

Малый флуоресцентный телескоп ШАЛ. Концепция и выбор конструктивных элементов

П.А. Климов^а, А.А. Белов, М.Ю. Зотов, С.А. Шаракин, Д.В. Чернов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына

ВККЛ-2024

НИИЯФ МГУ: что мы умеем делать?

- Флуоресцентный телескоп-рефлектор «ТУС» на спутнике «Ломоносов»
- Эскизный проект большого орбитального телескопа «КЛПВЭ» (K-EUSO) для МКС
- В составе в международной коллаборации JEM-EUSO:
Mini-EUSO на борту МКС, стратосферные эксперименты EUSO-Balloon, EUSO-SPB1, EUSO-SPB2
- Проект RAIPS: система фотометров на Кольском полуострове для исследования пульсирующих полярных сияний



Что мы хотим сделать и зачем?

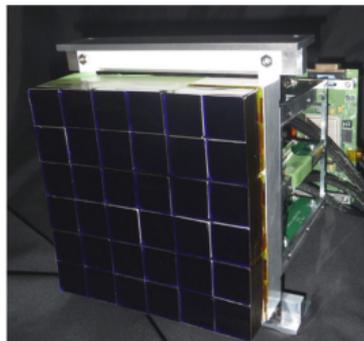
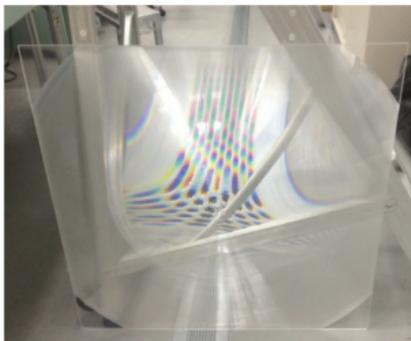
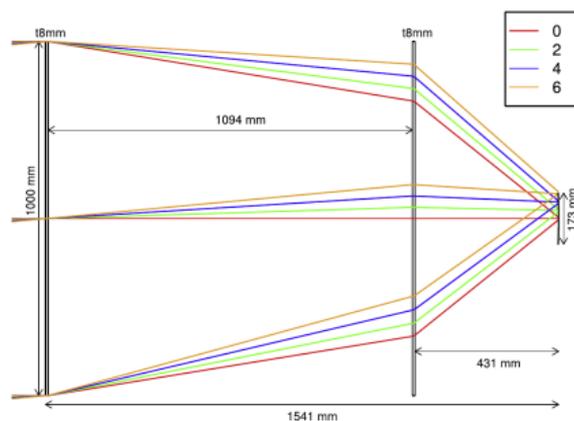
Цель работы

- Создание компактного, дешевого флуоресцентного телескопа космических лучей сверхвысоких энергий
- Задачи на данном этапе работы:
 - Проработка различных вариантов конструкции и компоновки
 - Моделирование и оптимизация параметров аппаратуры
 - Формирование научно-технических и технико-экономических показателей

Мотивация

- Создание прототипа орбитального телескопа «КЛПВЭ» в условиях импортозамещения
- Разработка телескопа для проекта TAIGA-100
- Многофункциональность детектора флуоресценции: исследования ШАЛ, гроз, высокоатмосферных транзиентов, полярных сияний, метеоров. . .

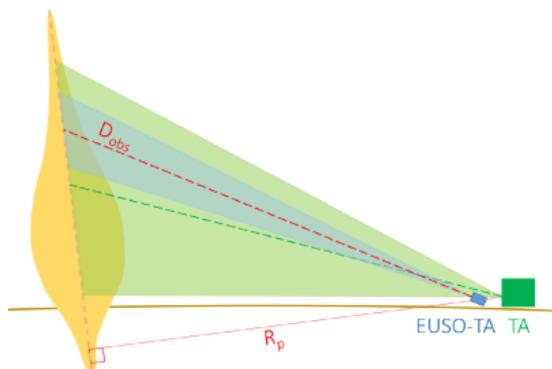
Наземный телескоп EUSO-TA



Телескоп на сайте Telescope Array:

- две линзы Френеля $\varnothing 1$ м
- фокальная поверхность 48×48
- поле зрения $10.6^\circ \times 10.6^\circ$
- временное разрешение 2.5 мкс (обновление: 1 мкс)

Наземный телескоп EUSO-TA



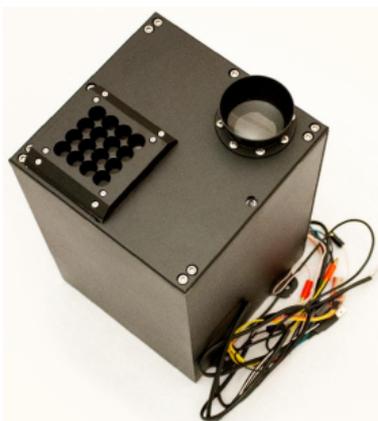
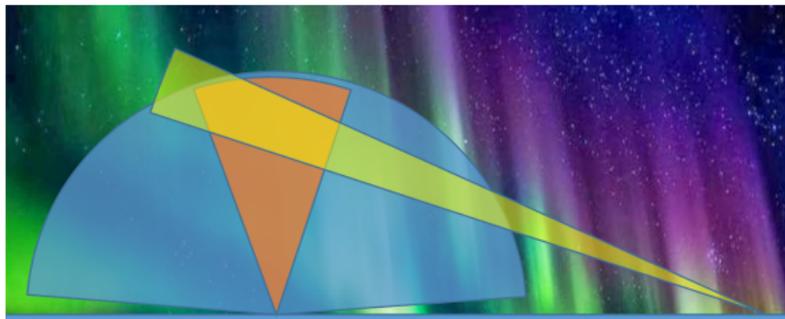
elev. (deg)	E_{recTA} (eV)	θ (deg)	ϕ (deg)	R_p (km)	$E_{eq,atm}$ (eV)	D (km)
25	4.89779e+18	56.9	15.7	8.3	2.091e+18	8.66
15	1.14815e+18	34.5	82.8	2.5	3.268e+18	2.88
25	1.58489e+18	62.9	27.0	0.8	6.975e+18	1.04
21	1.12202e+18	29.5	254.9	5.0	5.606e+17	5.12
20	3.23594e+18	60.4	169.3	9.1	1.878e+18	19.80
10	2.39883e+18	41.2	114.8	6.7	3.505e+17	10.03
15	3.31131e+18	40.6	210.5	9.0	2.165e+18	10.07
10	5.12861e+17	10.6	130.5	1.7	3.099e+17	2.12
15	2.63027e+18	8.1	8.0	2.6	2.077e+18	2.76

За 130 часов наблюдений в 2015 г. зарегистрировано 9 ШАЛ от КЛ с энергией $\gtrsim 500$ ПэВ (реконструкция Telescope Array)

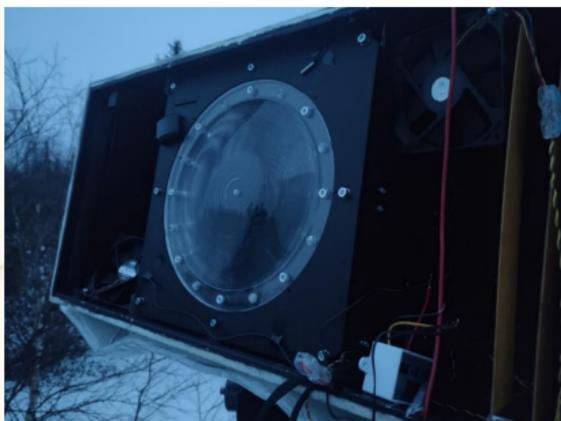
Основная проблема реконструкции данных EUSO-TA — маленькое поле зрения.

Предварительные результаты применения нейронных сетей к модельным данным: средняя ошибка реконструкции энергии во всём диапазоне $\gtrsim 1$ ЭэВ $\sim 20\%$, медиана ошибки определения направления прихода $< 5^\circ$ (см. постер)

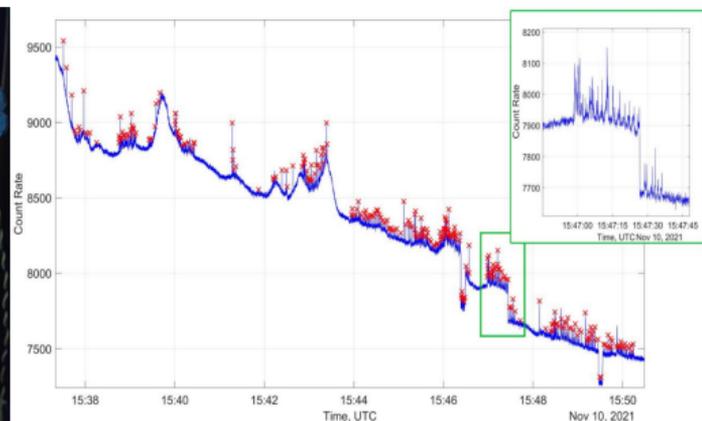
Эксперимент Pulsating Aurora Imaging Photometers System (PAIPS)



Верхнетуломская (2021)



Ловозеро (2023)



Микровсплески

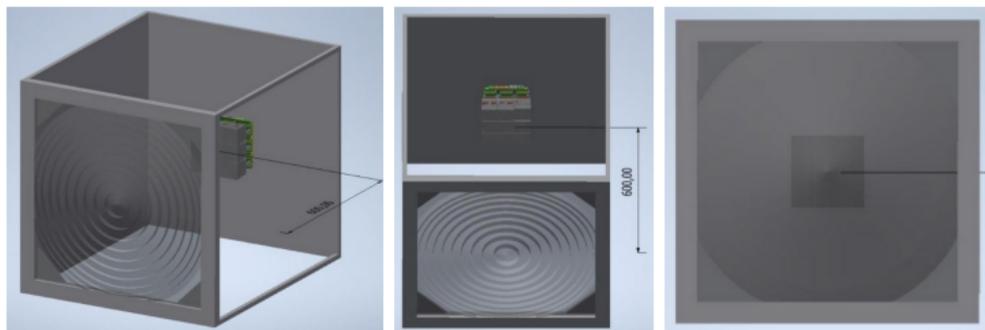
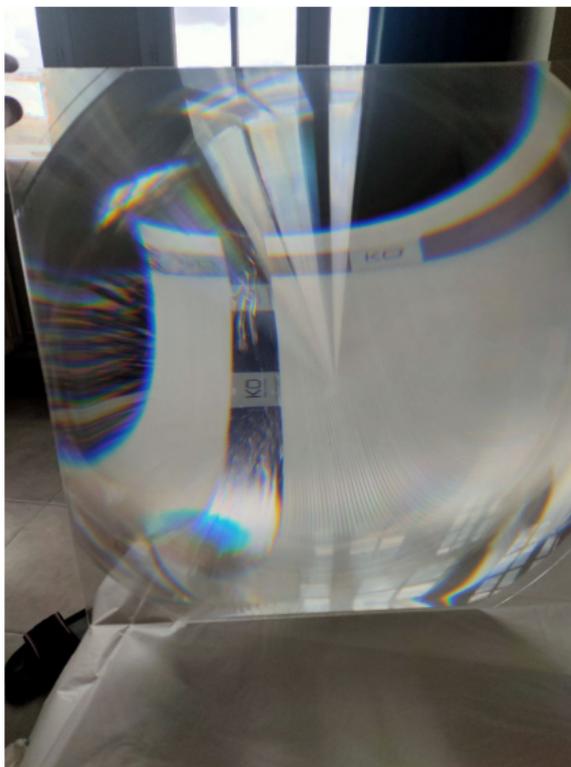
Линзовый вариант малого флуоресцентного телескопа для КЛ

Основные элементы:

- оптическая система: линза Френеля 60 см×60 см Knight Optical (возможно, 1 м×1 м)
- фотоприемник: матрица 64 × 64 кремниевых фотоумножителей SensL SiPM 6 мм×6 мм (возможно, 3 мм×3 мм)

Целевые характеристики:

- временное разрешение: 100 нс
- поле зрения $\sim 30^\circ \times 30^\circ$
- угловое разрешение: $\sim 0.5^\circ$ (0.25°)



Предварительная оценка порога по энергии

$$\frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} \propto \sqrt{S_{\text{opt. eff.}}}$$

Соотношение эффективных площадей
оптических систем:

$$\frac{S_{\text{EUSO-TA}}}{S_{\text{MFT}}} \approx \frac{1 \text{ m}^2}{0.36 \text{ m}^2} \approx 2.8$$

Отсюда оценка порога:

$$E_{\text{MFT}} \approx \sqrt{2.8} E_{\text{EUSO-TA}} \approx 1-2 \text{ EeV}$$

События, зарегистрированные EUSO-TA:

elev. (deg)	$E_{\text{recTA}}(\text{eV})$	θ (deg)	ϕ (deg)
25	4.89779e+18	56.9	15.7
15	<u>1.14815e+18</u>	34.5	82.8
25	1.58489e+18	62.9	27.0
21	<u>1.12202e+18</u>	29.5	254.9
20	3.23594e+18	60.4	169.3
10	2.39883e+18	41.2	114.8
15	3.31131e+18	40.6	210.5
10	<u>5.12861e+17</u>	10.6	130.5
15	2.63027e+18	8.1	8.0

- В лаборатории КЛ ПВЭ НИИЯФ МГУ накоплен существенный опыт по созданию флуоресцентных телескопов ШАЛ наземного, суборбитального и космического базирования.
- Компактные линзовые телескопы успешно используются в проектах EUSO-TA и PAIPS.
- Проработан предварительный облик компактного флуоресцентного телескопа на основе линзы Френеля и кремниевых фотоумножителей для регистрации ШАЛ от КЛ СВЭ. Площадь входного окна — не менее 0.36 м^2 , оценка порога по энергии $\sim 1\text{--}2 \text{ ЭэВ}$.
- Стоимость изготовления одного телескопа около 10 млн. руб.
- Ожидаемые сроки реализации: 2024–2025 гг.