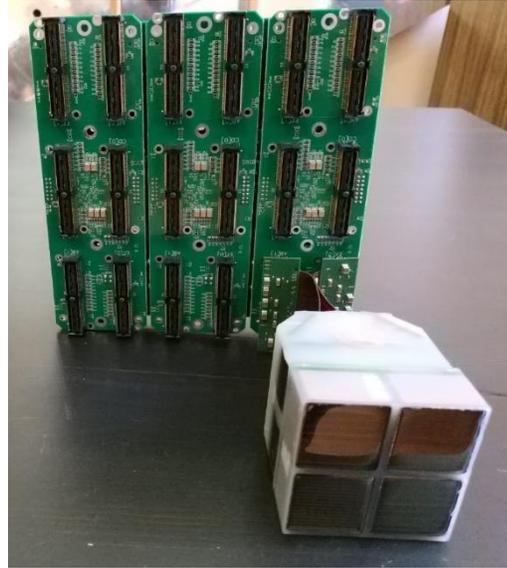
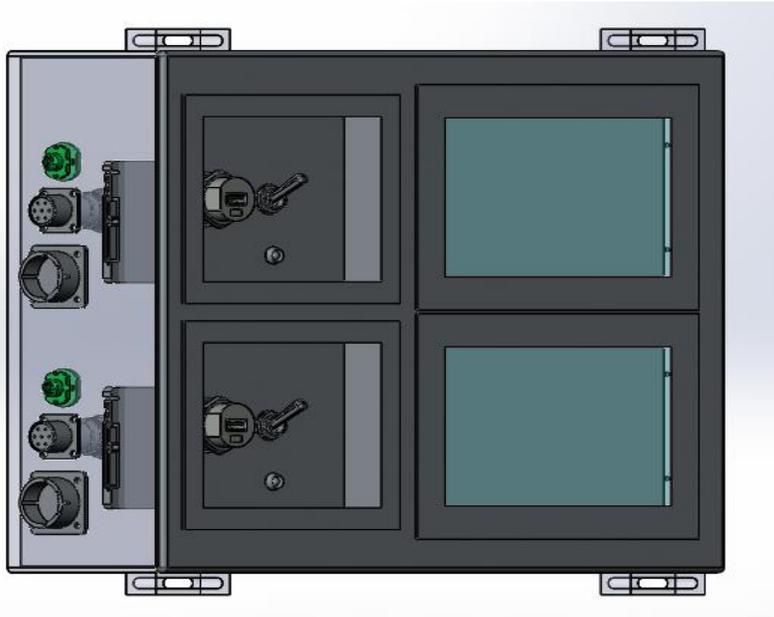


PAO spectrum (ICRC2017)

20 модулей
52 модуля

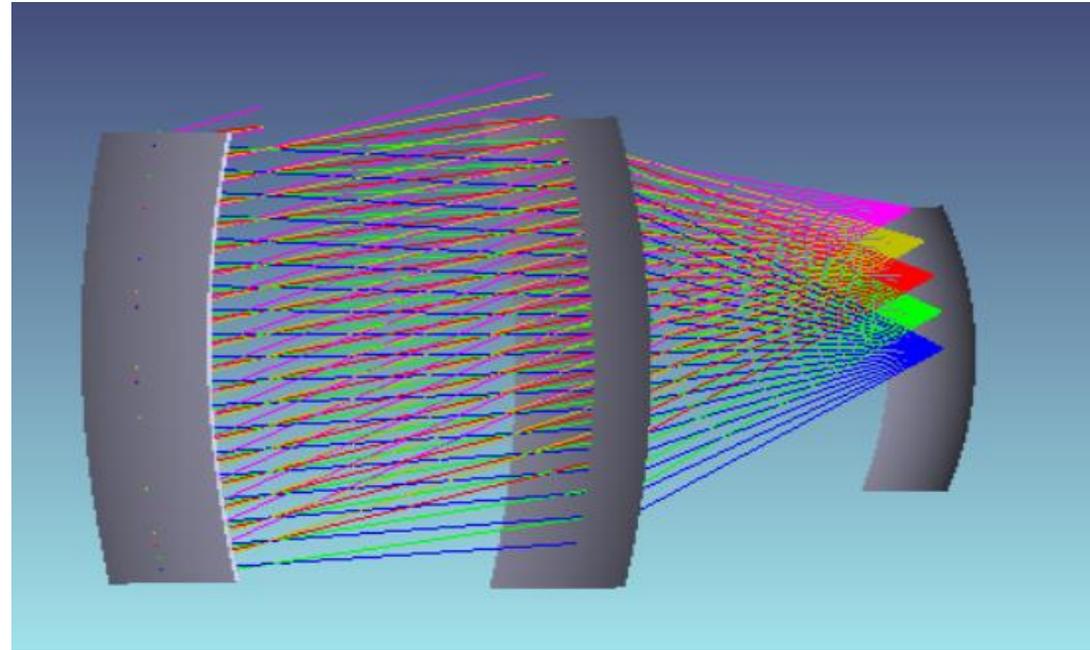
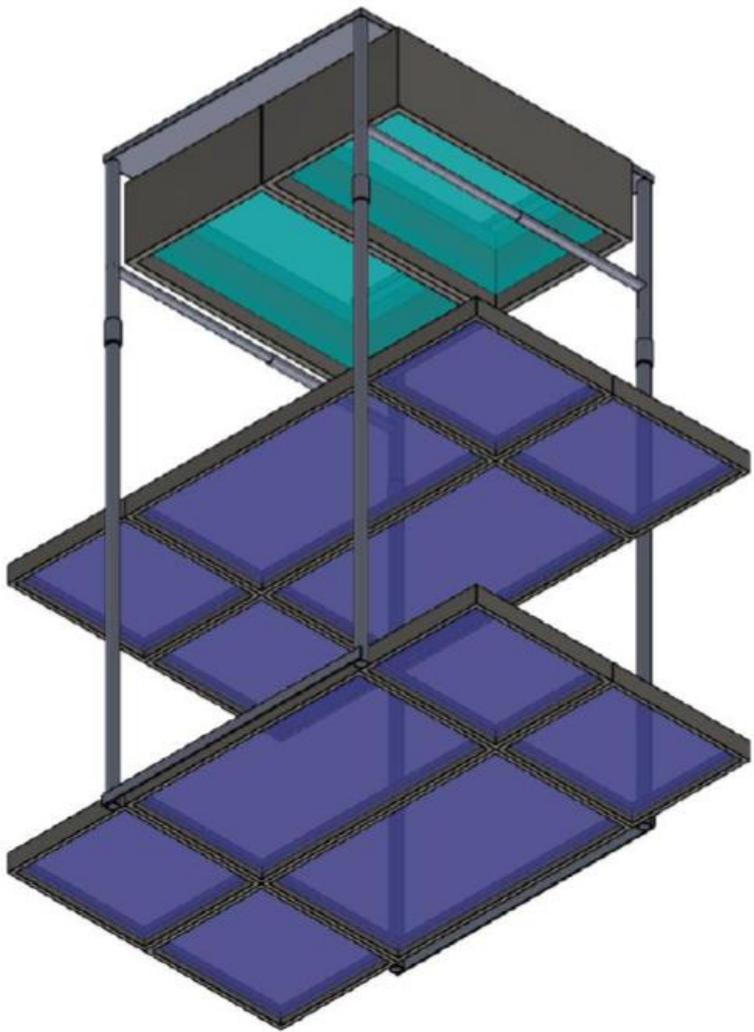
lg(E/1 eV)	19,4	19,5	19,6	19,7	19,8	19,9	20,0	20,1	20,2	20,3	20,4
$\geq E$ [EeV]	22	28	35	45	56	71	89	112	141	178	224
A	120	96	68	42	22	10,3	4,5	1,8	0,7	0,3	0,08
B	313	250	177	109	58	27	12	5	1,9	0,7	0,2

Изготовление макетов прибора



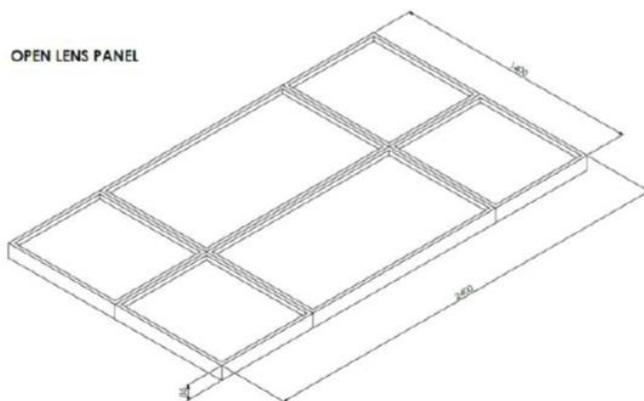
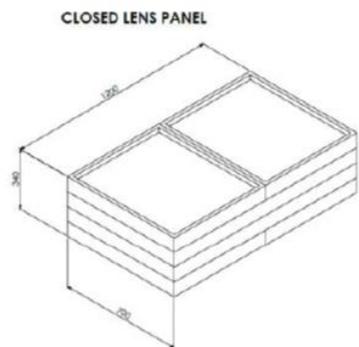
- ✓ Элементы электроники (модуль фотоприемника, блок обработки данных)
- ✓ Элементы оптической системы (модуль зеркала)

Упрощенный линзовый вариант

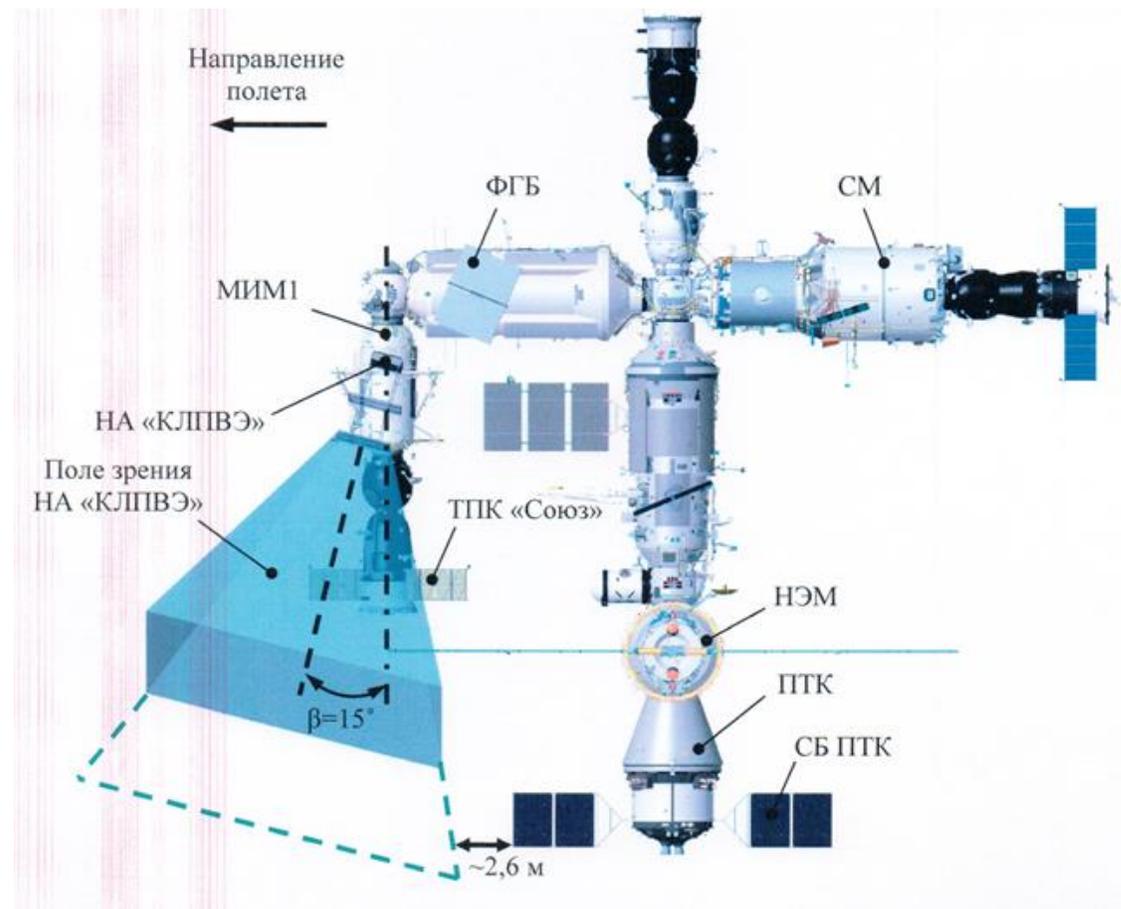


γ	0°(on axis)	15°	10°	15°	20°
d_{RMS} , mm	2.4	2.5/2.6	2.7/3.0	2.7/3.4	3.3/3.7
ϵ_{box}	59%	57/58%	52/47%	45/34%	36/18%
S_{eff} , m ²	1.8	1.7/1.7	1.6/1.4	1.4/1.0	1.1/0.5
EE	49%	46/46%	41/34%	36/23%	25/10%

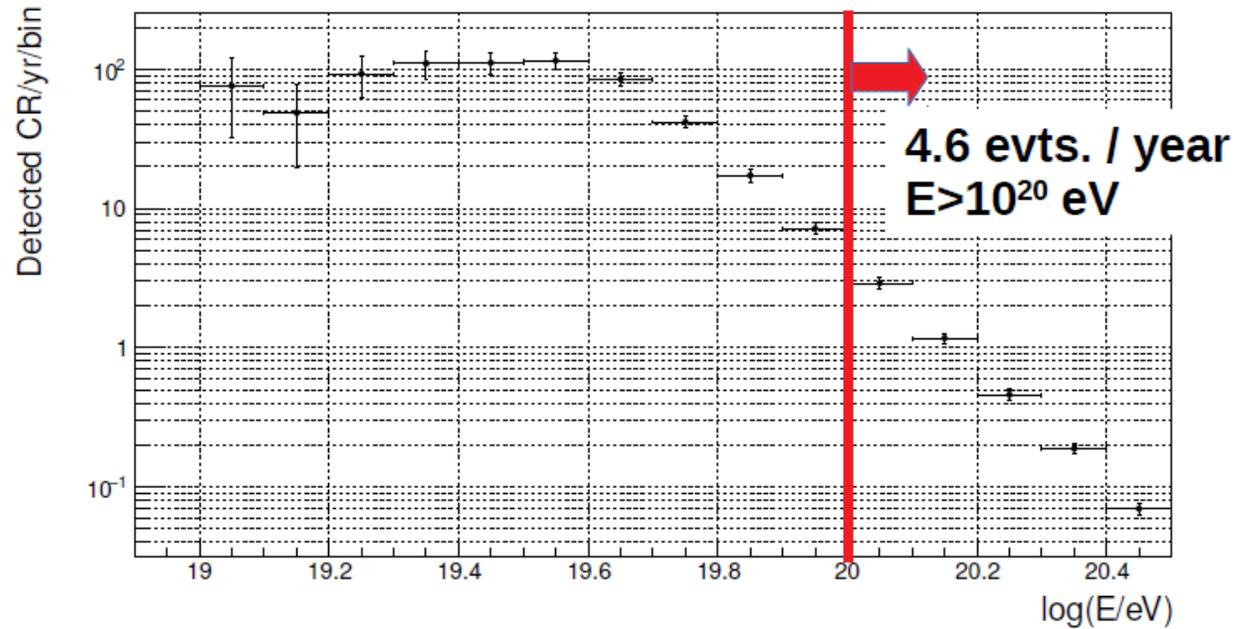
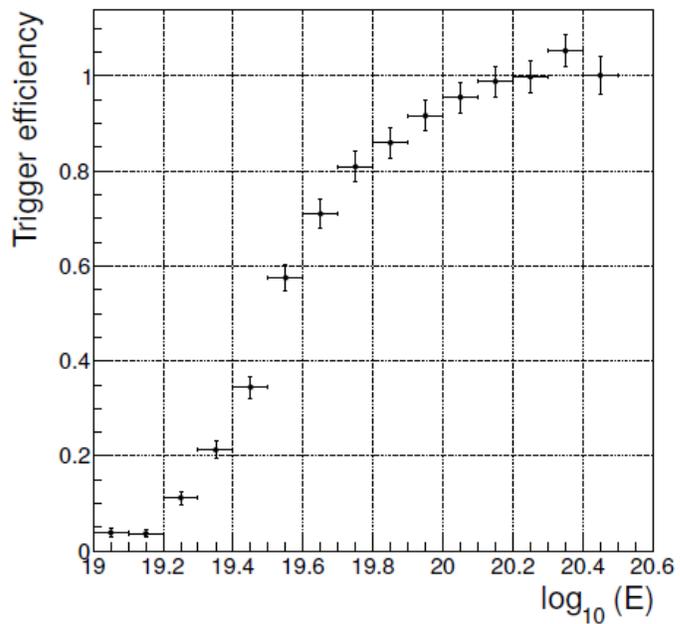
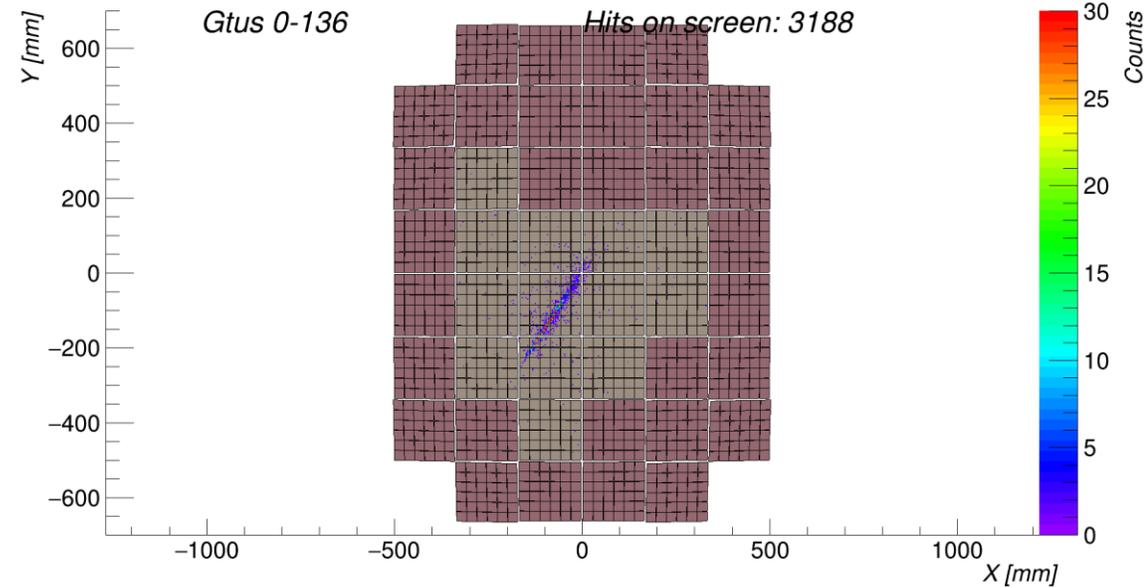
Доставка и размещение на МКС



TOTAL LENTS SURFACE : 3 m²



Моделирование работы линзового варианта детектора





EUSO-Balloon



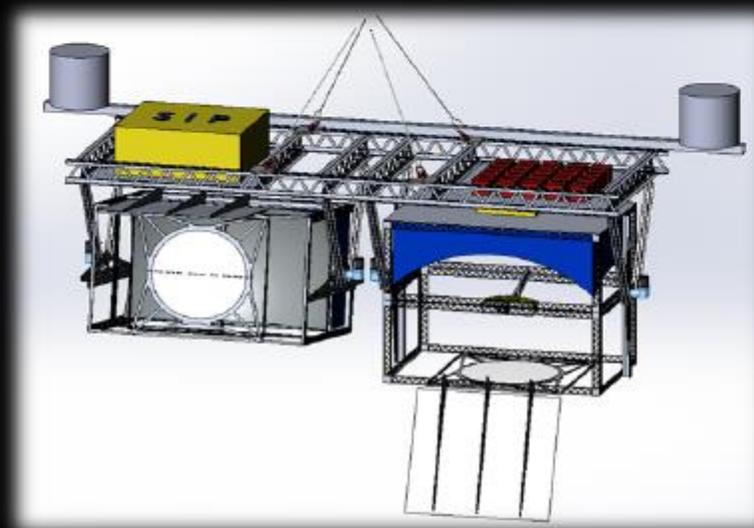
2014 Timmins

EUSO-SPB1



2017 Wanaka

EUSO-SPB2



(2022) Wanaka

POEMMA



(2029) Earth Orbit

K-EUSO

Slide from L. Wiencke

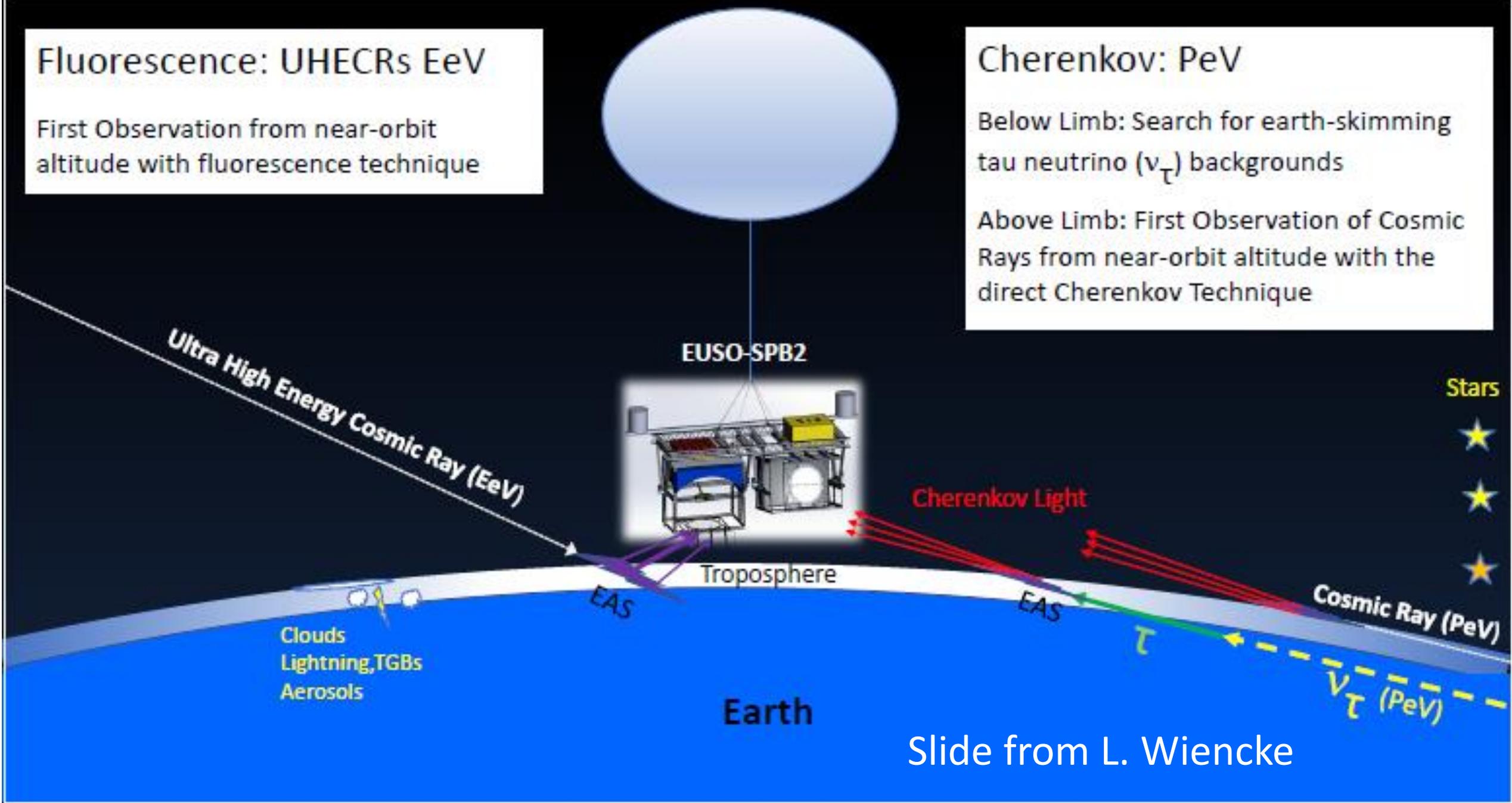
Fluorescence: UHECRs EeV

First Observation from near-orbit altitude with fluorescence technique

Cherenkov: PeV

Below Limb: Search for earth-skimming tau neutrino (ν_τ) backgrounds

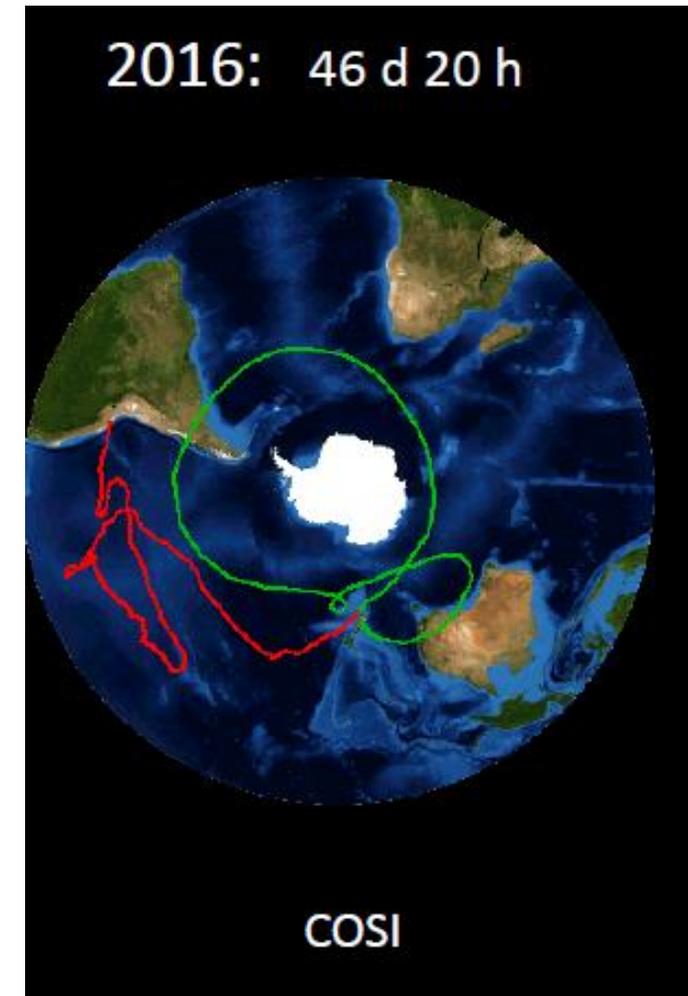
Above Limb: First Observation of Cosmic Rays from near-orbit altitude with the direct Cherenkov Technique



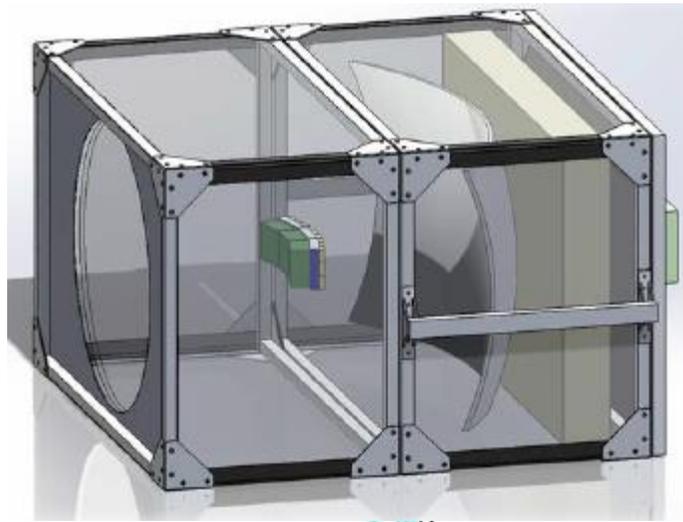
Параметры детекторов

100 days duration requested 110,000 ft (33 km) altitude

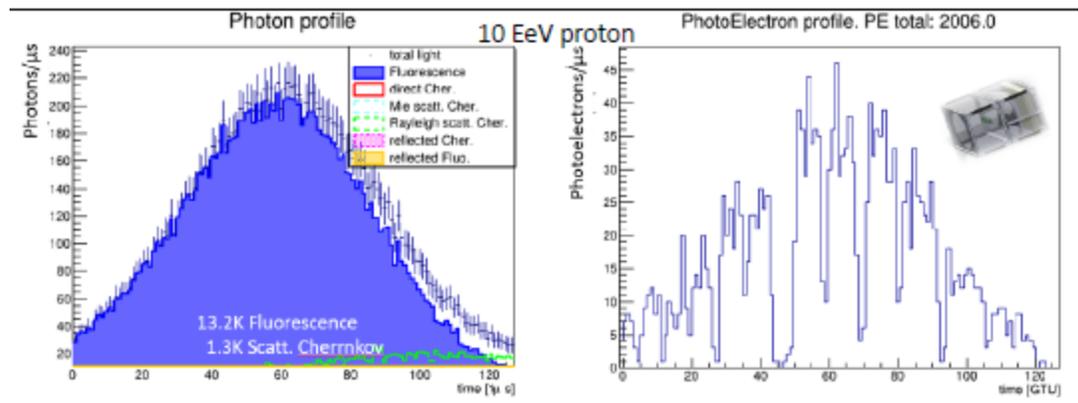
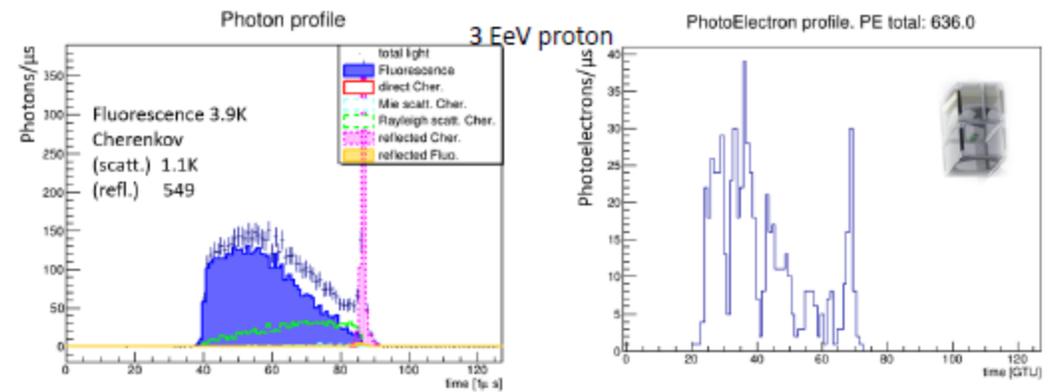
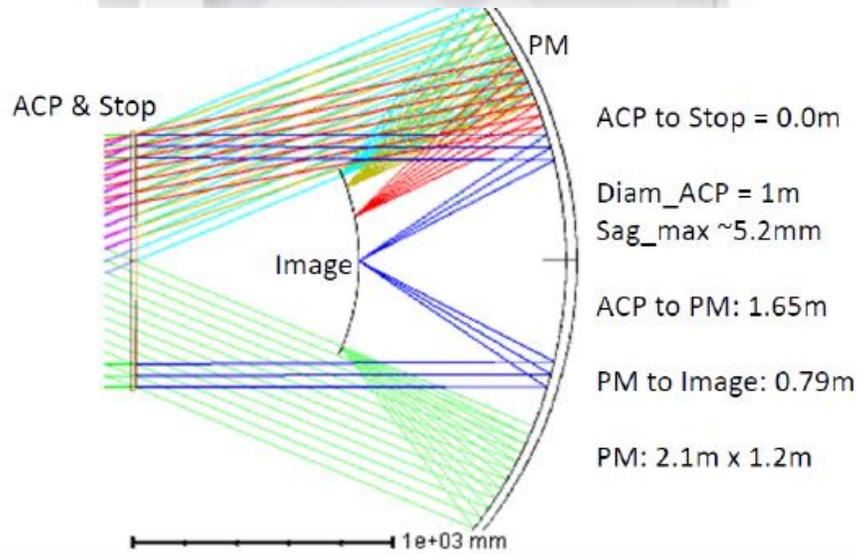
Telescopes	2	1 Fluorescence (FT)	1 Cherenkov (CT)
Energy Threshold		~3 EeV	~10 PeV (TBD)
Sensor Type		MAPMT	SiPM
Wavelength Sensitivity		UV 300-420 nm (filter)	400-800+ nm
Time Bin		1000 ns	10 ns
Pointing (zenith angle)		under study	Limb +/- 10? (under study)
Field of View (available)	40°x11° (each)		
FoV (instrumented)		~35° (azi) x11° (zen)	TBD (16°x4° ?)
Number of Pixels		6912	512
FoV (1 Pixel)		0.2°x0.2°	0.28°x0.28° or 0.4°x0.4°
Pixel Size		3x3 mm	4x4 mm or 6x6 mm
Optics (modified Schmidt)	Spherical Mirror, Glass Rad. of Curv.=1.66 m	8 segments common focus + camera corrector/filter	8 segments bifocal no optical filter
Entrance Pupil	1 m diameter (each)	PPMA corrector plate	PPMA corrector plate
Payload Weight	~2500 lbs (1000 gondola)	~750 lbs	~750 lbs
Earth Limb at 33 km Float: 5.8° below horizontal, 649 km from payload			



Флуоресцентный телескоп



- ✓ Камера Шмидта
- ✓ Порог регистрации $3 \cdot 10^{18}$ эВ

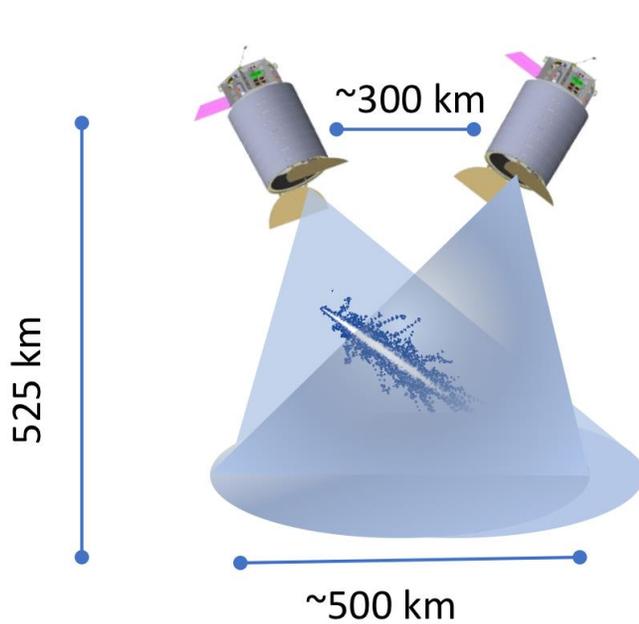


POEMMA

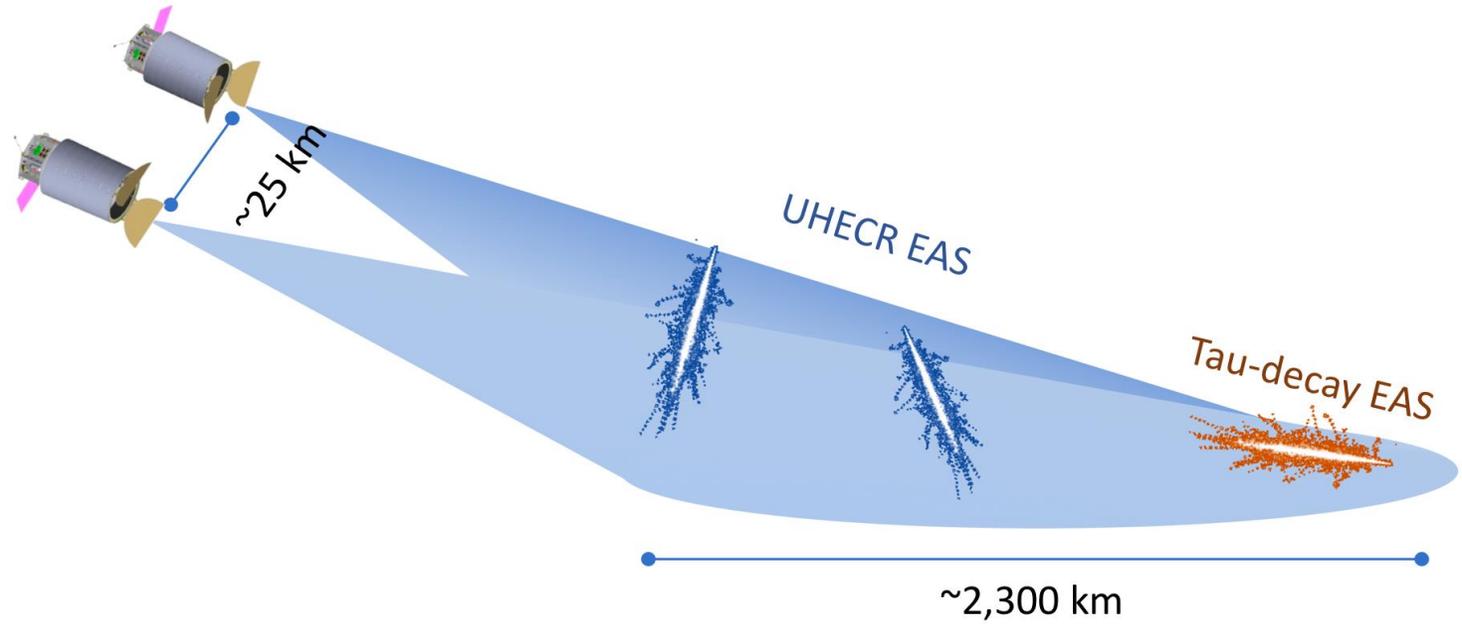
(Probe of Extreme Multi-Messenger Astrophysics)



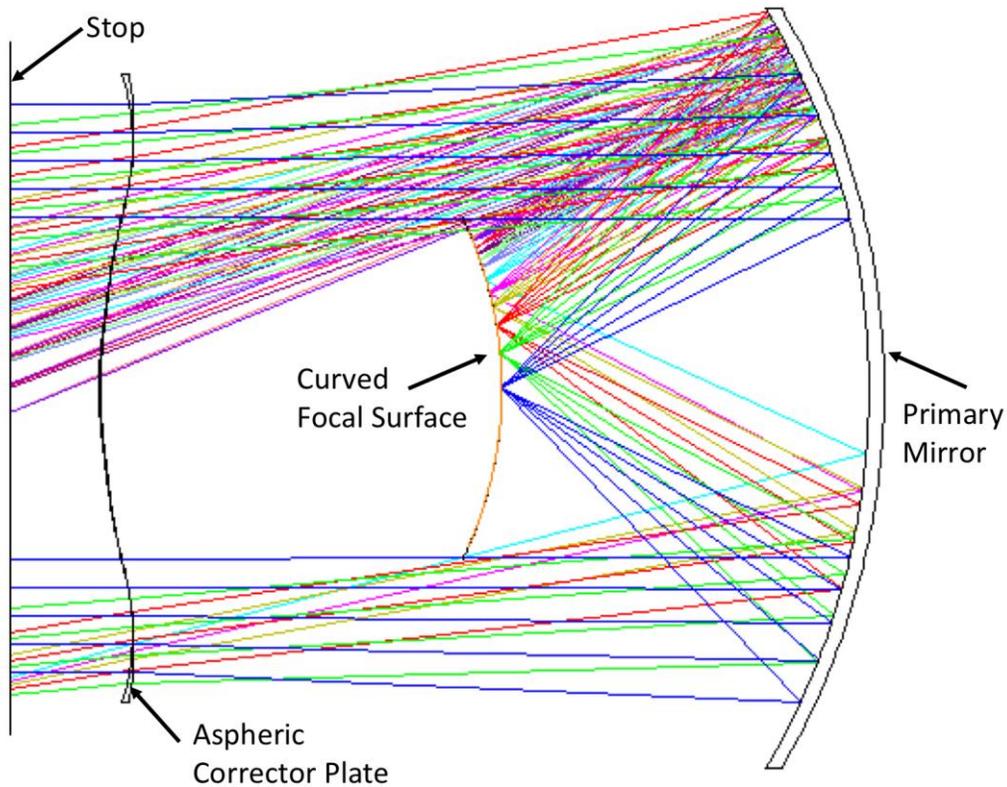
POEMMA-Stereo



POEMMA-Limb

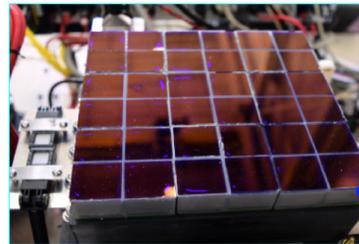


Телескоп: Камера Шмидта с комбинированным фотоприемником

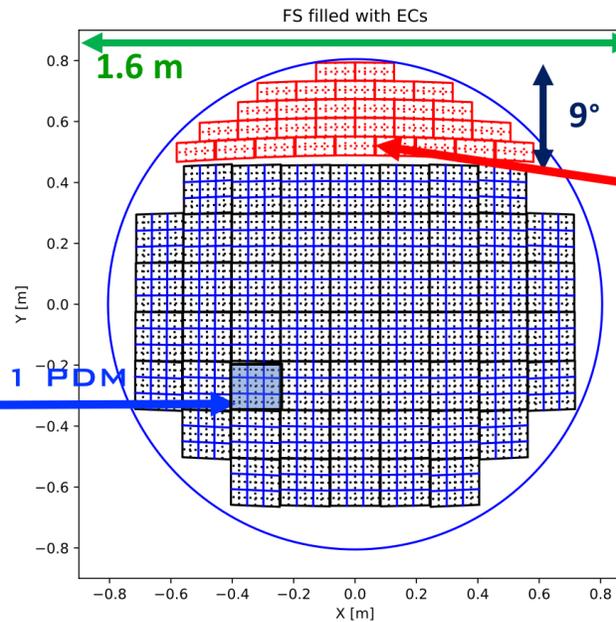


2e+03 mm

**PFC: POEMMA
FLUORESCENCE
CAMERA**



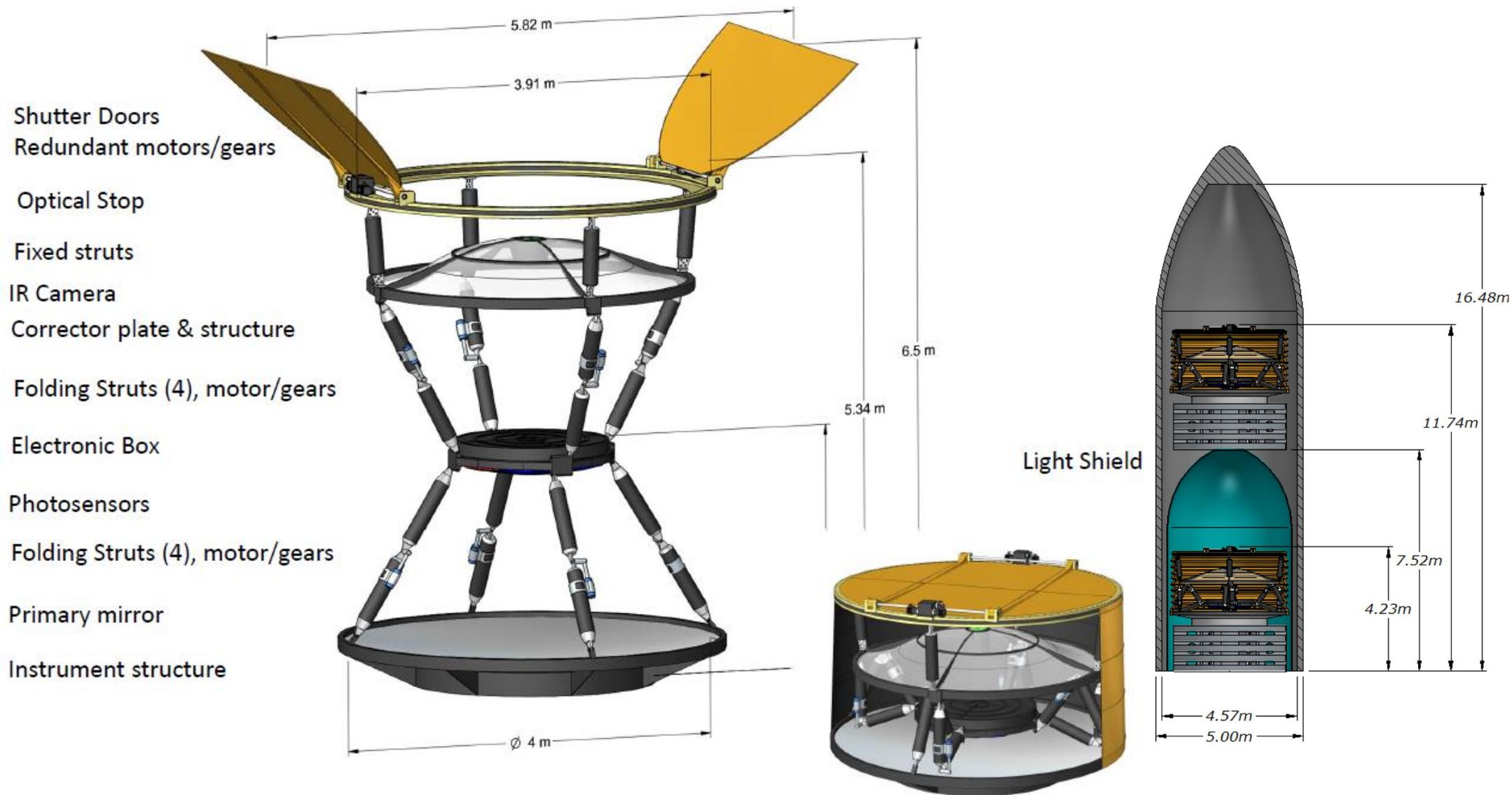
MAPMTs



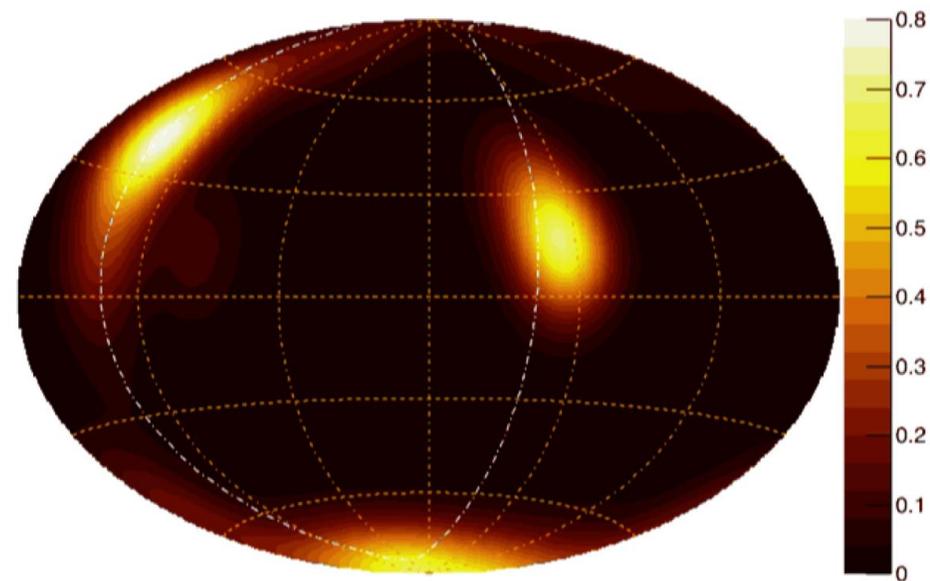
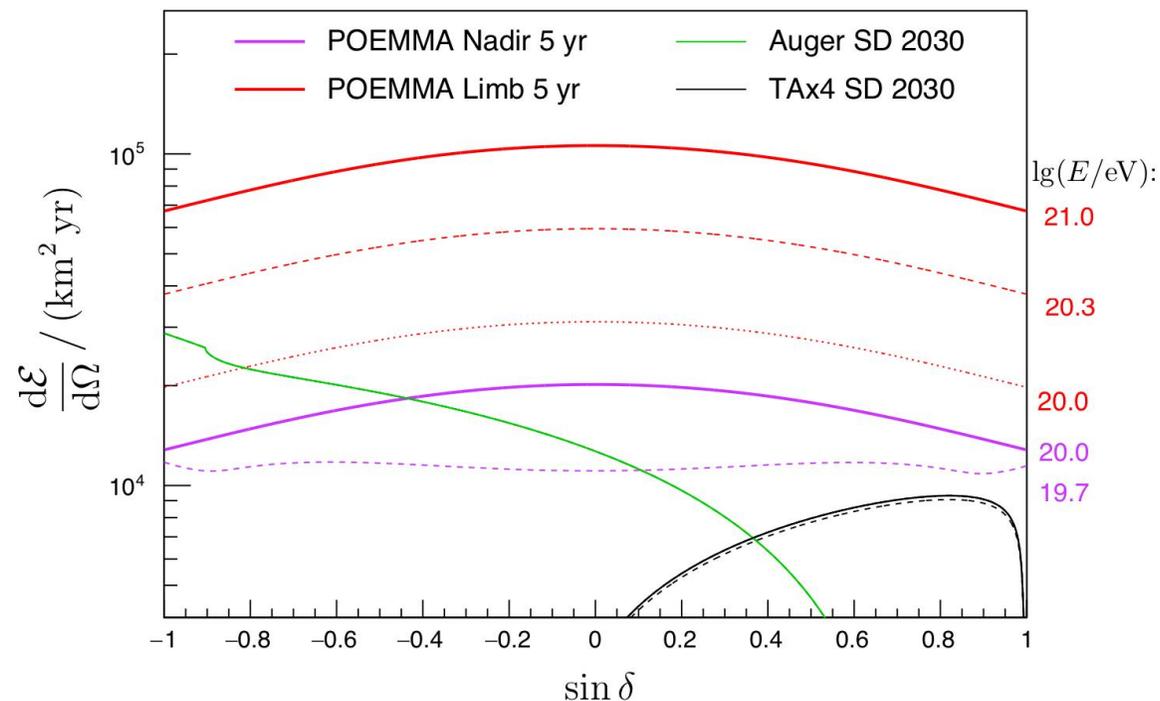
**PCC: POEMMA
CHERENKOV
CAMERA**



SIPMs



Экспозиция эксперимента РОЕММА



POEMMA's differential exposure as a function of declination compared to Auger and TAx4 extrapolated to 2030

POEMMA sky distribution of events if UHECR sources are located in nearby starburst galaxies.

JEM-EUSO Program

JUNE 15-19 2020 The 27th JEM-EUSO International Collaboration Meeting



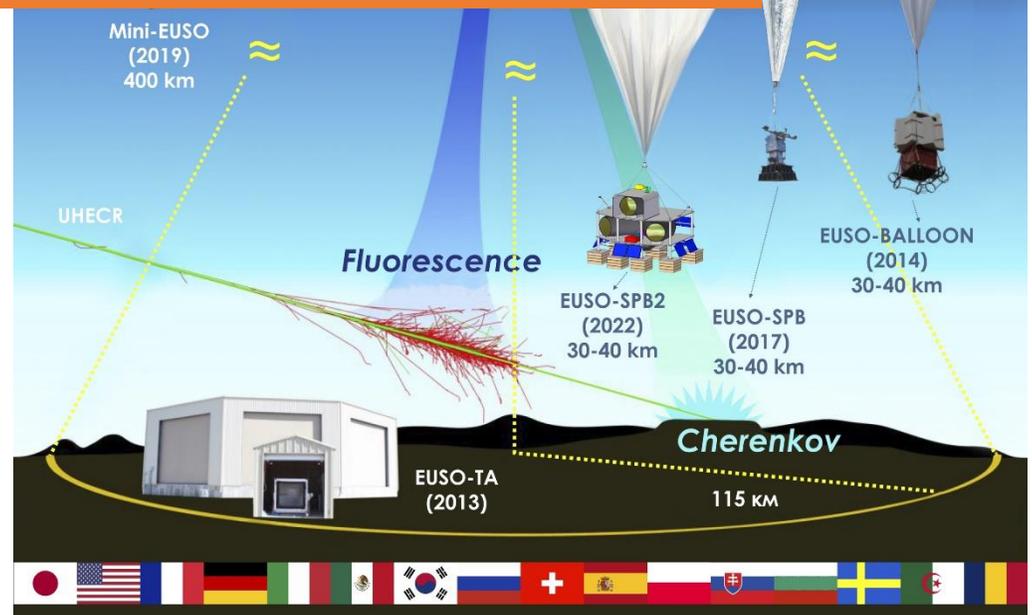
PROJECTS directed to UHECR/TLE study:



From EAS-like events to charged-particle astronomy



- MINI-EUSO/UV 2019
- New EUSO-TA 2020
- EUSO-SPB-02 2022
- K-EUSO 2023
- POEMMA



The meeting will take place at Skobelsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University

Спасибо за внимание!