



Разработка проекта СФЕРА для изучения состава ПКЛ в области 1-1000 ПэВ. Статус 2024 года

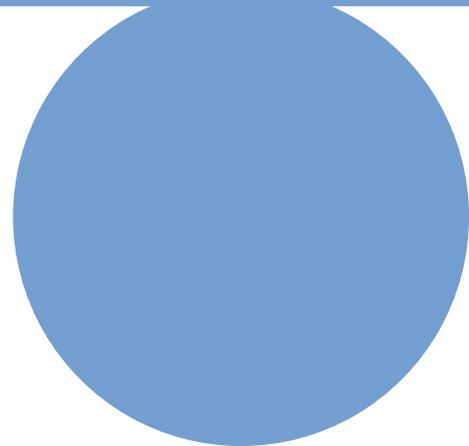
ПКЛ2 #33

Чернов Д.В.
от группы СФЕРА
НИИЯФ МГУ

38-ая Всероссийская конференция
по космическим лучам

ВККЛ-2024

1-5 июля 2024, Москва



О методе регистрации отраженного черенковского света

В 1972 году А.Е. Чудаков предложил установить на самолете два фотоумножителя и два электронно-оптических преобразователя с одинаковыми полями обзора 45 градусов. Все четыре аппарата должны были наблюдать заснеженную поверхность Земли с высоты около 10 км.



Целью настоящей заметки является обратить внимание на возможность прямого измерения полного потока черенковского света, создаваемого ливнем. Для этого надо светоприёмник расположить на большой высоте, чтобы регистрировать свет, отраженный от поверхности, на которую падает ливень. Идеальные условия в смысле отражения черенковского света ливня от поверхности земли можно ожидать в заснеженной тундре в северных районах СССР.

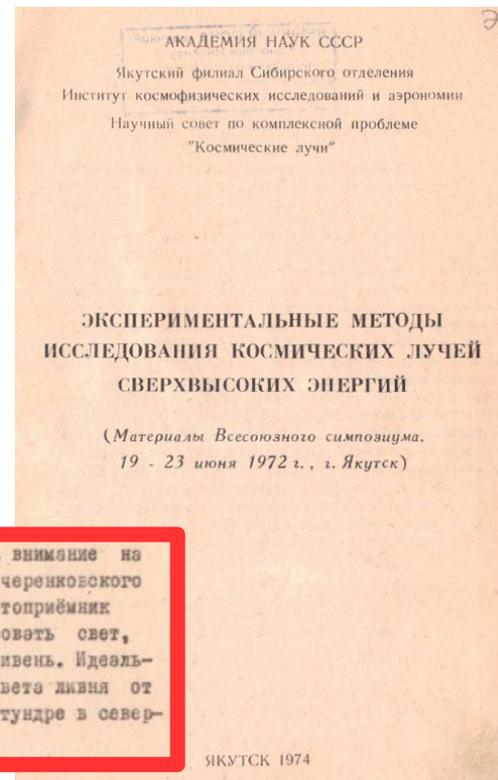
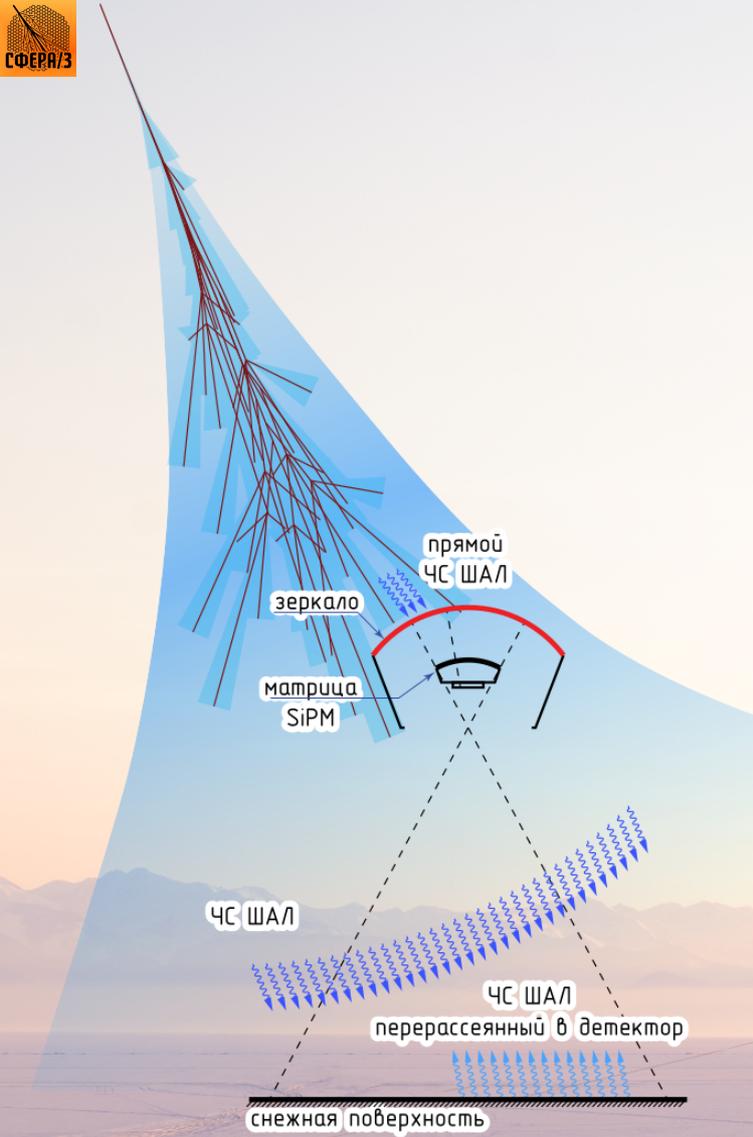


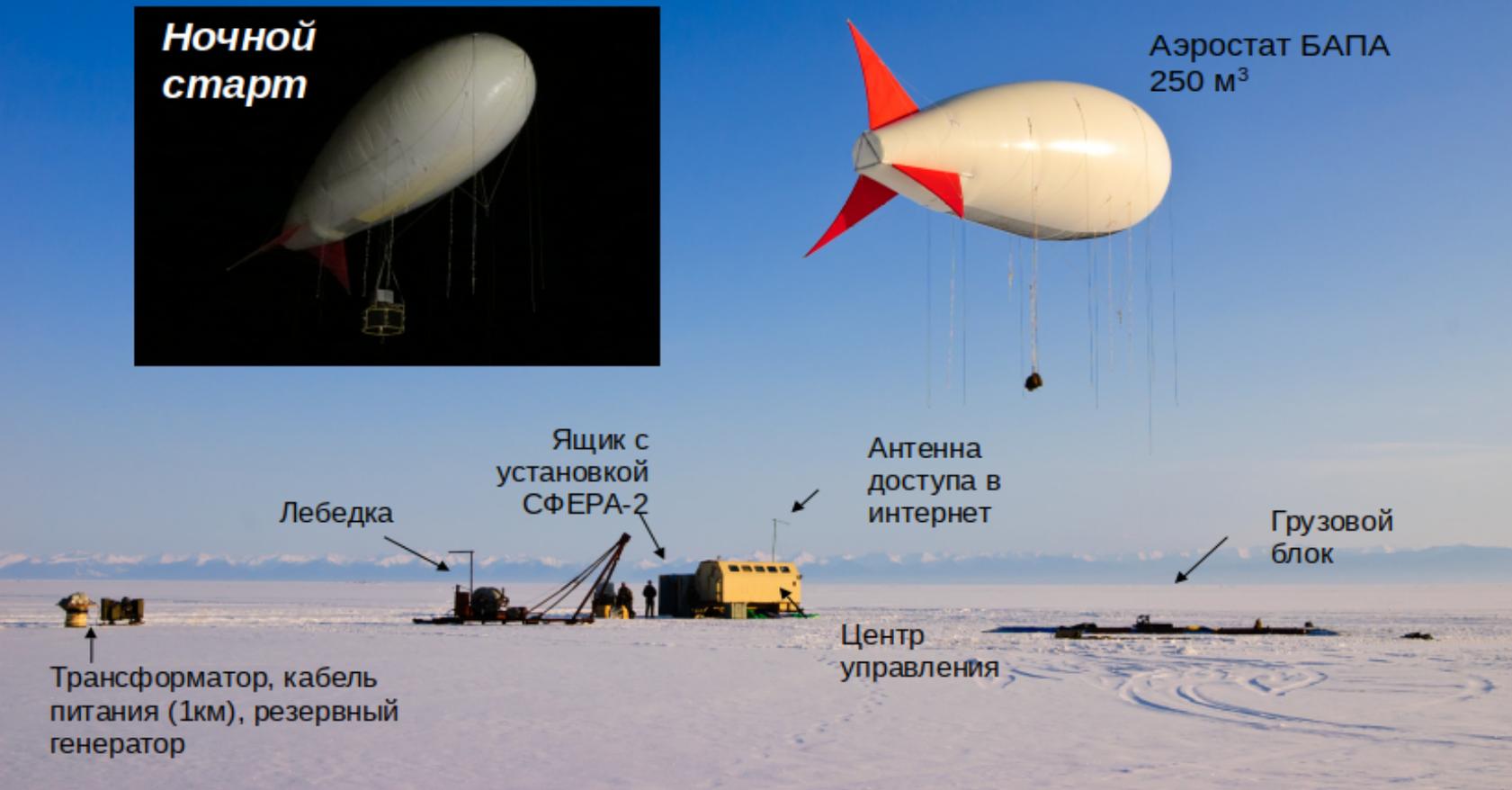
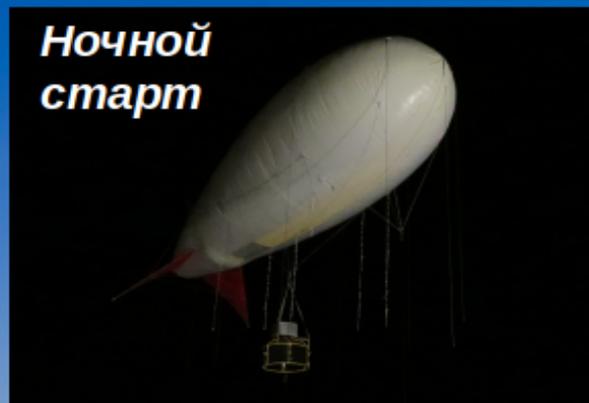
Схема эксперимента проекта СФЕРА



Установка поднимается над заснеженной поверхностью земли и регистрирует отраженный черенковский свет ШАЛ. Измеряемый сигнал пропорционален полному потоку черенковского света ШАЛ и энергии первичной космической частицы.

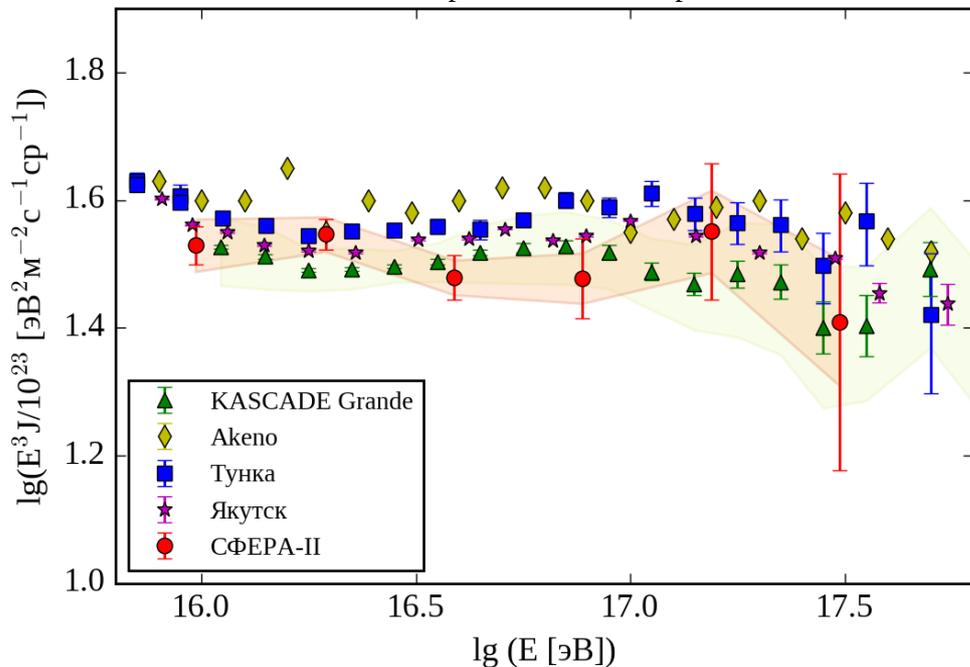
Имеется возможность регистрировать прямой поток черенковского света если установить на зеркале широкоугольный объектив или кодирующую маску со светосилой порядка 100 см^2 .

Проект основан на опыте эксплуатации аэростатной установки СФЕРА-2

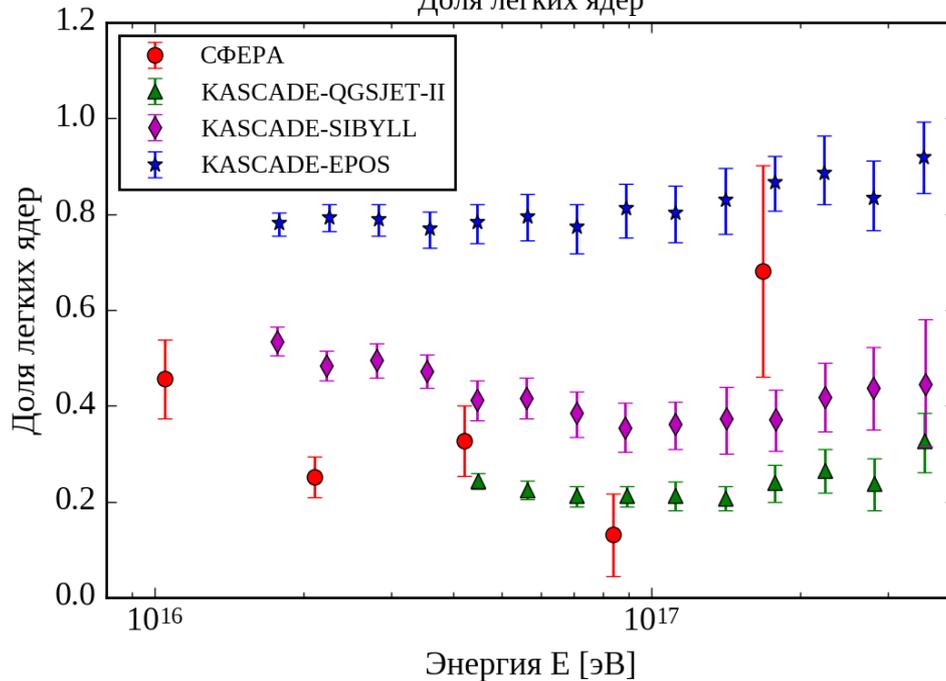


Эксперимент с установкой СФЕРА-2 проводился в период **2008-2013** гг. силами **НИИЯФ МГУ** и **ФИАН** при поддержке **ИЯИ РАН** недалеко от нейтринного телескопа **NT-200**

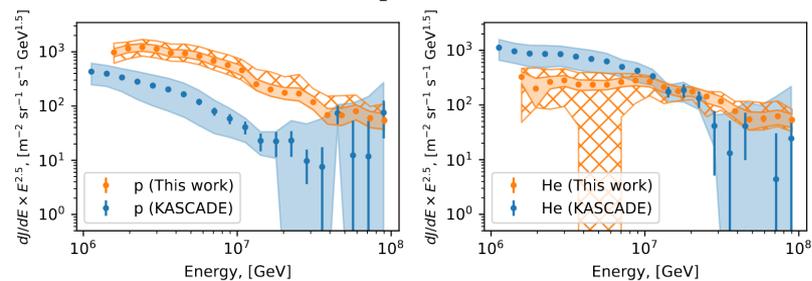
Энергетический спектр



Доля легких ядер



Energy spectra of elemental groups of cosmic rays with the KASCADE experiment data and machine learning, arXiv:2312.08279v2

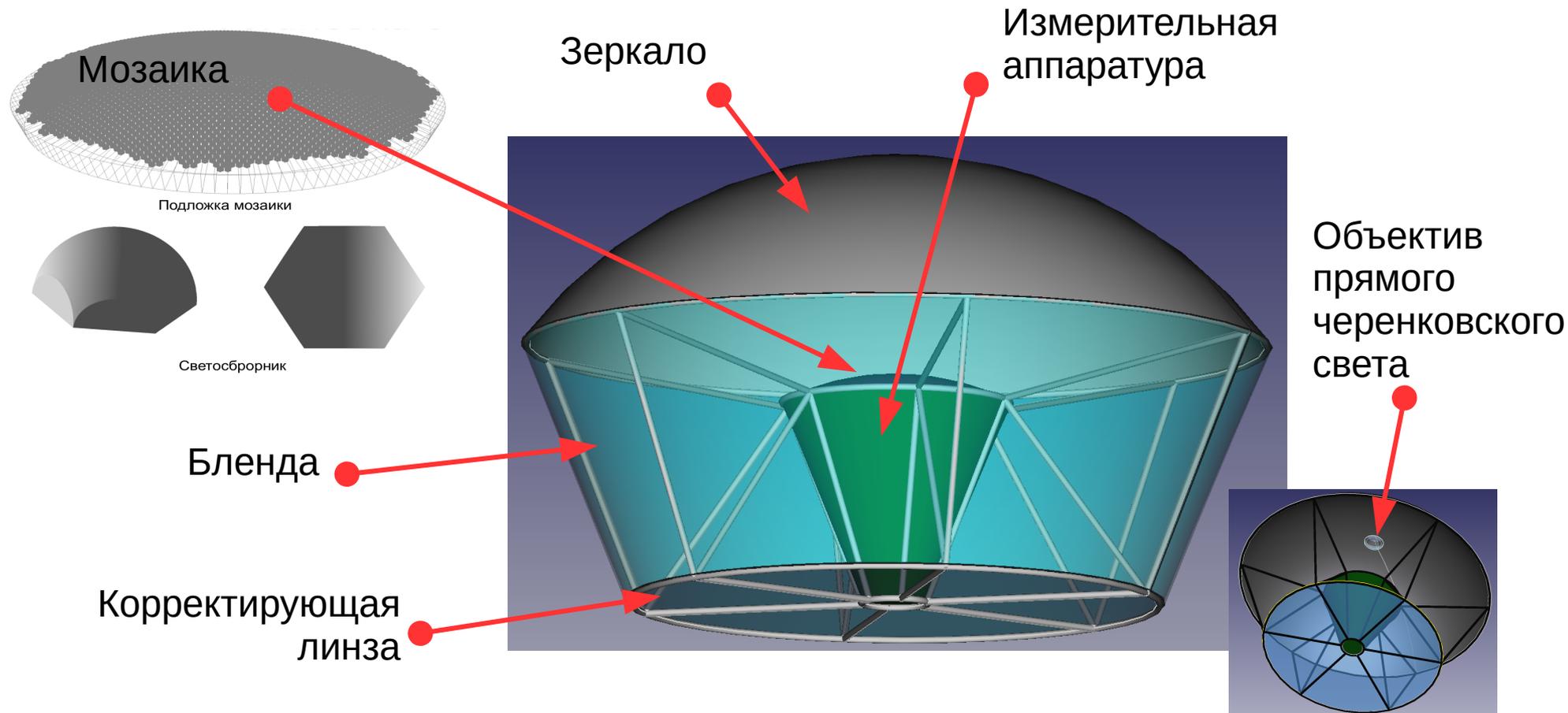


Характеристики проектируемых установок

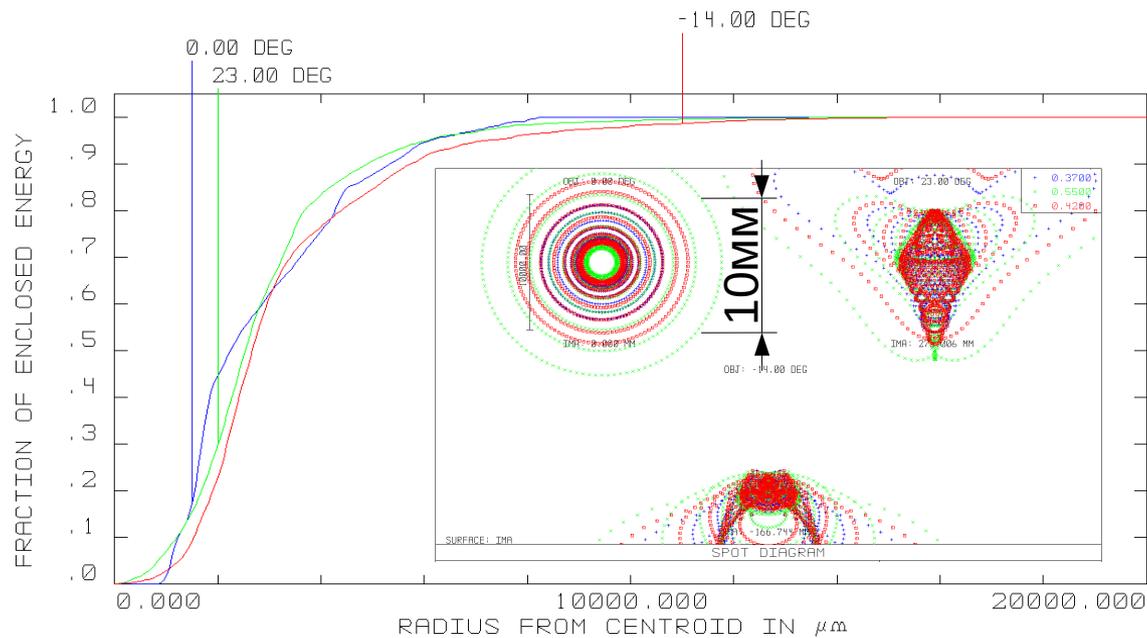
Параметр	СФЕРА-2 	Прототип	СФЕРА-3 
Эффективная чувствительная площадь оптики (входное окно диафрагмы), м ²	0,5	0,16*	1,13*
Диаметр зеркала, мм	1500	800*	2200*
Угол обзора оптической системы, градус	±25	±23*	±23*
Количество элементов мозаики	109	300*	2-3 тыс.*
Масса детектора, кг	90	15*	100*
Высота подъема детектора, м	до 900 (аэростат)	до 500 (БПЛА)	до 2000 (БПЛА)

* - уточняется

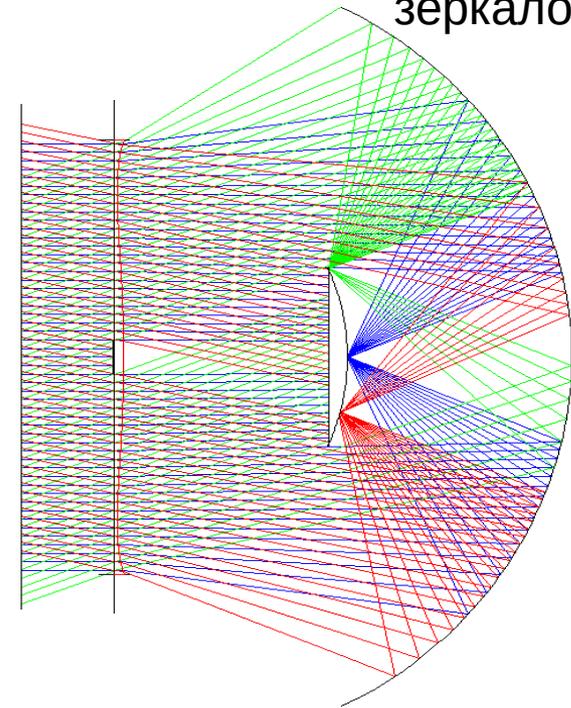
Конструкция установки СФЕРА-3



Предварительный вариант оптической системы детектора СФЕРА-3

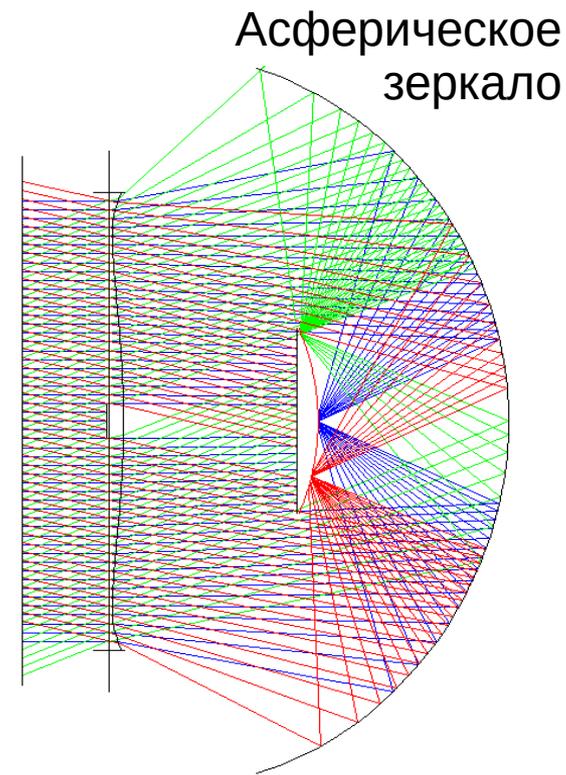
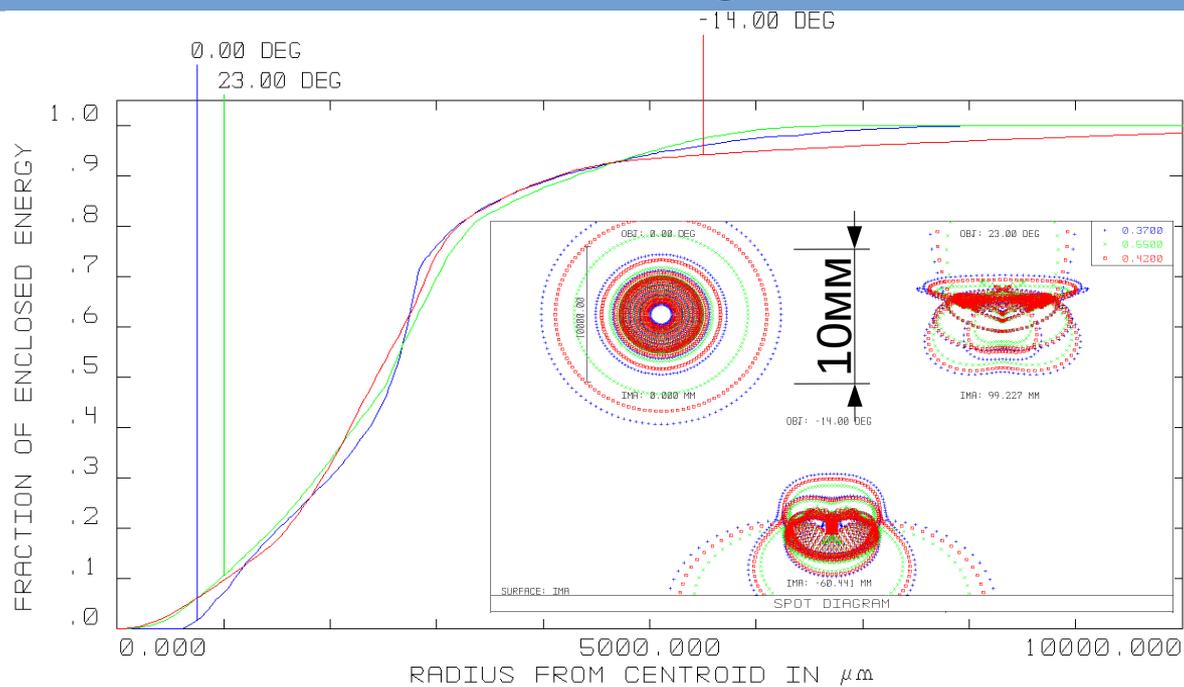


Асферическое
зеркало



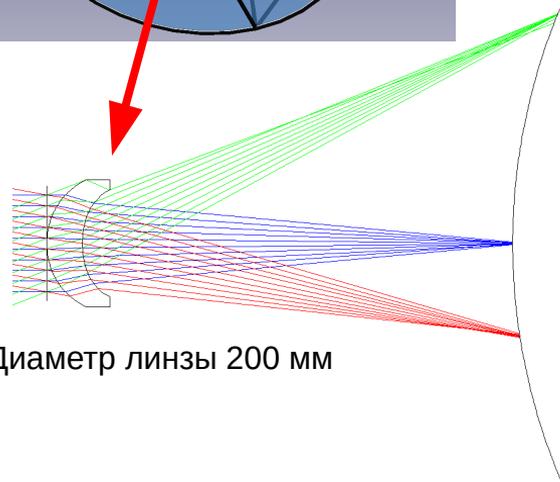
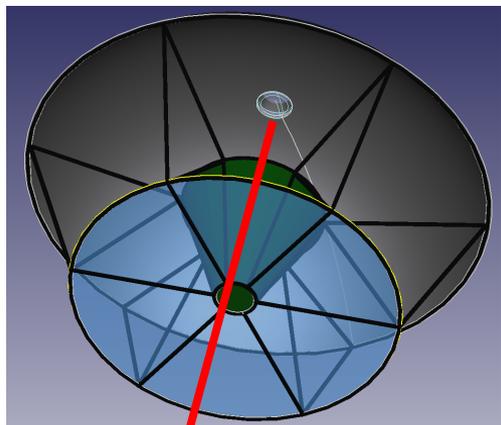
Оптимизация формы пятна Диаметр зеркала 2160 мм
 Диаметр мозаики 550 мм Диаметр диафрагмы 1320 мм
 $S_{\text{эф}} \sim 1.13 \text{ м}^2$

Предварительный вариант оптической системы установки Прототипа

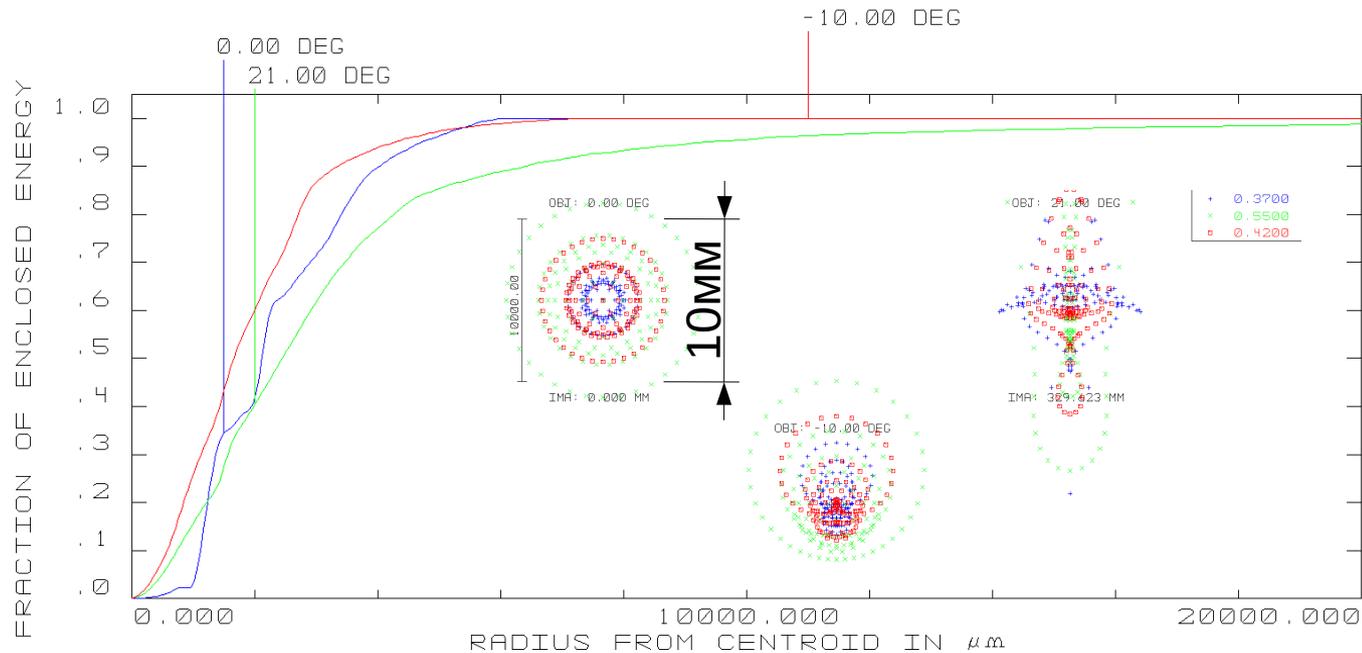


Оптимизация формы пятна Диаметр зеркала 800 мм
 Диаметр мозаики 210 мм Диаметр диафрагмы 500 мм
 $S_{\text{эф}} \sim 0.16\text{м}^2$

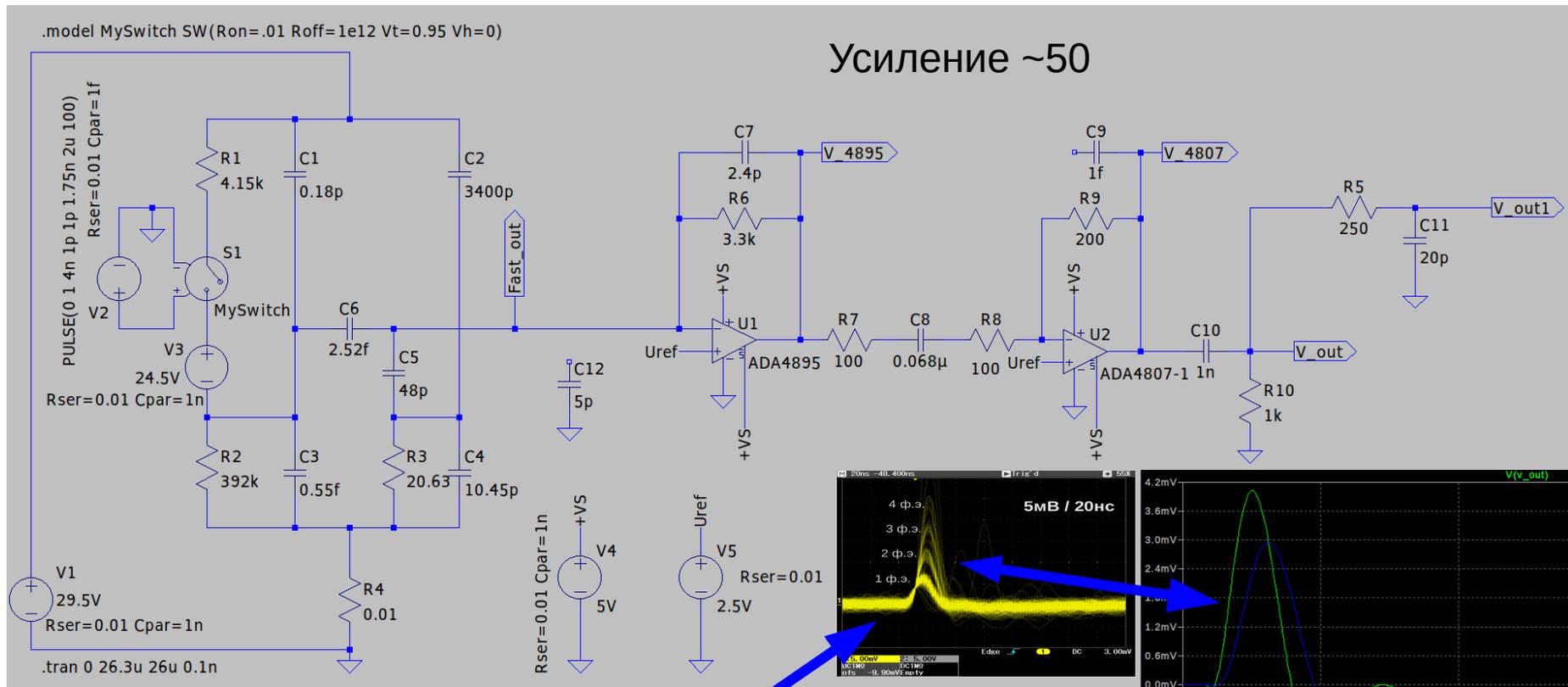
Один из способов зарегистрировать прямой черенковский свет



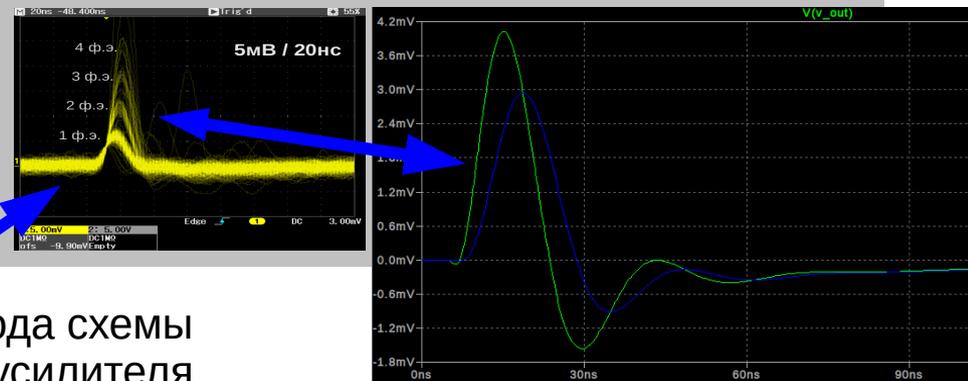
Диаметр линзы 200 мм



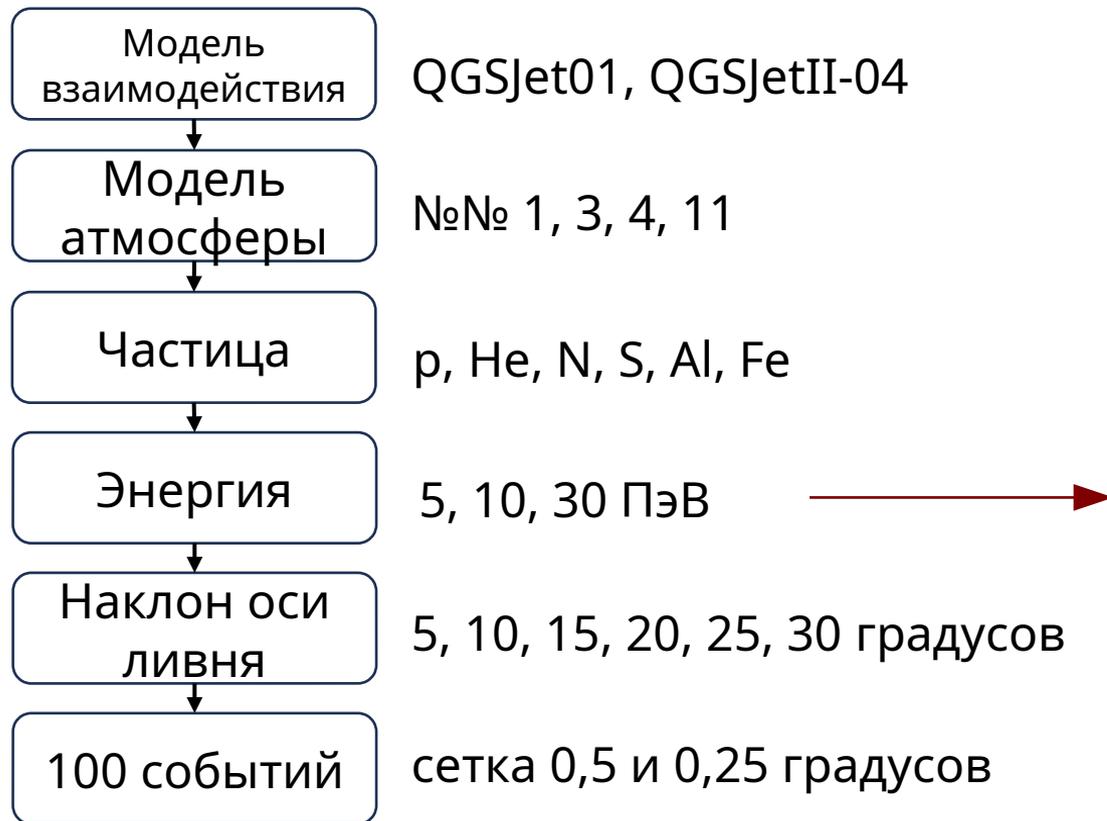
Модель схемы SiPM и предусилителя



Сигналы с выхода схемы
реального предусилителя



Генерация событий на СК Ломоносов-2



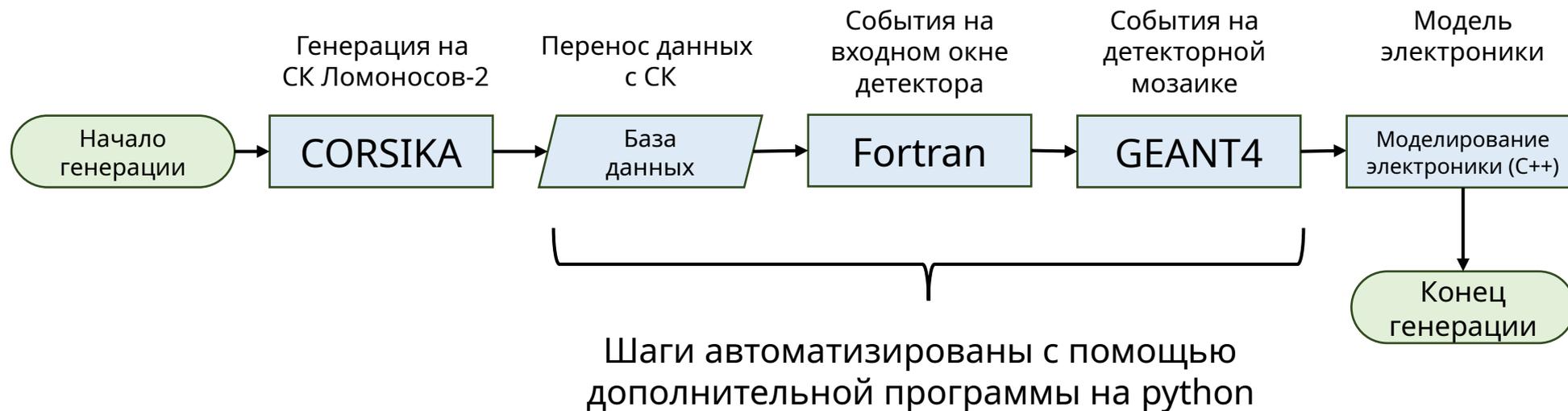
Общее количество полученных событий на текущий момент:

72 033

(Вес одного сжатого файла события ~450 Мб)

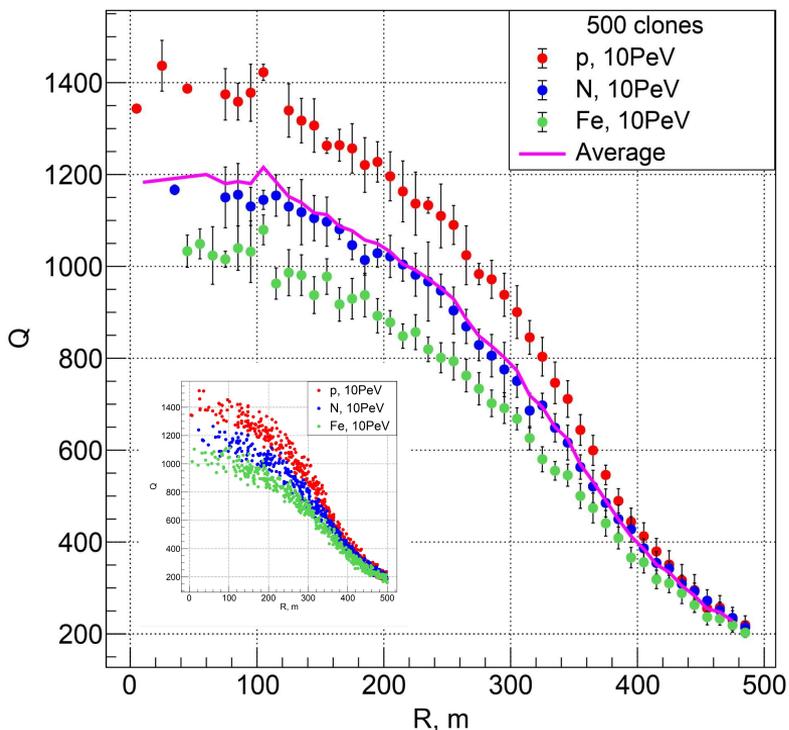
Для моделирования ливней >30 ПэВ на СК ведется работа по распараллеливанию вычислений CORSIKA при генерации черенковского света.

Конвейер моделирования откликов событий ШАЛ



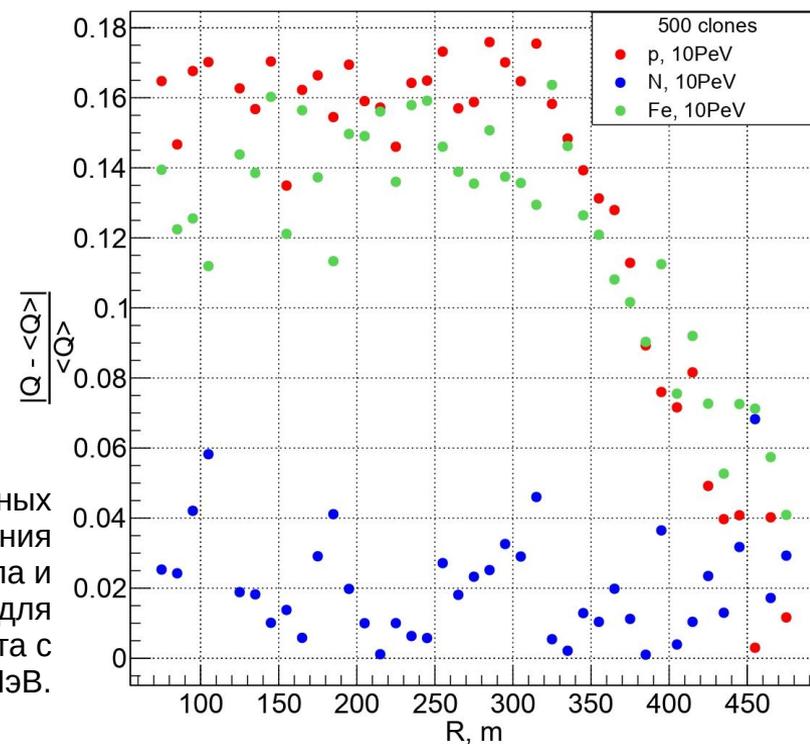
Оценка первичной энергии ШАЛ телескопом отраженного черенковского света установки СФЕРА-3

Стендовый доклад ID: 124, Т. Колодкин



Усреднённая по трём ядрам зависимость полного числа попавших на мозаику фотонов в событии в зависимости от расстояния между осью телескопа и точкой падения оси ливня для протона, железа и азота с энергией 10 ПэВ для угла падения оси ШАЛ 10 градусов и высоты установки 500м.

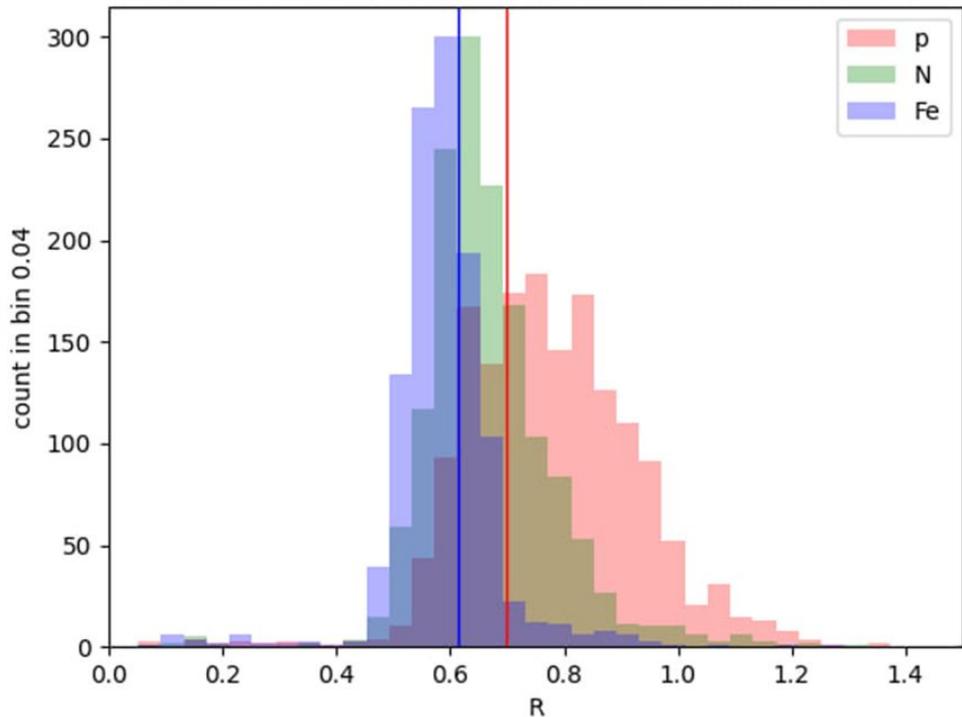
Зависимость относительных флуктуаций от расстояния между осью телескопа и точкой падения оси ливня для протона, железа и азота с энергией 10 ПэВ.



Возможности оценки массы первичного ядра по образу отраженного от снега черенковского света ШАЛ

Стендовый доклад ID: 134, В. Иванов

Распределение критериального параметра R_c по ядрам

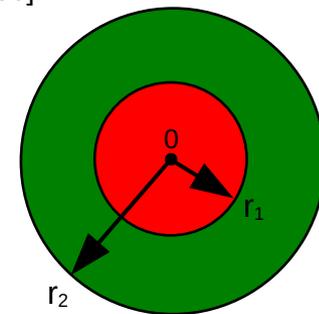


Для почти вертикальных событий с энергией первичного ядра 10 ПэВ был построен одномерный критерий, определяемый как отношение интеграла от аппроксимации поперечного распределения света на мозаике по области центрального круга радиуса r_1 к интегралу по кольцу с внутренним радиусом r_1 [мм] и внешним радиусом r_2 [мм]:

$$cri = \frac{\int_0^{r_1} I dr}{\int_{r_1}^{r_2} I dr}$$

Подбор радиусов производился в пределах $r_1 \in [80, 200]$ и $r_2 \in [100, 300]$

Класс	p-N	N-Fe
граница/ошибки	0.70 / 0.31	0.61 / 0.32



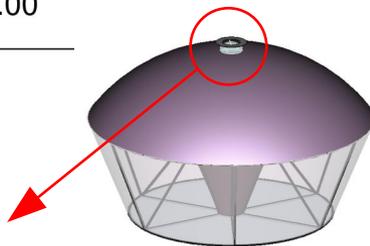
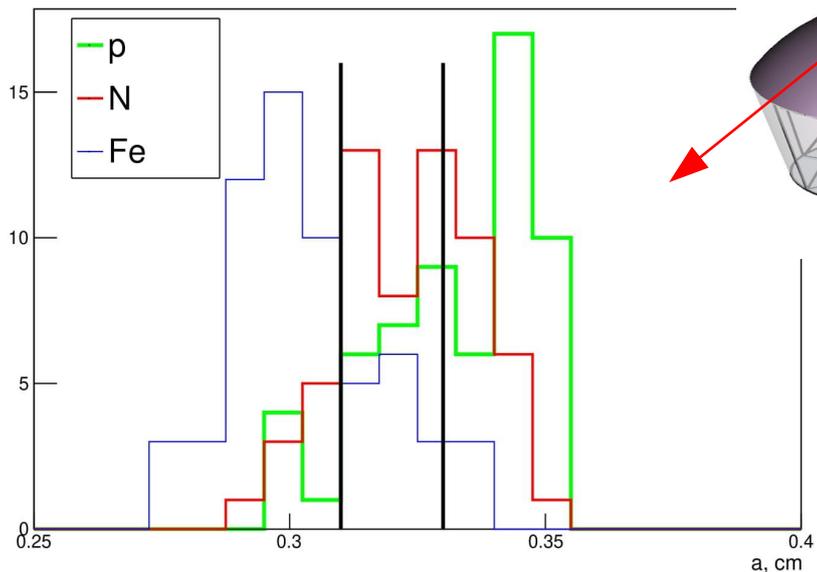
Световое пятно от ШАЛ

Гистограмма распределения критериального параметра для $E = 10$ ПэВ, наклона 10 градусов, модели атмосферы 1 из списка CORSIKA и высоты наблюдения 1000 м детектора СФЕРА-3.

Возможности оценки массы первичного ядра по угловому распределению прямого черенковского света ШАЛ компактным телескопом

Spot long dimension, 500m, abs thr 5.00

Стендовый доклад ID: 030, Н. Овчаренко



Угловые распределения света получены с помощью кода CORSIKA. Распределение задаётся на равномерной сетке 200×200 с ячейкой $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (fine) и 100×100 с ячейкой $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (superfine).

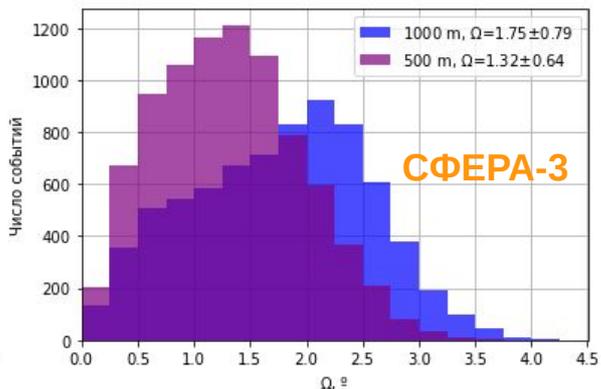
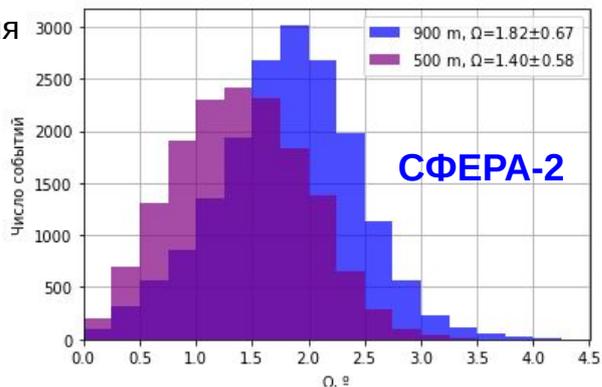
Распределение длин большой оси в зависимости от массы первичной частицы

Сравнение ошибок разделения первичных частиц по массе в зависимости от величины порога на разных сетках

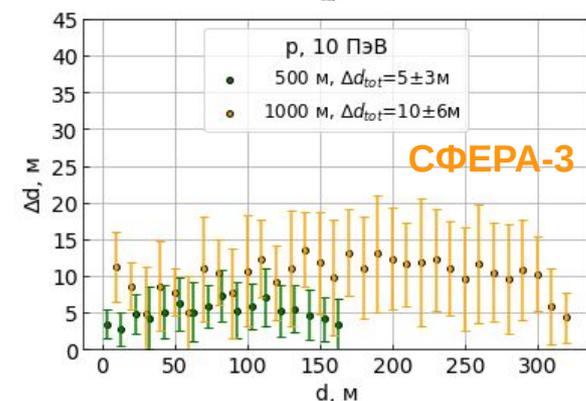
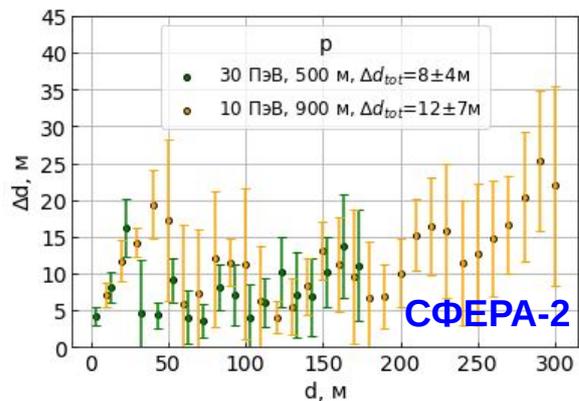
порог, фотоны	fine, ячейка 0.5°				superfine, ячейка 0.25°			
	Ошибки p-N		Ошибки N-Fe		Ошибки p-N		Ошибки N-Fe	
	p	N	N	Fe	p	N	N	Fe
5	0.29	0.29	0.38	0.38	0.32	0.32	0.24	0.24
7	0.27	0.28	0.38	0.38	0.33	0.32	0.25	0.24
8	0.32	0.32	0.39	0.39	0.31	0.32	0.26	0.25

Оценка направления прихода ШАЛ по характеристикам отраженного от снега черенковского света в эксперименте СФЕРА-2 и телескопе СФЕРА-3

Распределения ошибок определения направления

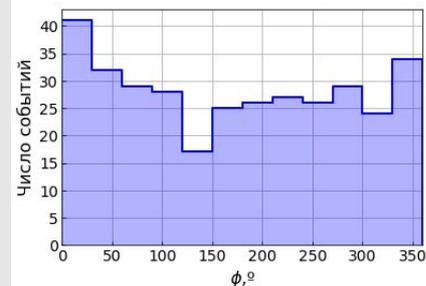
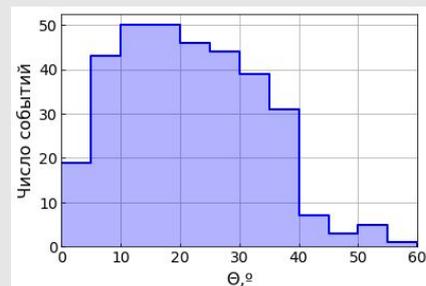


Ошибки определения оси ливня



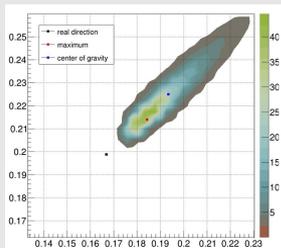
Стендовый доклад ID: 087, К. Азра

Разработанный алгоритм применен к экспериментальным данным, получены телескопом СФЕРА-2 в 2012 и 2013 гг.



Оценка направления прихода ШАЛ по прямому черенковскому свету в верхнем телескопе СФЕРА-3

I Отдельный телескоп над зеркалом

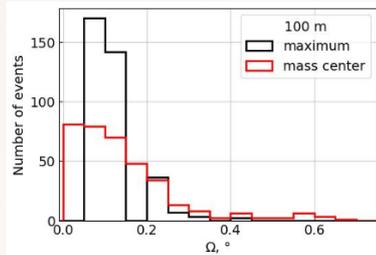
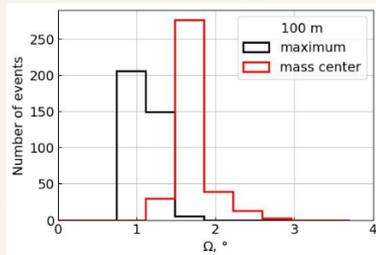


Ошибки определения направления по угловому распределению

R	до сдвига		после сдвига	
	по максимуму	по центру тяжести	по максимуму	по центру тяжести
100 м	1.28	2.28	0.10	0.22
140 м	1.46	2.78	0.20	0.32

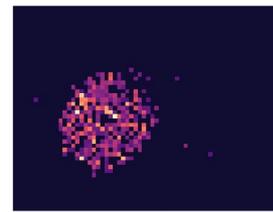
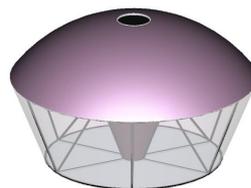
Ошибки определения направления по образам

R	до сдвига		после сдвига	
	по максимуму	по центру тяжести	по максимуму	по центру тяжести
100 м	1.2	1.7	0.12	0.16
140 м	1.4	2.0	0.14	0.19

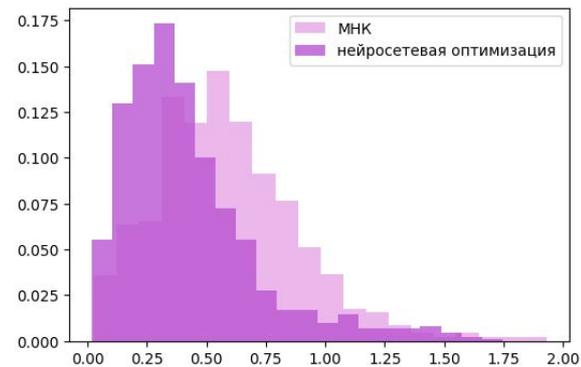


Распределение задаётся на сетке 200×200 с ячейкой $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. В качестве ключевой точки можно использовать максимум или центр тяжести распределения.

II Отверстие в зеркале



Стендовый доклад ID: 031, О. Черкесова



Ошибки восстановления направления для отверстия в зеркале, [градус]

Точность восстановления направления прихода света с помощью линейной регрессии составила $0.6^\circ \pm 0.3^\circ$ (при коэффициенте детерминации $R^2 = 0.97$). Использование полносвязной нейронной сети позволило улучшить точность восстановления направления до $0.42^\circ \pm 0.25^\circ$

Заключение

- Разработан предварительный вариант конструкции детектора и оптической системы для детектора установки СФЕРА-3 и её прототипа.
- Созданы математические модели детектора СФЕРА-3 и элементов фотоприёмника на основе кремниевых ФЭУ с преусилителями.
- С помощью пакета CORSIKA сгенерирована большая часть банка событий ШАЛ для поиска оптимальных критериев разделения типов первичной частицы.
- Получены предварительные результаты точности восстановления энергии ПКЛ, разделения по массам, положения и наклона оси ШАЛ.
- Проводится исследование эффективности регистрации прямого черенковского света для увеличения чувствительности к типу первичной частицы.

Благодарности



Российский
научный фонд

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 23-72-00006. rscf.ru/project/23-72-00006/ с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.



Спасибо за внимание!

