

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ КОСМОСА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**«ОПТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЛЕСКОПА СФЕРА-3 И ОЦЕНКА ЕЁ
СПОСОБНОСТИ РАЗЛИЧАТЬ МАССЫ ПЕРВИЧНЫХ ЯДЕР»**

Выполнил студент

414 группы

Иванов Владимир Александрович

Научный руководитель:

Профессор, д.ф.-м.н. Галкин Владимир Игоревич

Допущена к защите

Зав. кафедрой _____ С.И. Свертилов

Москва

2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. Изучение широких атмосферных ливней	5
1.1 Развитие ШАЛ.....	5
1.2 Методы изучения КЛ по характеристикам ШАЛ.....	7
1.2.1 Методы, основанные на заряженных частицах ШАЛ	7
1.2.2 Методы, основанные на излучениях ШАЛ.....	8
1.3 Детекторы ШАЛ.....	9
1.3.1 Проект KASCADE	9
1.3.2 Проект TAIGA.....	11
1.4 Серия экспериментов СФЕРА	13
1.4.1 Идея метода	14
1.4.2 Прототип установки СФЕРА.....	15
1.4.3 Установка СФЕРА-1	15
1.4.4 Установка СФЕРА-2.....	17
1.4.5 Установка СФЕРА-3.....	20
2. Задачи	22
2.1 Моделирование детектора СФЕРА-3 в GEANT4	22
2.1.1 Геометрическая модель детектора.....	23
2.1.2 Моделирование треков фотонов	26
2.2 Оценка способности различать массы первичных ядер	28
2.3 Моделирование электроники SiPM.....	30
ВЫВОДЫ.....	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	36
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	37

ВВЕДЕНИЕ

Задача регистрации первичного космического излучения (ПКИ) активно решается на протяжении многих десятилетий. Для первичных частиц с энергиями меньше 10^{15} эВ используются прямые методы регистрации с помощью детекторов, поднимаемых в стратосферу или в космическое пространство. В области энергий выше «колена» ($\geq 3 \cdot 10^{15}$ эВ) регистрация частиц происходит с помощью косвенных методов, так как интенсивность крайне мала, порядка 1 частицы на м^2 в год на ср.

Измерять энергию подобных частиц с помощью калориметра нецелесообразно, так как для таких энергий необходима установка гигантских размеров. Параметры первичной частицы, например энергетический спектр и массовый состав можно восстановить, исследуя характеристики широких атмосферных ливней (ШАЛ). Например, адронную, мюонную, электронно-фотонную компоненты ШАЛ, флуоресцентное излучение, радиоизлучение, акустические эффекты, излучение Вавилова-Черенкова и др. В экспериментах проекта СФЕРА изучение характеристик ШАЛ происходит с помощью регистрации черенковского света (ЧС).

Регистрация ЧС производится как наземными, так и воздушными установками. Яркими представителями установок наземного базирования являются эксперименты проектов KASCADE и TAIGA, тогда как СФЕРА представляет собой установка воздушного базирования. В настоящее время в разработке находится новый детектор проекта СФЕРА – СФЕРА-3. Одним из отличий нового детектора является переход на кремниевые фотоумножители (SiPM).

Главной задачей данной работы является компьютерное моделирование новой конфигурации телескопа для последующего моделирования отклика на события ШАЛ и фоновую засветку. Для правильного расчёта отклика детектора на ШАЛ в терминах токов SiPM необходим расчетный отклик SiPM на отдельные фотоны, таким образом возникает задача моделирования отклика

SiPM. Глобальной же целью работы является поиск оптимальной конфигурации детектора СФЕРА-3.

Изучение широких атмосферных ливней

1.1 Развитие ШАЛ

Из теоретических соображений и экспериментальных данных стало ясно, каким образом космические лучи проходят сквозь атмосферу

На высотах в несколько десятков километров первичные частицы испытывают ядерное (сильное) взаимодействие с ядрами атомов воздуха. В результате этих столкновений образуется множество вторичных частиц, одна из которых обладает значительной долей первичной энергии и привносит её глубже в атмосферу. Такая частица способна ещё несколько раз провзаимодействовать на своём пути. В подобных взаимодействиях рождаются различные частицы: каоны - $K^{\pm,0}$, пионы - $\pi^{\pm,0}$, гипероны, нуклон-антинуклонные пары. Но до поверхности земли в основном доходят продукты их взаимодействия со средой, а также их распадов.

Состав вторичной компоненты зависит от физических процессов взаимодействия первичной частицы с ядрами атмосферы. Совокупность взаимодействий первичной частицы и рождаемых ею вторичных частиц называется каскадным процессом. Схема развития ШАЛ представлена на рис. 1. От пионов (π^{\pm}) и каонов (K^{\pm}) образуется мюонная компонента каскада.

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu} & \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_{\mu} \\ K^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu} & K^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_{\mu}\end{aligned}$$

Образуются также пары протон-антипротон, нейтрон-антинейтрон и нестабильные частицы: K -мезоны и гипероны. Они составляют адронную часть каскада. Их роль в развитии ливней невелика по сравнению с пи-мезонами. На уровне моря они составляют лишь 1 % от остальных компонент.

От пионов (π^0) и мюонов (μ^{\pm}) развивается в электромагнитный каскад.

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_{\mu} \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu}$$

зрения наиболее многочисленных заряженных частиц – электронов и позитронов – его можно представить как один большой электронно-фотонный каскад с подпиткой от адронной и мюонной компонент.

Адронная компонента в процессе взаимодействий слабо отклоняется от направления движения первичной частицы и концентрируется в области оси ливня (порядка нескольких метров), электронная компонента в области сотни метров и мюонная в области нескольких сотен метров. Частицы, движущиеся на удалении от оси ливня, отстают от частиц, расположенных вблизи оси. Таким образом, информация о временном распределении частиц в диске может использоваться для определения оси ливня.

1.2 Методы изучения КЛ по характеристикам ШАЛ

1.2.1 Методы, основанные на заряженных частицах ШАЛ

Характеристики вторичных частиц и излучений ШАЛ зависят от его первичных параметров – энергии, направления и типа/массы первичной частицы. Для оценки энергии подходят абсолютные размеры компонент – полные числа электронов и позитронов или мюонов на уровне наблюдения. Для исследования ядерного состава ПКЛ может быть использована форма функции пространственного распределения (ФПР) электронов ливня [1].

Максимальное число электронов находится в максимуме ливня, при приближении к Земле их количество уменьшается, причем градиент уменьшения зависит от профиля атмосферы. Детекторы ставят на поверхности Земли, поэтому форма ФПР электронов ливня, как правило, может быть определена со значительной погрешностью, что снижает чувствительность этой величины к ядерному составу ПКЛ. Поэтому для исследования ядерного состава ПКЛ обычно используется комбинация двух величин – измеренного количества электронов N_e и мюонов N_μ в ливне [2]. Тем не менее, этот метод является

одним из наиболее часто применяемых для получения информации о массовом числе первичной частицы.

Количество мюонов N_μ в ливне невелико по сравнению с N_e , поэтому величина N_μ трудна для точного измерения. Кроме того, расчетная величина N_μ особенно сильно зависит от модели ядро-ядерного взаимодействия при сверхвысоких энергиях [3], что серьезно затрудняет исследование ядерного состава ПКЛ указанным методом. В свою очередь, величина N_e , которая часто используется как мера энергии первичной частицы, также зависит от состава ПКЛ, что приводит к появлению систематической погрешности при измерении первичной массы.

1.2.2 Методы, основанные на излучениях ШАЛ

ФПР ЧС ШАЛ несет информацию о форме каскадной кривой. Используя расчетные ФПР, возможно оценить полный поток ЧС ШАЛ и энергию первичной частицы, поскольку полный поток ЧС ШАЛ приблизительно пропорционален энергии первичной частицы. Однако непосредственно измерить полный поток ЧС наземными установками нельзя: измеряется только плотность потока черенковских фотонов в детекторах установки, как правило, удаленных друг от друга на довольно большие расстояния (десятки или сотни метров).

Форма ФПР ЧС ШАЛ может быть восстановлена с меньшей погрешностью, чем форма ФПР электронов ливня, что делает черенковский метод предпочтительным для исследования состава ПКЛ.

Поскольку характер развития каскадных процессов случаен, существуют флуктуации, а также различные систематически неопределенности, возникающие при регистрации ШАЛ (например, неопределенности модели ядерного взаимодействия и модели атмосферы).

Разделение первичных частиц по массам проводится, основываясь на форме поперечного распределения ЧС ШАЛ. Традиционные способы детектирования ЧС на земной поверхности с помощью сетей широко разнесенных

детекторов предполагают получение информации не более чем с 1% площади пятна ЧС. Детектирование же отраженного от снега ЧС позволяет обзирать 30 – 50% площади пятна. Именно этот метод использован в экспериментах СФЕРА [4].

1.3 Детекторы ШАЛ

1.3.1 Проект KASCADE

Важнейшим проектом по изучению ШАЛ является проект KASCADE. Первым экспериментом проекта стал массив детекторов KASCADE, запущенный в 1996 г. Он состоит из 252 сцинтилляционных детекторных станций. Детекторная система организована в виде 16 кластеров, центры которых отстоят друг друга на 13 м, кластеры имеют компоновку 4×4 станции. Охватываемая массивом площадь равна $200 \times 200 \text{ м}^2$ [5].

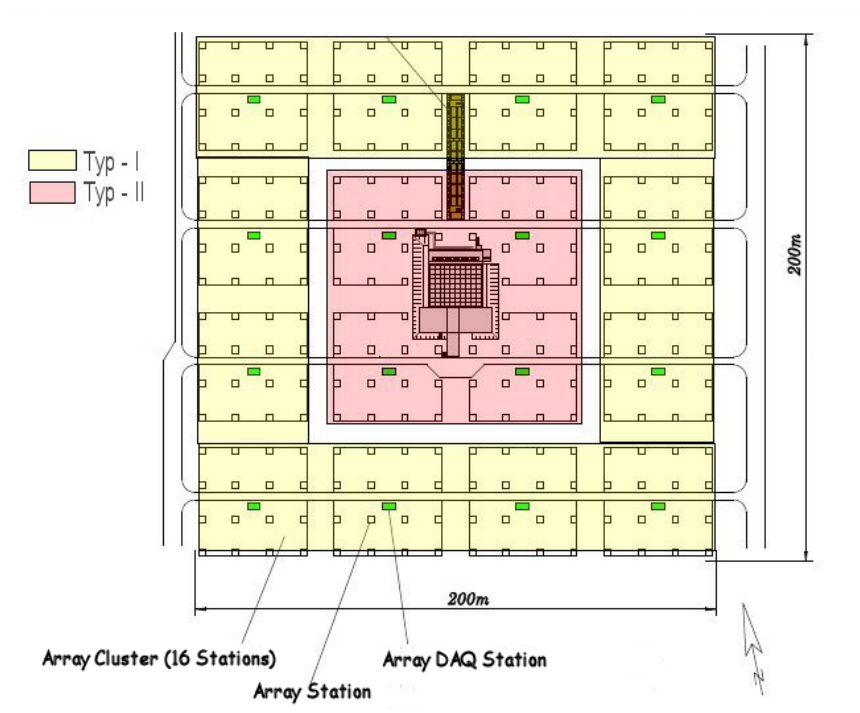


Рисунок 2 – Схематичное представление массива KASCADE.

На рис. 2 видно, что в массиве используются детекторы двух видов – Внутренние кластеры (Тип 2) содержат неэкранированные сцинтилляционные детекторы для регистрации электронно-фотонной составляющей. Внешние кластеры (Тип 1) помимо сцинтилляционного детектора имеют поглощающие железные и свинцовые поглощающие листы между слоями сцинтиллятора для измерения только мюонной компоненты. Таким образом детектор мог измерять мюонную и электромагнитную компоненты одновременно и независимо.

Детекторная система KASCADE использовалась для изучения ШАЛ, образованных от первичной частицы с энергией в диапазоне $10^{14} - 10^{17}$ эВ. Для расширения допустимого диапазона энергий, было произведено расширение детекторной системы, которое получило название KASCADE-Grande.

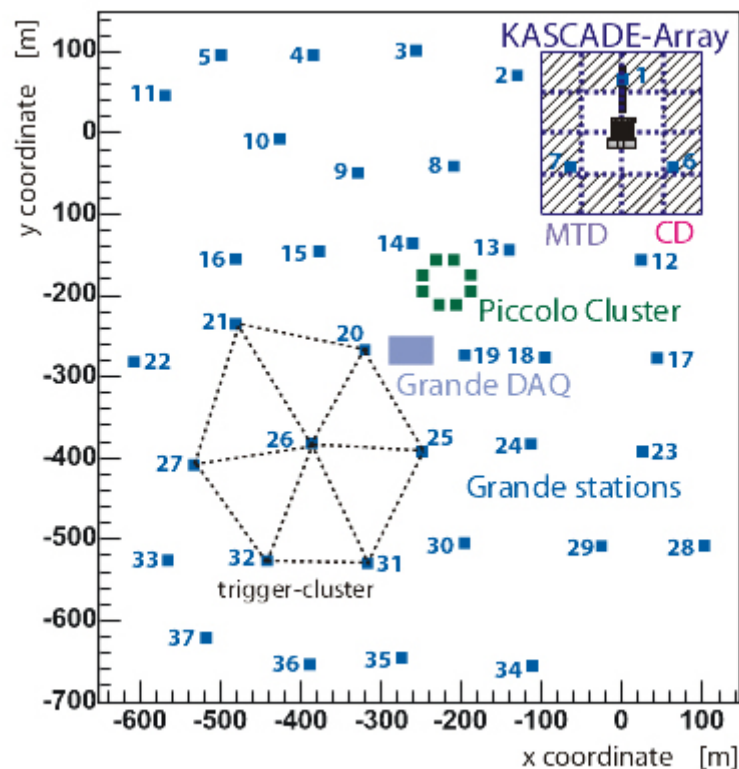


Рисунок 3 – Схема эксперимента KASCADE-Grande.

Массив Grande позволил получать информацию о событиях с энергией первичной частицы в диапазоне $10^{14} - 10^{18}$ эВ. Это было достигнуто путем

увеличения площади, охватываемой сеткой детекторов KASCADE, с $200 \times 200 \text{ м}^2$ до $700 \times 700 \text{ м}^2$ с помощью 37 сцинтилляционных детекторных станций с активной площадью 10 м^2 [6].

Массив Grande состоит из 37 детекторных станций, установленных над нерегулярной треугольной сеткой со средним расстоянием 137 м, таким образом, покрывая площадь около $0,5 \text{ м}^2$. Каждая детекторная станция включает в себя в общей сложности 10 м^2 пластиковых сцинтилляторов, разделенных на 16 отдельных модулей, каждый из которых просматривается снизу Фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) для измерения времени прихода и плотности частиц (ФЭУ с высоким коэффициентом усиления), центральные модули также оборудованы дополнительными ФЭУ с более низким значением напряжения (ФЭУ с низким коэффициентом усиления).

1.3.2 Проект TAIGA

Тункинский эксперимент занимается измерением параметров ШАЛ, образованных первичной частицей с энергией в диапазоне $10^{14} - 10^{18} \text{ эВ}$ [7], который соответствует диапазону энергий эксперимента KASCADE-Grande. Схема установок проекта TAIGA представлена ниже.

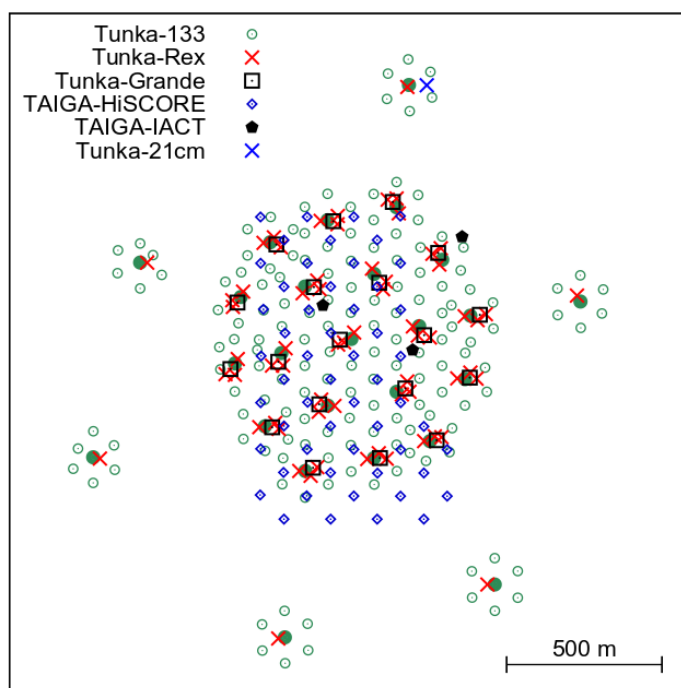


Рисунок 4 – Расположение установок проекта TAIGA.

Tunka-133 – первая установка эксперимента TAIGA. Она состоит из 133 основных ФЭУ, расположенных на площади 1 км^2 и 42 дополнительных, находящихся на расстоянии 1 км от центра установки. ФЭУ измеряют ЧС от ШАЛ во время ясных и безлунных ночей. Установкой был промерен энергетический спектр КЛ в диапазоне от 10^{16} эВ до 10^{18} эВ [8].

Tunka-Rex – вторая установка эксперимента TAIGA. Она состоит из 63 антенн, расположение которых соответствует кластерной системе установки Tunka-133. Антенны используются для регистрации радиоизлучения от ШАЛ, генерируемого в процессе развития каскада.

Tunka-Grande – третья установка эксперимента TAIGA. Она состоит из 380 сцинтилляционных счетчиков с площадью $0,64 \text{ м}^2$ каждый. Счётчики размещены в 19 станциях. Станции имеют наземную, в которой расположены по 12 счетчиков, и подземную части, в которой расположено 8 счётчиков. Общая площадь установки составляет около $0,8 \text{ км}^2$. Эти станции регистрируют мюонную и электромагнитную компоненты ШАЛ на уровне земли.

TAIGA-HiSCORE – четвертая установка эксперимента TAIGA. Она использует принцип, аналогичный установке Tunka-133. В отличие от своего предшественника Tunka-HiSCORE использует более чувствительные модули с более низким порогом регистрации. Насчитывает около 120 станций, находящихся на расстоянии 150 – 200 м друг от друга, покрывая площадь порядка $\sim 1 \text{ км}^2$.

TAIGA-IACT – пятая установка эксперимента TAIGA. Она будет состоять из 16 телескопов ЧС, которые имеют отражательную поверхность занимающую площадь в 10 м^2 и оборудованы камерой из 560 фотоумножителей. Пиксель имеет обзор порядка $0,36^\circ$. Телескоп обзореваает порядка $8^\circ \times 8^\circ$. Установки расположены в среднем на расстоянии 300 – 600 метров.

1.4 Серия экспериментов СФЕРА

В случае оценки параметров первичной частицы по излучению Вавилова-Черенкова, также называемого черенковским светом ШАЛ (ЧС ШАЛ), калориметром служит вся толщина атмосферы. От частицы на высоте 20 км образуется 10 фотонов на м, а на высоте 1 км – 20 фотонов на м. Но в силу колоссального количества частиц в каскаде, суммарно интенсивность оказываются достаточно высокой.

Черенковский свет генерируется релятивистскими заряженными частицами, преимущественно электронами, идущими в окрестности оси ливня. Они излучают черенковские фотоны под достаточно малым ($< 1.5^\circ$) черенковским углом к направлению своего движения. Поэтому основная часть ЧС

концентрируется вблизи оси. В зависимости от первичной энергии пятно ЧС над фоном ночного неба может иметь диаметр 500 – 2000 м.

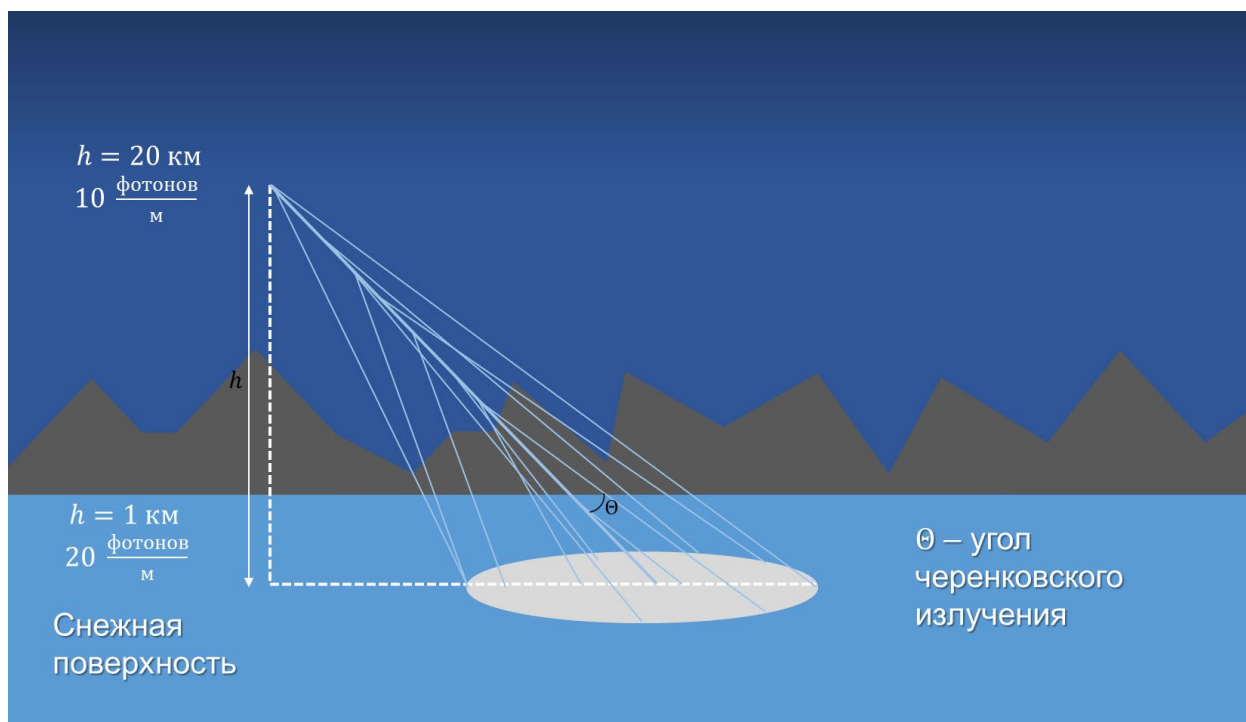


Рисунок 5 – Пятно ЧС ШАЛ.

1.4.1 Идея метода

Метод регистрации отраженного от снежной поверхности ЧС ШАЛ, генерируемых лучами сверхвысоких энергий, был впервые предложен А.Е. Чудаковым [9]. Предлагалось установить на борту самолета два фотоумножителя и два электронно-оптических преобразователя (ЭОП) с одинаковыми углами зрения $\pm 45^\circ$. Все четыре прибора должны были обозревать заснеженную поверхность Земли с высоты порядка 10 км. Одновременное срабатывание двух амплитудных дискриминатора ФЭУ полагалось триггерным условием срабатывания затворов фотоаппаратов, установленных на ЭОП. Последующая обработка изображений пятен излучения Вавилова-Черенкова от ШАЛ на снимках должна была дать информацию об энергии и направлении прихода первичной космической частицы.

1.4.2 Прототип установки СФЕРА

В начале 1990-х гг. в горах Тянь-Шаня были проведены первые измерения энергетического ПКЛ. Со склона горы установка обозревала заснеженную поверхность замерзшего Большого Алма-атинского озера.

В результате проведенных измерений с прототипом установки СФЕРА впервые в мире методом регистрации ЧС, отраженного от снежной поверхности Земли, был получен энергетический спектр ПКЛ (рис. 6). Сложная геометрия эксперимента привела к увеличению пороговой области зарегистрированного спектра.

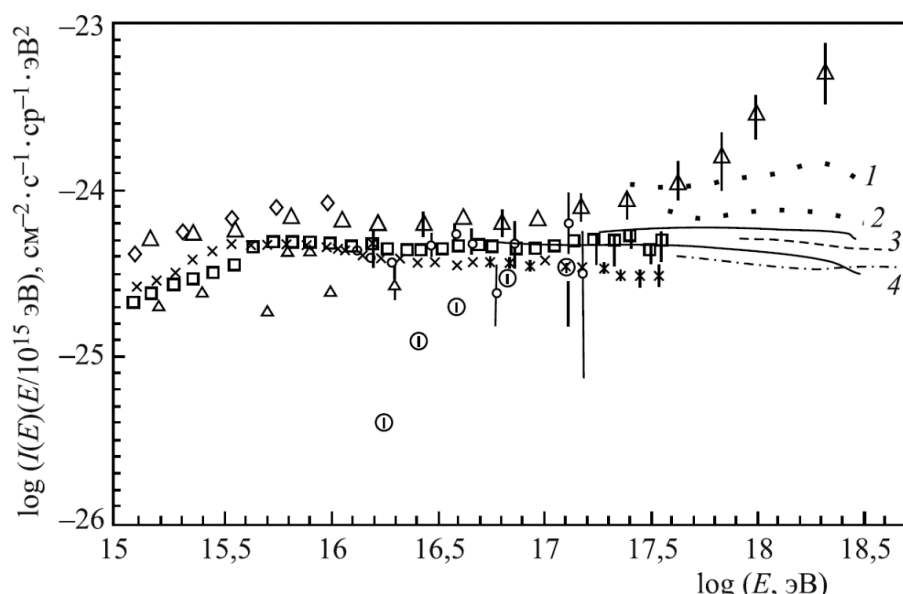


Рисунок 6 – Дифференциальный энергетический спектр по данным прототипа установки СФЕРА (1996 г.): × МГУ; ■ Акено; ◆ Тянь-Шань; Δ Самарканд; ○ Якутск; ⊙ Сфера.

1.4.3 Установка СФЕРА-1

В конце 1990-х гг. была создана аэростатная установка СФЕРА-1. Аппаратура поднималась на привязном аэростате на высоту до 1000 м.

На рис. 7 представлена оптическая часть установки, состоявшая из сферического зеркала диаметром 1,2 м, в фокальной поверхности которого размещена мозаика из 19 фотоумножителей (ФЭУ), и корректирующей диафрагмы диаметром 0,8 м. При высоте подъема 1 км каждый из ФЭУ осматривал

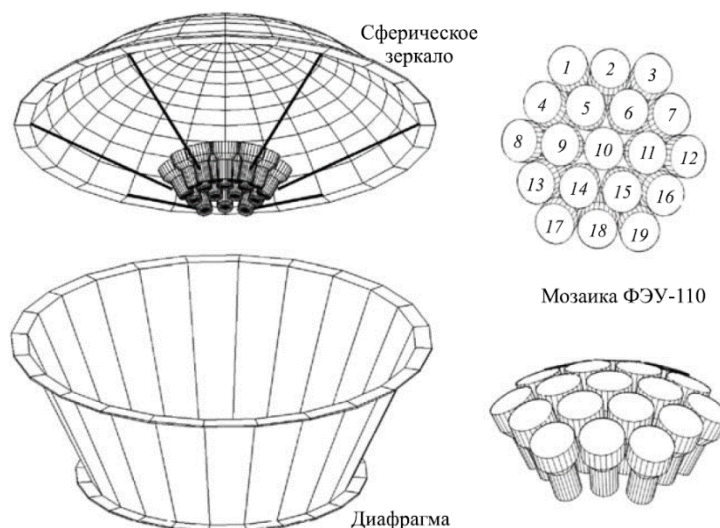


Рисунок 7 – Схема оптической системы установки СФЕРА-1.

площадь диаметром около 200 м. При выполнении триггерного условия регистрировался заряд анодных импульсов за интервал времени 2,0 мкс в каждом фотоумножителе, а также времена начала и окончания времени с дискретностью 30 нс. Управление работой электроники осуществлялось бортовым компьютером в автоматическом режиме.

В 2000 г. в течение 10-часового полета установки СФЕРА-1 на привязном аэростате на высоте 900 м было зарегистрировано около 400 событий, вызванных ЧС ШАЛ. Обработка экспериментальных данных позволила впервые получить изображения вспышек черенковского света от ШАЛ на снежном «экране». По полученным данным был построен спектр ПКЛ (рис. 8) в области $10^{16} - 10^{17}$ эВ [10].

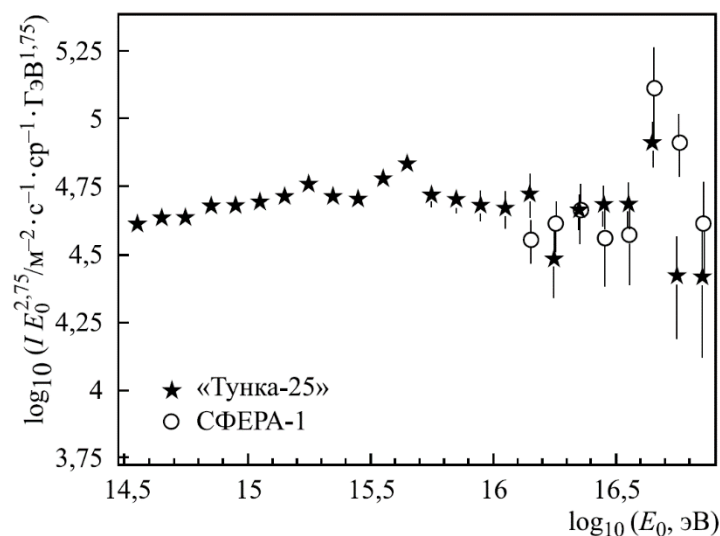


Рисунок 8 – Энергетический спектр ПКЛ установки СФЕРА-1 по данным на 2001 г.

Время измерений составило 457 минут. Подавляющая часть событий была обусловлена флуктуациями светового фона звездного неба, величина которых составляла около 100 фотоэлектронов на детектор за 2 мкс. Анализ полученных данных показал, что события, вызванные как звездным небом, так и техногенными причинами, практически не содержат импульс длительностью более 30 нс, что позволяет хорошо отсеивать такие события.

1.4.4 Установка СФЕРА-2

Дальнейший прогресс в развитии данного метода связан с модернизацией установки и проведением регулярных подъемов установки в климатически более благоприятном районе.

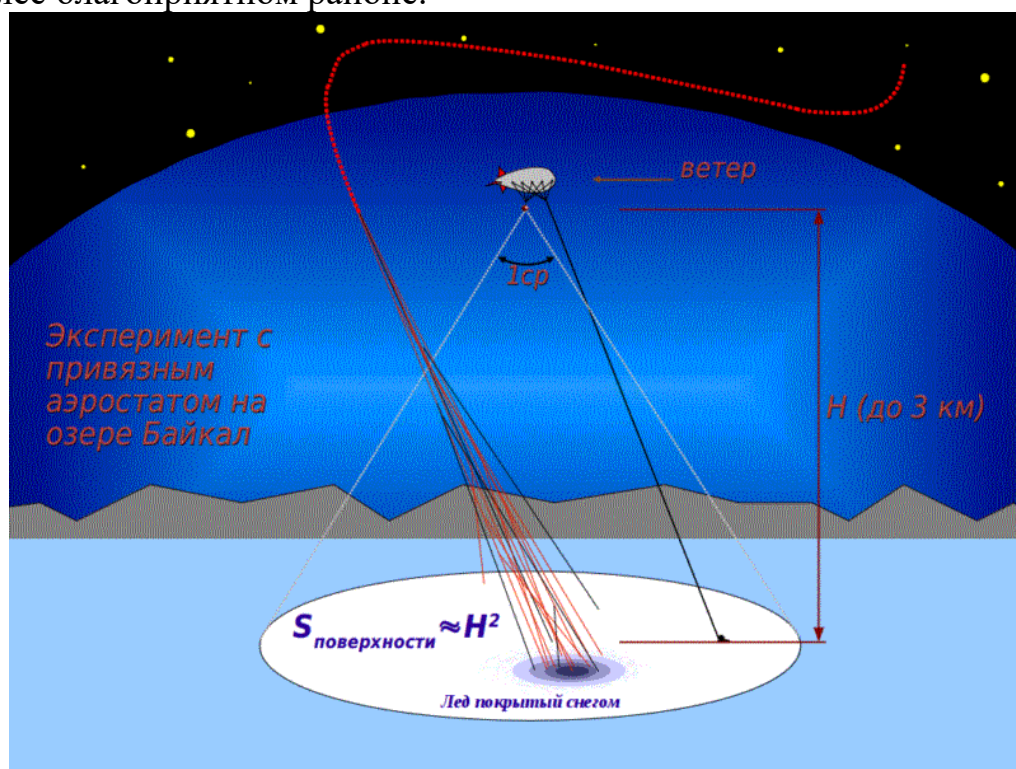


Рисунок 9 – Схема эксперимента с установкой СФЕРА-2.

Установка СФЕРА-2 предназначена для подъема в темное время суток на привязном аэростате на высоту до 1 км. Установка регистрирует динамику световых пятен, образуемых ЧС ШАЛ на покрытой снегом поверхности Земли. Старты аэростата проводились с площадки на льду озера Байкал. В месте проведения измерений были изучены оптические свойства снега.

Абсолютный коэффициент отражения рассеянного солнечного света от снега принимал значения от 0,82 до 0,85.

На основе опыта эксплуатации установки СФЕРА-1 было принято решение увеличить светосилу, пространственное и временное разрешение новой установки СФЕРА-2 по сравнению с прототипами. Увеличение числа ФЭУ в мозаике светоприемника и регистрация формы импульсов в каждом канале позволяет понизить величину энергетического порога, увеличить точность определения направления прихода ливня и изучать ФПР ЧС ШАЛ в широком диапазоне расстояний от оси.

Аэростатная установка СФЕРА-2 (рис. 10) [11] состоит из сегментного сферического зеркала диаметром 1,5 м и радиусом кривизны 0,94 м, в фокусе которого установлена мозаика из 109 ФЭУ. Для лучшего пространственного разрешения перед зеркалом установлена диафрагма диаметром 0,93 м. Угол зрения оптической системы установки составляет 52°. С высоты 1 км каждый ФЭУ осматривает область диаметром 50 м на заснеженной поверхности. Триггерная плата способна отбирать события, в которых в течение 1 мкс срабатывают дискриминаторы, находящиеся рядом с ФЭУ.

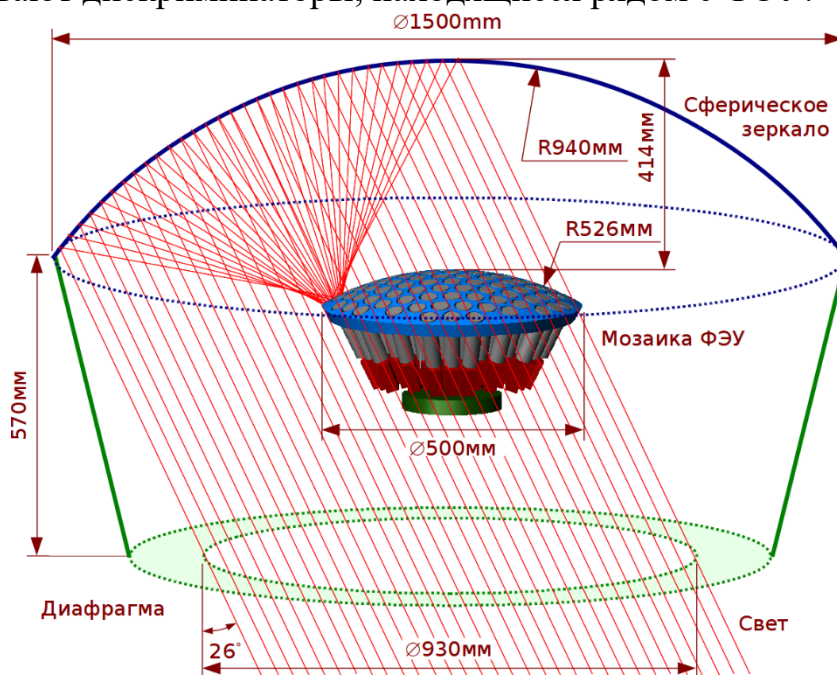


Рисунок 10 – Схема оптической системы установки СФЕРА-2.

СФЕРА-2 регистрирует динамику световых пятен, образуемых ЧС ШАЛ. Установка работала в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ.

Оценка энергии события производилась путем нормировки экспериментальной ФПР на модельную ФПР с известной энергией. Был получен дифференциальный энергетический спектр частиц в излучаемом диапазоне энергий, совпадающий в пределах погрешностей с результатами работы других установок (рис. 11).

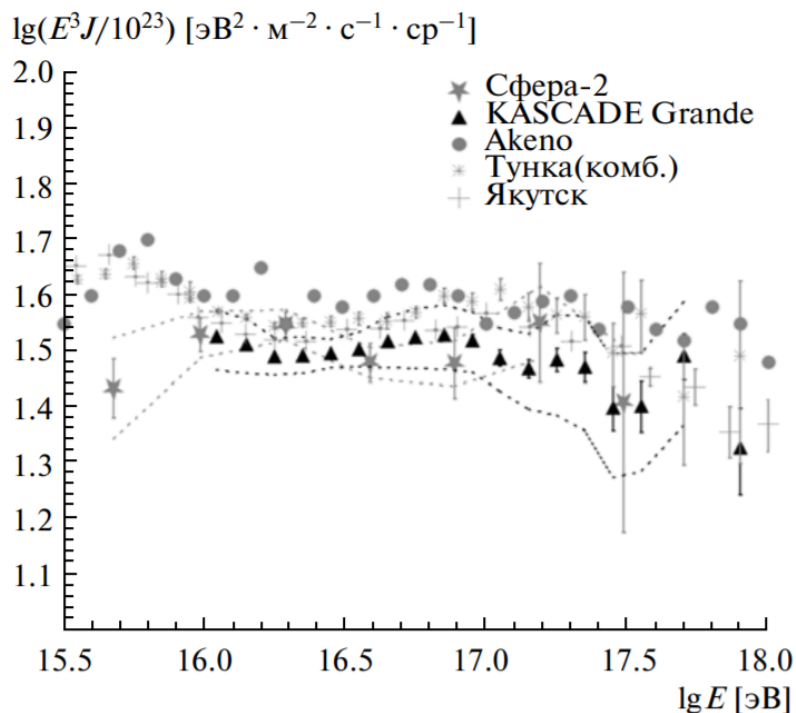


Рисунок 11 – Дифференциальный энергетический спектр на 2011–2013 гг.

Определение химического состава КЛ проводится в режиме индивидуальных событий на основе сравнения образов зарегистрированных событий с моделированными. Оценка состава ПКЛ указывает на утяжеление при энергиях 40 – 100 ПэВ

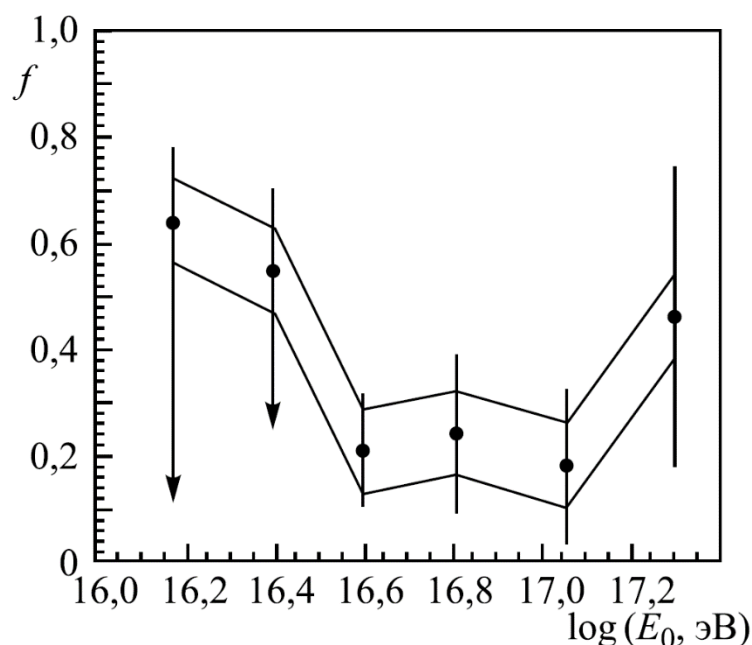


Рисунок 12 – Зависимость доли легких ядер от логарифма энергии первичной частицы в эксперименте СФЕРА-2 на 2012 г.

1.4.5 Установка СФЕРА-3

Экспериментальные данные, полученные в ходе работы проекта, показали, что методика изучения ПКЛ, предложенная А.Е. Чудаковым, в реализации детекторов СФЕРА способна дать сравнимый с большими наземными установками результат. Новым витком в развитии проекта СФЕРА должен стать новый детектор СФЕРА-3, разработка которого активно происходит в настоящий момент.

Новый детектор получит увеличенное сферическое зеркало, предполагается использовать зеркало с диаметром порядка 2,2 м. На смену ФЭУ придут кремниевые фотоумножители (КФУ), соединенные в сегменты по 7 элементов. Ожидается, что количество сегментов мозаики будет порядка 380, т. е. порядка 2700 КФУ в мозаике. Таким образом, по сравнению с детекторной системой СФЕРА-2, возрастет как количество каналов, так и точность регистрации. Планируется установка детектора на промышленный беспилотный летательный аппарат (БПЛА) с максимальной высотой полета порядка 2 км, что позволит собирать больше информации о ЧС ШАЛ. Также использование БПЛА

позволит динамично менять высоту полета детектора, что позволит проводить дополнительные калибровки экспериментальных данных.

Со всеми этими нововведениями ожидается, что прибор позволит получать новые научные знания о химическом составе ПКЛ в области энергий 1 – 1000 ПэВ методом регистрации отраженного ЧС ШАЛ. Успешная реализация проекта позволит получить экспериментальные данные для восстановления парциальных спектров для нескольких групп ПКЛ (протоны, группы CNO и Fe) в области энергий 1 – 1000 ПэВ на основе обработки индивидуальных событий ШАЛ. Данные о составе ПКЛ в указанном диапазоне энергий будут иметь определяющее значение для выбора механизма ускорения галактических лучей и модели перехода от галактических КЛ к экстрагалактическим, что крайне важно для построения глобальной теории ускорения и распространения КЛ во Вселенной.

Задачи

1.5 Моделирование детектора СФЕРА-3 в GEANT4

Схема детектора СФЕРА-3, на основе которой будет произведено моделирование представлена на рис. 13. Основными элементами являются сферическое зеркало, входное окно и мозаика детектора. Лучи ЧС, проходя через входное окно детектора, отражаются от зеркала и концентрируются на элементах мозаики.

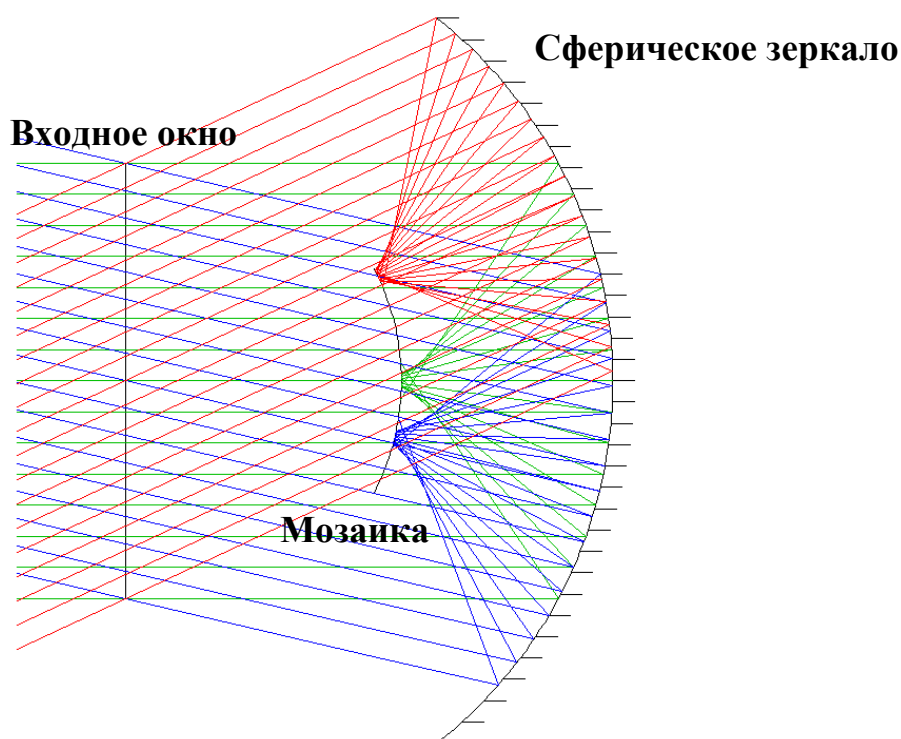


Рисунок 13 – Оптическая схема СФЕРА-3.

Процесс моделирования можно разделить на два этапа, получение геометрической модели детектора и построение хода лучей ЧС.

1.5.1 Геометрическая модель детектора

Важнейшей частью детекторов СФЕРА является мозаика, так как именно её элементы отвечают за регистрацию черенковского света. Новый детектор проекта получит современную детекторную базу, на смену ФЭУ придут кремниевые фотоумножители. В эксперименте планируется использовать SiPM MicroFC-SMA-60035 размером 6×6 мм. 7 таких элементов будут объединяться в общий сегмент. Каждый сегмент планируется размещать на отдельной печатной плате, пример использования данной модели SiPM можно увидеть на рис. 14. В нашем случае ячейки будут представлять собой правильные шестиугольники. Для улучшения качества регистрации на каждый пиксель будет установлен сферический светосборник, представляющие собой полусферу, усеченную шестиугольной призмой (рис. 17).

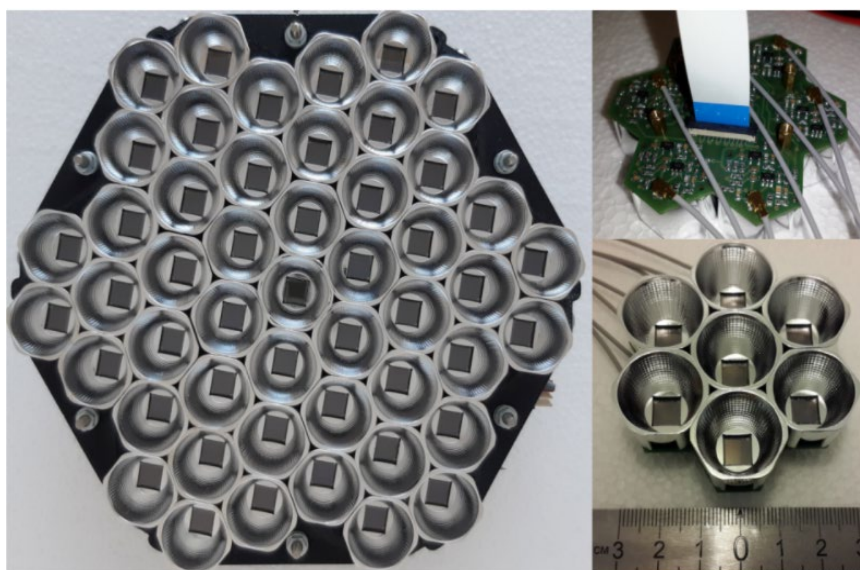


Рисунок 14 – Прототип матрицы из 49 SiPM собранной из семи электронных плат с 7 SiPM с предусилителями.

Возникает задача оптимального расположения элементов мозаики. Для решения этой задачи построим двумерную мозаику. Зная размеры элементов и подложки, произведем процедуру замощения поверхности правильными

шестиугольниками. На выходе получаем следующую картину (рисунок 15), для наглядности сегменты выкрашены в два цвета. Здесь уже учтен факт объединения 7 SiPM в одну логическую схему. Мозаика вписана в окружность, это необходимо для оптимального использования пространства подложки детектора.

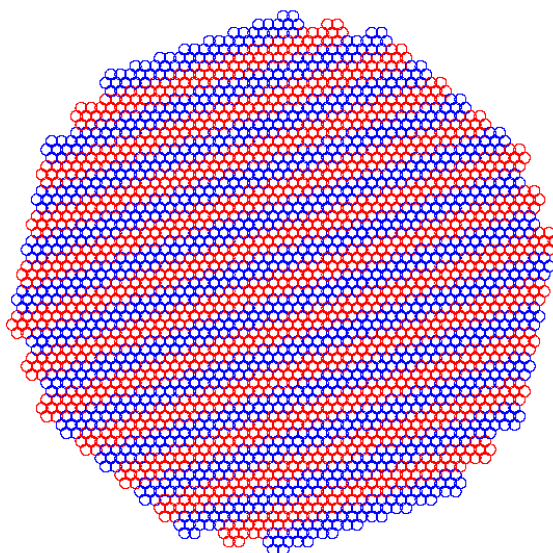


Рисунок 15 – Плоская мозаика.

Для упрощения расчетов было принято решение использовать полярную систему координат. Задаётся начальная точка – геометрический центр центрального элемента, все остальные элементы задаются через радиальный и угловой сдвиги. Данные были представлены с помощью 4 файлов:

- azcen и radcen – в которых указаны угловые и радиальные координаты центров элементов базового сегмента.
- azseg и radseg – в которых указаны угловые и радиальные координаты центров сегментов.

Использование именно такого набора данных обусловлено тем, что при замощении сферы, процедуру можно ускорить, производя замощение не отдельным элементом, а собранным из 7 элементов сегментом.

На основе полученных данных происходит заполнение элементов на сферической поверхности. Сначала происходит построение базового сегмента с учетом наличия расстояния между элементами. Для правильного переноса плоской мозаики на сферу, каждый базовый сегмент поворачивается таким образом, чтобы соответствовать нормали к поверхности мозаики в данной точке.

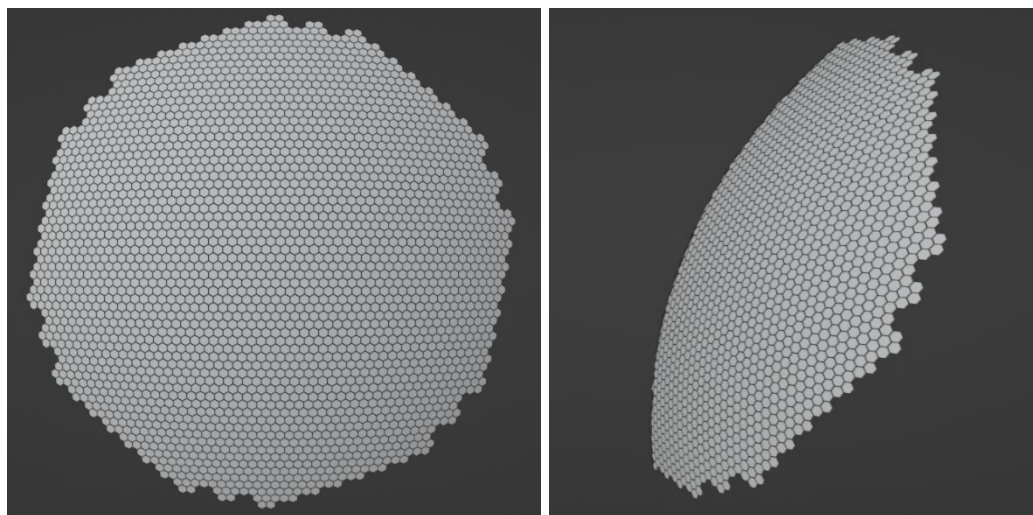


Рисунок 16 – Проекция мозаики на сферическую поверхность.

Так как модель геометрии необходима для расчета оптического хода лучей и получения распределения фотонов на мозаике, элементом мозаики в нашем случае выступает светосборник, изображенный на рисунке 6, в приближении представляющий собой полусферу, ограниченную шестиугольной призмой.



Рисунок 17 – Модель светосборника.

В результате имеем следующую модель детектора. Видны входное окно, подложка мозаики с нанесенной на неё мозаикой и сферическое зеркало. Полученная геометрия будет использоваться для дальнейшего расчета хода лучей ЧС

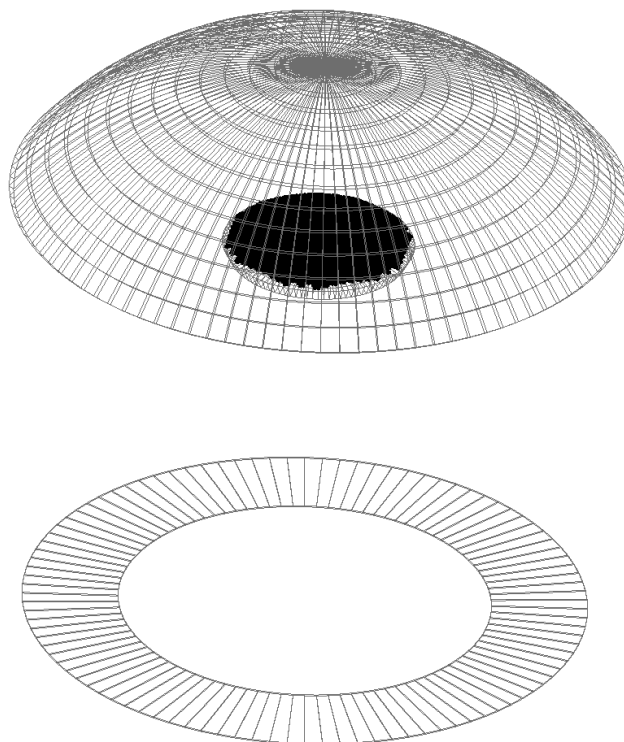


Рисунок 18 – Модель детектора СФЕРА-3.

1.5.2 Моделирование треков фотонов

После построения геометрии детектора программа переходит к этапу моделирования хода лучей ЧС. Во входном файле мы получаем информацию об оси ШАЛ, расстоянии от снежной поверхности до детектора, выбранной модели атмосферы. После этого построчно получаем информацию о координатах фотона на снегу и входном окне, а также о собственном времени частицы.

После этого происходит расчет траектории фотонов по этим двум точкам. Если траектория проходит через элементы детектора, происходит расчет взаимодействия:

- При взаимодействии фотона со сферическим зеркалом происходит оптическое отражение;
- При взаимодействии с нижней частью мозаики происходит поглощение;
- При прохождении мимо зеркала фотон исключается из рассмотрения.

При оптическом отражении, зная направление луча, рассчитывается следующая точка пересечения траектории с элементами детектора. С помощью внутренних методов Geant4 мы можем получить полную информацию об элементе, в котором произошло поглощение фотона. Таким образом после полного моделирования мы имеем информацию о пространственно-временном распределении фотонов на элементах мозаики.

После суммирования фотоэлектронов по пикселям в пределах сегмента и времени можно получить следующий вид распределений (рис 19.). Подобное суммирование способствует наглядности результатов при малых энергиях первичной частицы, так как количество фотоэлектронов на мозаике в случае малых энергий оказывается небольшим, с большим количеством пикселей, на которых регистрация не произошла. С другой стороны, масштабирование мозаики будет способствовать увеличению точности при рассмотрении первичной частицы с большей энергией.

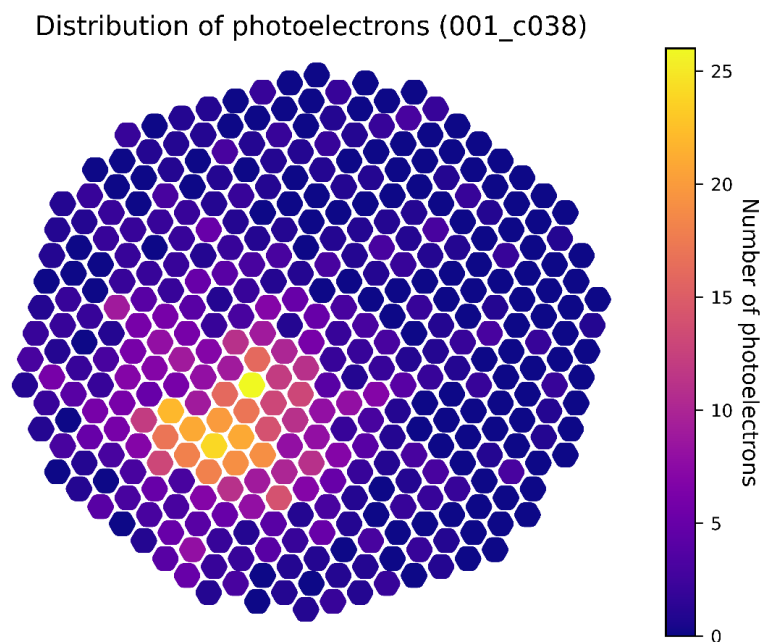


Рисунок 19 – Пример распределения фотоэлектронов на мозаике детектора.

1.6 Оценка способности различать массы первичных ядер

На данный момент телескоп СФЕРА-3 находится в стадии активной разработки. Так как вопрос об окончательной геометрии телескопа остается открытым, достаточная статистика для постановки вопроса о критерии разделения ядер по массе не набрана. Стоит понимать, что вопрос критерия, вообще говоря, не является предметом данной работы. Для оценки способности различать массы первичных ядер были взяты качественно различимые события с одинаковой энергией на ядро 30 ПэВ для 4 типов ядер: ядро водорода (H), ядро гелия (He), ядро азота (N) и ядро железа (Fe). Для данных ядер были построены распределения на сегментах мозаики на основе случайной выборки событий.

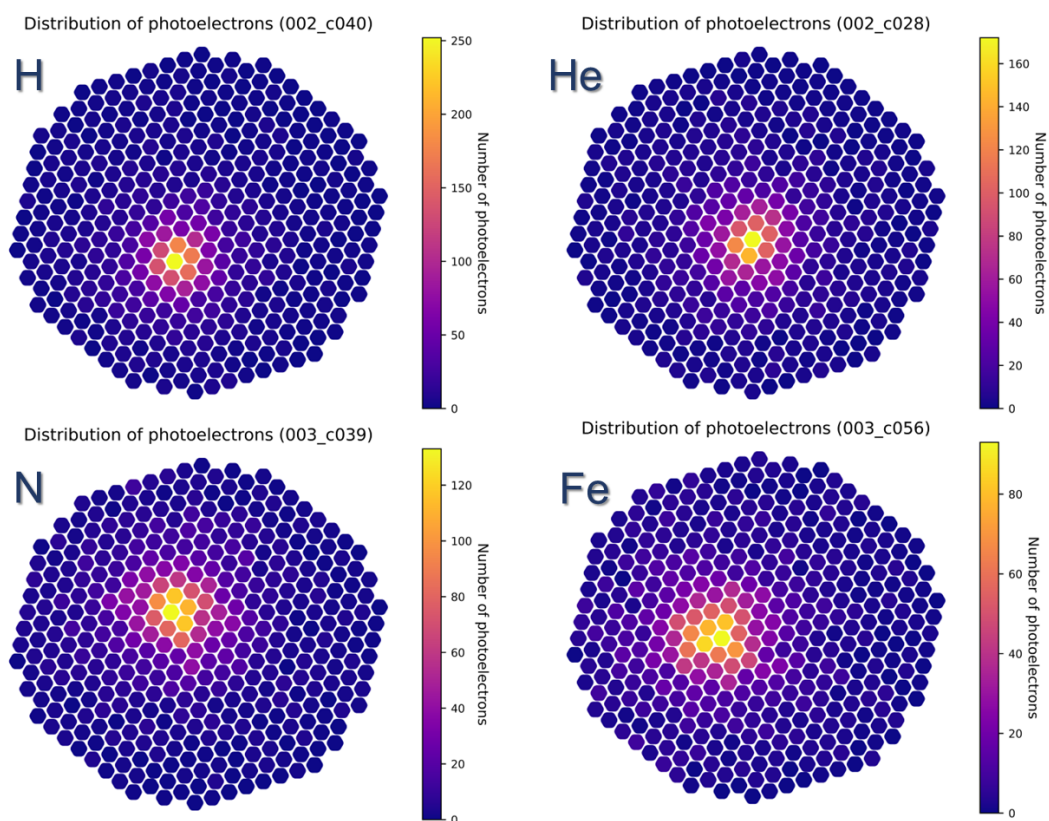


Рисунок 20 – Распределения фотоэлектронов на мозаике детекторов для ядер с энергией 30 ПэВ для четырех типов ядер (слева направо): ядро водорода (H), ядро гелия (He), ядро азота (N) и ядро железа (Fe).

Представленные распределения можно различить по следующим признакам:

- Модуль максимума распределения;
- Размер пятна на мозаике.

Подобные отличительные признаки в дальнейшем могут стать основной для построения критерия для различия ядер ПКИ по массе в эксперименте СФЕРА-3.

1.7 Моделирование электроники SiPM

Кремниевый фотоумножитель (SiPM) представляет собой схему, состоящую из большого количества однофотонных лавинных фотодиодов (SPAD), соединенных параллельно, примерную схему можно увидеть на рисунке, представленном ниже.

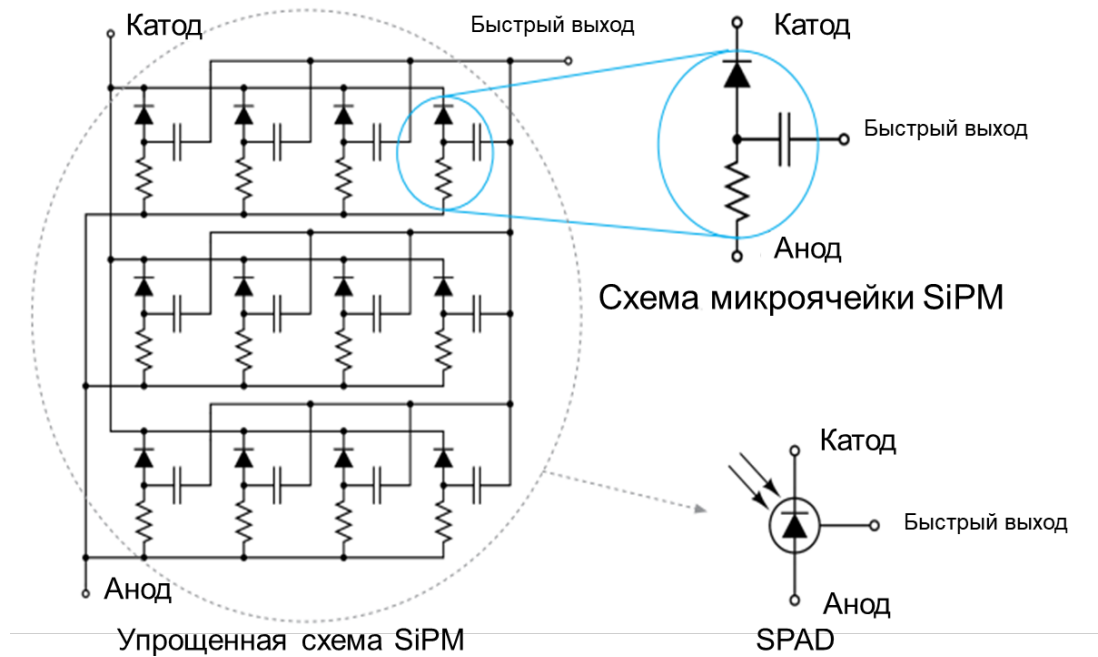


Рисунок 21 – Эквивалентная схема SiPM.

Для дальнейшего моделирования SiPM будем использовать упрощенную схему SPAD.

Как видно из схемы (рис. 22), эквивалентная схема SPAD представляет собой параллельное соединение внутреннего сопротивления области пространственного заряда диода R_d и внутренней емкости обедненного слоя C_d . Схема гашения содержит резистор гашения R_q и паразитную емкость C_q . Для имитации прихода фотона используется ключ и источник напряжения в ветви с R_d [12].

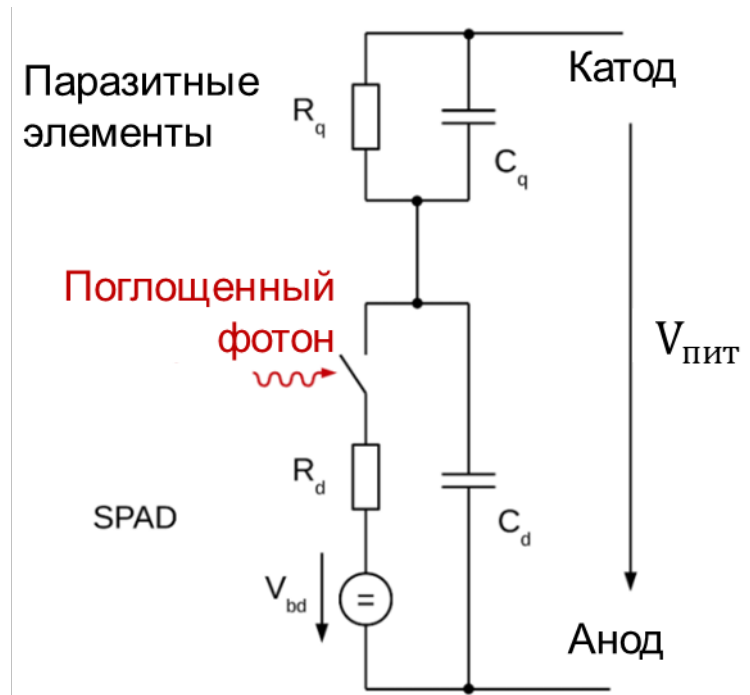


Рисунок 22 – Эквивалентная схема однофотонного диода.

На схеме, изображенной на рис. 23, можно увидеть описанную ранее эквивалентную схему SPAD. Для удобства моделирования используется электрический ключ $S1$, на клеммы которого подается сигнал с источника импульса тока, время работы которого соответствует времени лавинного процесса. Замыкание ключа приводит к разрядке конденсатора C_1 , которое провоцирует экспоненциальное падение напряжения на узле между C_2 и C_1 . Максимальное падение напряжение на узле контролируется внутренним источником напряжения и зависит от температуры работы SiPM. Из документации производителя известно, что в представленном MicroFC 60035 18980 ячеек. В нашем упрощении будем считать, что ячейки способны поглощать фотоны независимо друг от друга, что позволяет разделить ячейки на две категории для упрощения дальнейшего моделирования:

1. Активная ячейка, на которой произошло поглощение фотона.
Ключ замкнут.

2. Пассивная ячейка, на которой поглощения фотона не произошло.
Ключ разомкнут.

Данная схема имеет потенциал к масштабированию количества активных элементов, а также к адаптации для моделирования работы других серий SiPM с иным числом ячеек.

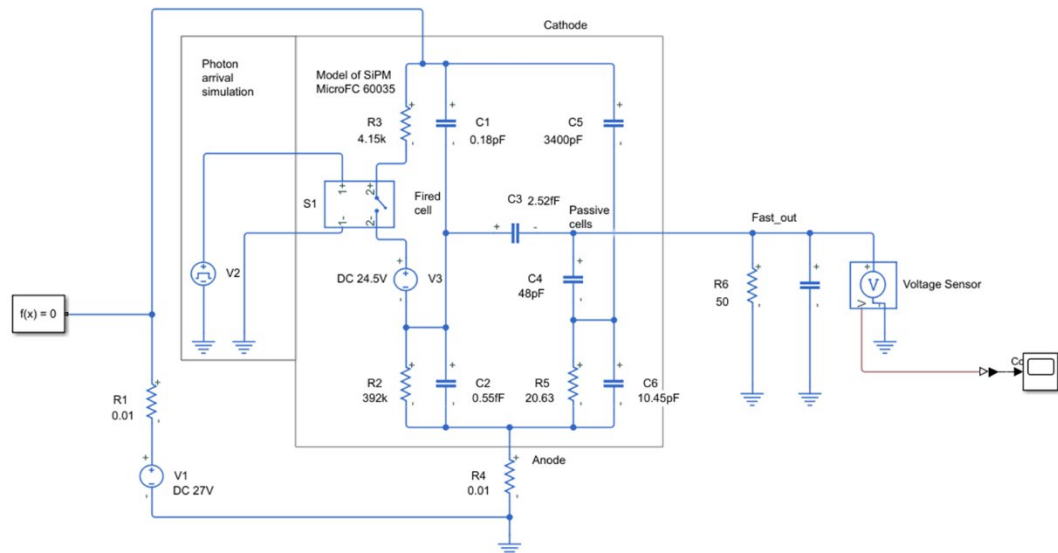


Рисунок 23 – Эквивалентная схема SiPM в MATLAB Simulink.

На представленной выше схеме номиналы элементов подобраны таким образом, чтобы соответствовать экспериментальной кривой, полученной из документации производителя. Также в новой версии модели присутствует внутренняя емкость вывода Fast_out. Учет этой емкости позволил получить необходимое соответствие теоретической и экспериментальной формы спада сигнала. Измерения получены с использованием осциллографа с полосой пропускания 2,5 ГГц и красного лазера частотой 50 МГц и длиной волны 650 нм.

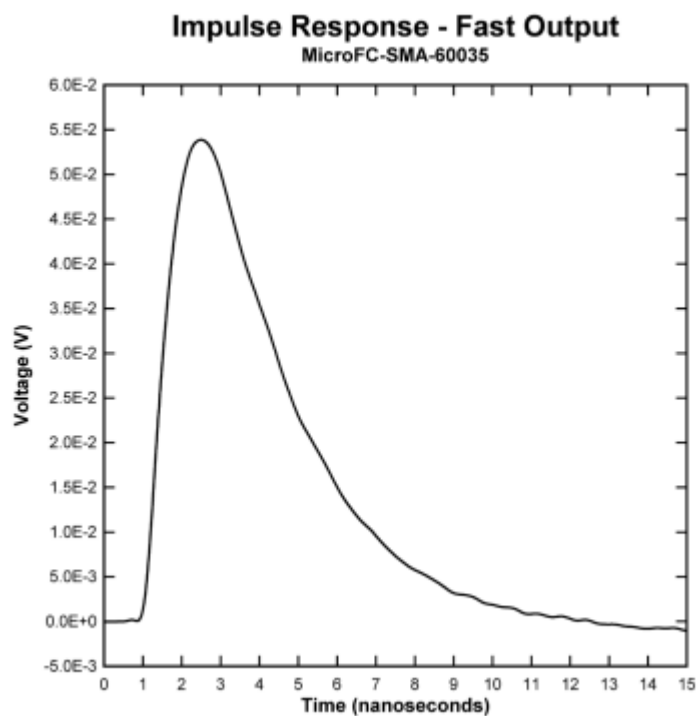


Рисунок 24 – Экспериментальный отклик SiPM.

Экспериментальная зависимость была оцифрована и нанесена на теоретическую зависимость, полученную с помощью модели SiPM в MATLAB Simulink.

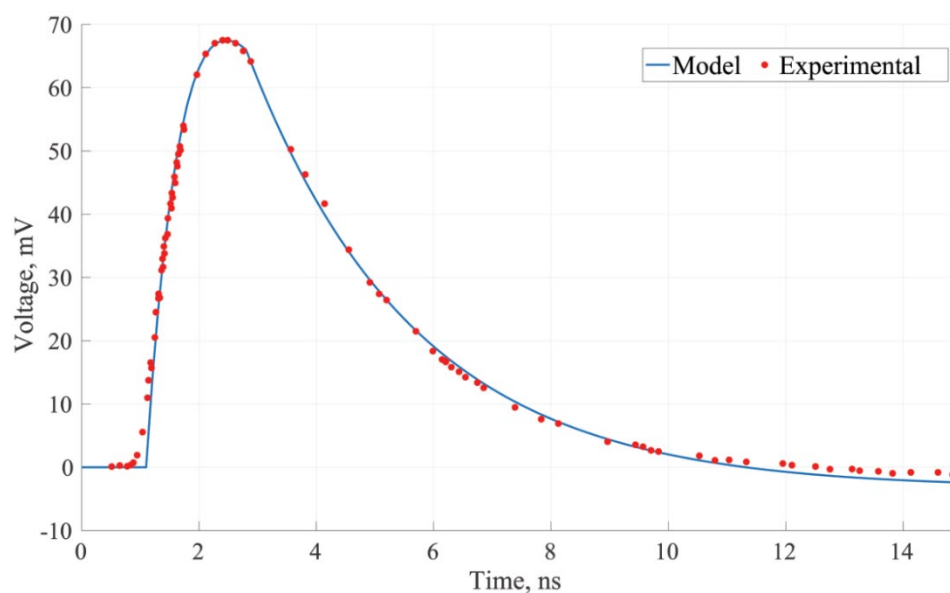


Рисунок 25 – Отклик модели SiPM.

Синяя линия на графике соответствует отклику модели на выходе fast_output, красным точкам соответствует оцифрованный график экспериментальных данных. Благодаря сравнению теоретической кривой с экспериментальными данными модель была уточнена с помощью учета наличия емкости у провода, соединяющего детектор с осциллографом, что позволило достигнуть идентичной формы спада.

ВЫВОДЫ

1. С помощью программного пакета GEANT4 была создана программа для моделирования телескопа СФЕРА-3 в конфигурации с 7-ми пиксельным сегментом, результатом выполнения которой является распределение фотоэлектронов на мозаике детектора.
2. Полученная программа была проверена на работоспособность с помощью небольшой качественной выборки событий. В ней присутствовали события для ядра водорода (H) с энергией 5 ПэВ, 10 ПэВ и 30 ПэВ, а также для ядра гелия (He), ядра азота (N) и ядра железа (Fe) с энергией 30 ПэВ.
3. Основываясь на полученных распределениях, был сделан вывод о наличии отличительных признаков (модуль максимума распределения и размеры пятна), которые в дальнейшем могут стать основой критерия для разделения ливней по первичной массе.
4. Разработана модель кремниевого фотоумножителя SiPM MicroFC 60035. Благодаря сравнению теоретического отклика с экспериментальными данными модель была уточнена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день вопрос о массовом спектре первичных космических лучей остается открытым. Активно развиваются экспериментальные проекты, преследующие своей целью решение данной проблемы. Косвенные методы исследования широких атмосферных ливней, рождаемых первичной частицей высокой энергии, создают настоящий вызов для ученых-экспериментаторов. Из-за специфики экспериментов по изучению широких атмосферных ливней на наземных установках возникает необходимость создания больших детекторных массивов, расположенных на большой территории, порядка нескольких километров.

Решением этой проблемы может стать методика, лежащая в основе проекта СФЕРА. Эксперимент СФЕРА-2 доказал, что единственный телескоп, регистрирующий отраженное излучение Вавилова-Черенкова, способен предоставить данные, которые не уступают по значимости результатам больших наземных установок.

Следующим этапом проекта СФЕРА станет телескоп СФЕРА-3, который будет являться закономерным развитием идей проекта. Данный телескоп получит множество улучшений: новая детекторная база, увеличение размеров сферического зеркала, уменьшение энергетического порога. Всё это позволит увеличить статистику эксперимента.

В данной работе была представлена оптическая модель телескопа СФЕРА-3. Согласно распределениям, полученным в результате работы модели, можно ожидать, что разрешающая способность относительно массы первичной частицы повысится относительно телескопа СФЕРА-2. В дальнейшем это позволит уточнить критерии разделения первичного космического излучения по массе первичной частицы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Dova M.T., Mancenido M.E., Mariazzi A.G et al. The Mass Composition of Cosmic Rays near 10^{18} eV as Deduced from Measurements Made at Volcano Ranch // *Astroparticle Physics*, Vol. 21, No. 6, 2004. pp. 597-607.
2. Antoni T., Apel W.D., Badea A.F. et al. KASCADE Measurements of Energy Spectra for Elemental Groups of Cosmic Rays: Results and Open Problems // *Astroparticle Physics*, Vol. 24, No. 1-2, 2005. pp. 1-25.
3. Kampert K.H., Unger M. Measurements of the Cosmic Ray Composition with Air Shower Experiments // *Astroparticle Physics*, Vol. 35, No. 10, 2012. pp. 660-678.
4. R.A. Antonov, E.A. Bonvech, D.V. Chernov et al. Spatial and temporal structure of EAS reected Cherenkov light signal. // *Astroparticle Physics*, 2019.
5. Klages H.O., Apel W.D., Bekk K. et al. The Cascade experiment // *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, Vol. 52, No. 3, 1997. pp. 92-102.
6. Apel W.D., Arteaga J.C., Badea A.F. et al. The KASCADE-Grande experiment // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 620, No. 2-3, 2010. pp. 202-216.
7. Budnev N., Astapov I., Barbashinak N. et al. The TAIGA experiment: From cosmic-ray to gamma-ray astronomy inthe Tunka valley // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 845, 2017. pp. 330-333.
8. Prosin V.V., Berezhnev S.F., Budnev N.M. et al. Tunka-133: Results of 3 year operation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics*

Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, T. 756, 2014. C. 94-101.

9. Chudakov A.E. A possible method of detecting EAS based in Cherenkov radiation reflected from a ground snow surface // Proceedings of All-Union Symposium on Experimental Methods of Studying Cosmic Rays with Superhigh Energies. Yakutsk. 1974.
10. Antonov R.A., Chernov D.V., Korosteleva E.E. et al. Balloon-Borne Measurements of the CR Energy Spectrum in the Energy Range 10-100 PeV // Proceedings of the 27th ICRC. Hamburg: Copernicus Gesellschaft. 2001. Vol. 1. pp. 59-62.
11. Chernov D.V., Antonov R.A., Bonvech E.A. and Shirokov A.V. Optical and Data Acquisition System for the SPHERE-2 Detector // Proceedings of the 30th ICRC. Mexico City. 2001. Vol. 5. pp. 941-944.
12. Gundacker S. and Heering A. The silicon photomultiplier: fundamentals and applications of a modern solid-state photon detector // Physics in Medicine & Biology, Vol. 65, No. 17, 2020.