

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

Курсовая работа

Разработка алгоритма оценки массы первичного ядра по совместным данным детекторов
прямого и отражённого черенковского света широких атмосферных ливней установки
СФЕРА-3

Выполнила студентка 402 группы
Черкесова Ольга Викторовна
Научный руководитель
проф. кафедры физики космоса
физического факультета МГУ
Галкин Владимир Игоревич

Москва, 2025

Аннотация

Проектируемая установка СФЕРА-3, в отличие от установки СФЕРА-2, будет иметь не только телескоп отражённого черенковского света, но и детектор, регистрирующий угловое распределение прямого черенковского света. В качестве параметра, чувствительного к массе первичной частицы, в данной работе рассматривается длина большой оси черенковского образа. Рассмотрен ряд критериев разделения событий по первичным массам в зависимости от положения детектора относительно оси ливня, расстояния детектора до оси ливня на высоте полёта установки, значений порогов по плотности фотонов, а также наклона оси ливня.

Содержание

1	Введение	3
2	Детектор СФЕРА-3	4
3	Классификация первичных частиц по массам	5
4	Создание и обработка образов прямого черенковского света для создания критерия	6
5	Создание системы критериев	8
6	Влияние абсолютных порогов на вероятности неправильной классификации первичной частицы	10
7	Зависимость критерия от наклона и энергии	12
8	Двойная детекция	12
9	Планы	14

1 Введение

Одной из задач физики космических лучей является изучение массового состава первичных космических лучей (ПКЛ). Исследование массового состава лучей в районе колена (рис. 1) энергетического спектра может дать информацию об их происхождении, ускорении и распространении.

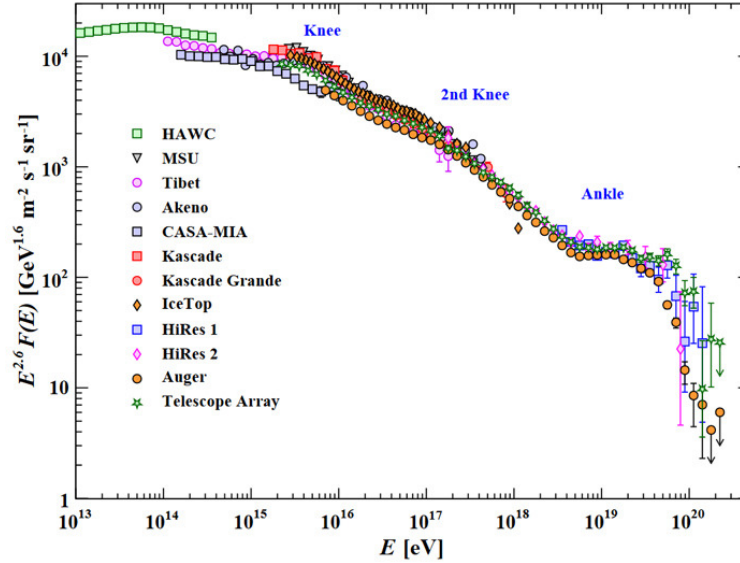


Рис. 1: Экспериментальный энергетический спектр ПКЛ. Умножен на $E^{2.7}$, чтобы особенности формы спектра были лучше видны.

Этот вопрос особенно интересен с учётом результатов[1], указывающих на то, что значительная часть событий ПКЛ с энергией 1– 1000 ПэВ может иметь экстрагалактическую природу. Таким образом, состав ПКЛ в данном диапазоне может иметь решающее значение для построения модели перехода от галактических космических лучей к экстрагалактическим. Понимание физики этого процесса необходимо для описания процессов ускорения и распространения космических лучей.

В настоящее время прямое измерение ПКЛ с помощью детекторов на спутниках и стратосферных баллонах возможно только для первичных энергий до 10^{15} эВ, а для больших энергий, как правило, используются косвенные методы, в частности, регистрация и изучение черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ). Метод детектирования отраженного от снежной поверхности черенковского света, предложенный А.Е. Чудаковым[2], лёг в основу серии экспериментов СФЕРА. В этом случае оценка параметров первичной частицы производится по характеристикам вызванного ей ШАЛ. В данной работе будет рассматриваться изучение пространственно-углового распределения черенковского света, которое весьма чувствительно к особенностям ШАЛ, связанных с массой первичной частицы. Сейчас такая интегральная характеристика ПКЛ как среднее массовое число известна с точностью до нескольких раз, а в области "колена" — с точностью до порядка. Задачей этой работы является изучение чувствительности черенковского образа в новом варианте детектора прямого черенковского света к массе первичной частицы и исследование влияния положения детектора относительно оси ШАЛ, расстояния от детектора до оси ШАЛ и наклона оси ливня на ошибки разделения пар первичных ядер "протоны — ядра азота" и "ядра азота — ядра

железа".

Проведение чувствительных к массе первичных ядер экспериментов является важной задачей современной астрофизики. На данный момент научная группа проекта СФЕРА[3] занимается активной разработкой следующего детектора серии – детектора СФЕРА-3. Решения, которые будут применены в СФЕРЕ-3[4], позволят получить более детальное представление о массовом составе ПКЛ в диапазоне энергий от 1 до 1000 ПэВ.

2 Детектор СФЕРА-3

В детекторе СФЕРА-3 используется модифицированная оптическая система Шмидта с линзовым корректором для исправления сферической аберрации. Конструкция рамы из алюминиевых трубок диаметром 20 мм соединяет все элементы оптической системы, включая зеркало, бленду, линзу корректора сферической аберрации и мозаику кремниевых фотоумножителей. Измерительная аппаратура располагается в затененной области усеченного конуса. Схема установки приведена на рисунке 2.

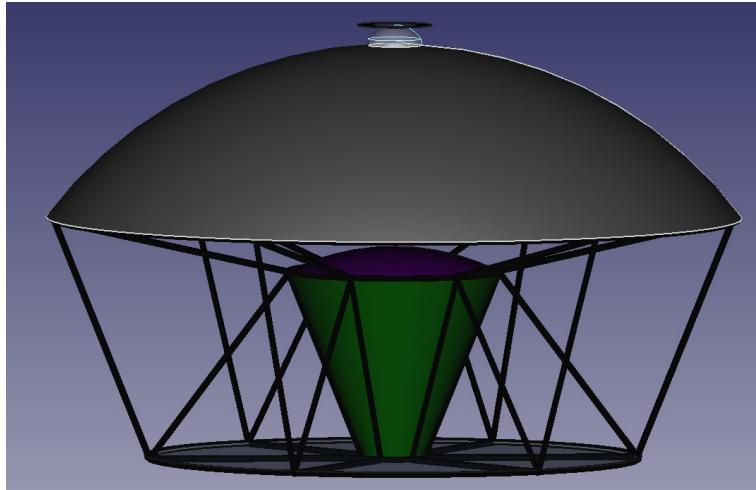


Рис. 2: Планируемая схема установки СФЕРА-3

Планируется, что детектор СФЕРА-3 будет иметь эффективную площадь входного окна диафрагмы не менее 1 м^2 и число элементов изображения не менее 2000. Поле зрения должно быть не менее $\pm 20^\circ$. В ходе моделирования было установлено, что короткофокусная линза площадью 1 дм^2 даёт большие искажения образа, что даёт большие ошибки в оценке массы первичной частицы. Поэтому в новом варианте детектора используется длиннофокусная линза площадью 4 дм^2 . Такая линза обладает меньшим полем зрения, поэтому детектор будет состоять из нескольких линз, освещающих одну матрицу. Окончательные характеристики будут определены в ходе дальнейшей оптимизации параметров оптической системы и моделирования.

Установкой СФЕРА-2 был зарегистрирован прямой свет, прошедший через щель между сегментами зеркала, что было установлено по характерным задержкам регистрации. При проектировании нового детектора было принято решение исследовать информативность прямого

света. В ходе исследования было установлено, что прямой свет более чувствителен к массе первичной частицы, чем отражённый. Поэтому в установке СФЕРА-3 будут присутствовать детекторы как прямого, так и отражённого света, что позволит улучшить разделение первичных частиц по массам и направлениям при помощи двойной детекции ШАЛ. На основании информации, полученной от детектора отражённого света, будет определяться энергия ливня, расстояние от оси ливня на высоте полёта, наклон и азимут оси ливня в первом приближении. На основании информации, полученной от детектора прямого света, будет уточняться наклон и азимут оси ливня, а также будет определяться положение детектора относительно оси ливня и масса первичной частицы. Самосогласованное определение всех первичных параметров даст наиболее точные оценки массы первичной частицы.

3 Классификация первичных частиц по массам

Целью настоящей работы является создание оптимального критерия для классификации первичных частиц на три группы: группа протонов, группа ядер азота и группа ядер железа. Сейчас классификация проводится на основании длины большой оси образа черенковского света, поскольку этот параметр является одним из простейших параметров формы, а параметры формы слабо зависят от модели взаимодействия частиц [8]. При классификации пары протоны-ядра азота при длине большой оси, большей критической, частица классифицируется как протон, при меньшей – как ядро азота. При классификации пары ядра азота-ядра железа при длине большой оси, большей критической, частица классифицируется как ядро азота, при меньшей – как ядро железа. Под оптимальным критерием подразумевается критерий, при использовании которого вероятность ошибочной классификации минимальна. Было установлено, что длина большой оси черенковского образа зависит не только от азимутального положения детектора, но и от расстояния от детектора до оси ливня на высоте полёта детектора. Единого критерия для всех азимутов недостаточно [6], как и системы критериев, зависящих только от азимута, поскольку в таком случае велика вероятность ошибочной классификации первичной частицы, что показано в таблице 1.

Таблица 1: Вероятности неверной классификации первичной частицы, полученные при использовании системы критериев, зависящих только от азимутального положения детектора относительно оси ливня. p_{pro} – вероятность неверной классификации протона, p_{N} – вероятность классифицировать ядро азота как протон, N_{Fe} – вероятность классифицировать ядро азота как ядро железа, Fe – вероятность неправильной классификации ядра железа.

p_{pro}	p_{N}	N_{Fe}	Fe
0.44	0.14	0.42	0.11

Значит, необходимо создать систему критериев, зависящих от азимутального положения детектора и от расстояния от детектора до оси ливня на высоте полёта детектора. Такая система была создана для двадцати четырёх азимутальных положений детектора и двух наборов расстояний от детектора до оси ливня на высоте полёта. Наборы расстояний находились в диапазоне от 100 м до 200 м. Для первого набора шаг составлял 25 м, для второго – 15 м. Такой выбор шага обусловлен тем, что информация о расстоянии от детектора до оси ливня передаётся от детектора отражённого света с погрешностью около 7 м, что иллюстрирует рисунок 3.

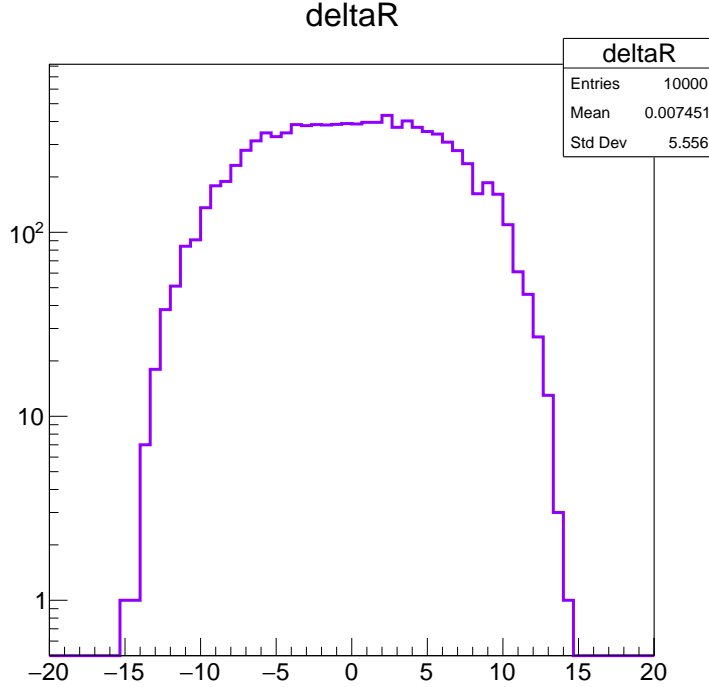


Рис. 3: Распределение погрешностей определения расстояния от детектора до оси ливня на высоте полёта детектора

Шаг по азимутам выбран так, чтобы точность интегрального по этому диапазону критерия не отличалась от точности точечного критерия, то есть критерия, построенного на основании образов, различия азимутов которых малы.

Также длина большой оси черенковского образа зависит от абсолютного порога. Порогом называется количество фотонов на ячейку образа, при превышении которого ячейка считается частью образа. Было установлено, что оптимальный абсолютный порог зависит от энергии первичной частицы и расстояния от детектора до оси ливня. Оптимальным порогом называется абсолютный порог, при использовании которого вероятность неправильной классификации первичной частицы минимальна.

4 Создание и обработка образов прямого черенковского света для создания критерия

Для исследования возможности определения массы первичной частицы по параметрам формы черенковского образа используется компьютерное моделирование. Сначала на суперкомпьютере при помощи CORSIKA генерируется файл, содержащий распределение черенковского света на четырёх уровнях атмосферы, который называется CLOUT, затем из него выбирается пространственно-угловое распределение на высоте 500 м и обрабатывается на локальном сервере. При помощи фиксации координат детектора из массива выбираются угловые распределения, из которых создаются предобразы – наборы фотонов на входном окне детектора, не искажённые прохождением через линзу, после чего применяется программа, моделирующая прохождение фотонов через линзу, и получаются образы, которые необходимо обработать.

Угловой размер углового распределения составляет примерно 0.03 радиана. Оно представлено на рисунке 4.

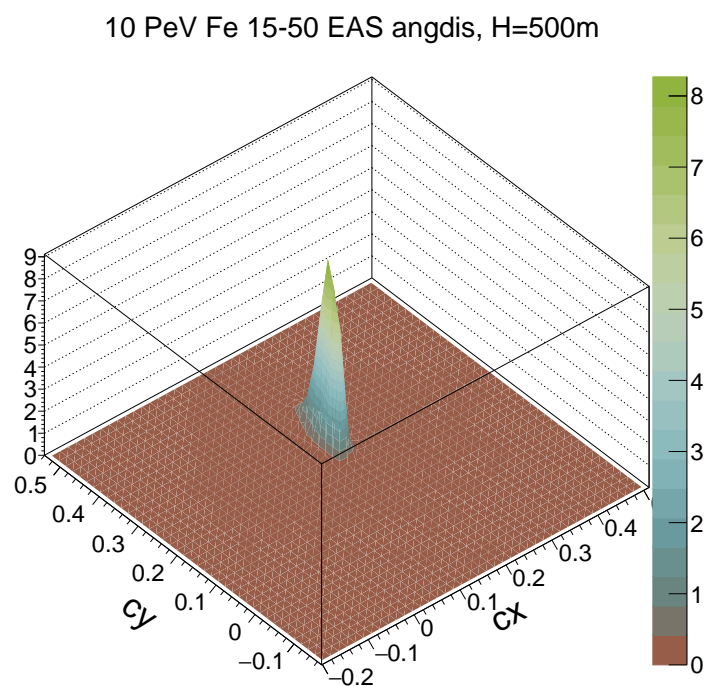


Рис. 4: Пример углового распределения.

После прохождения фотонов через линзу толщиной около 2 см создаётся образ, пример которого приведён на рисунке 5.

10 PeV Fe 15-50 EAS CL image, ssf, H=500m, (+100m,+100m), tele

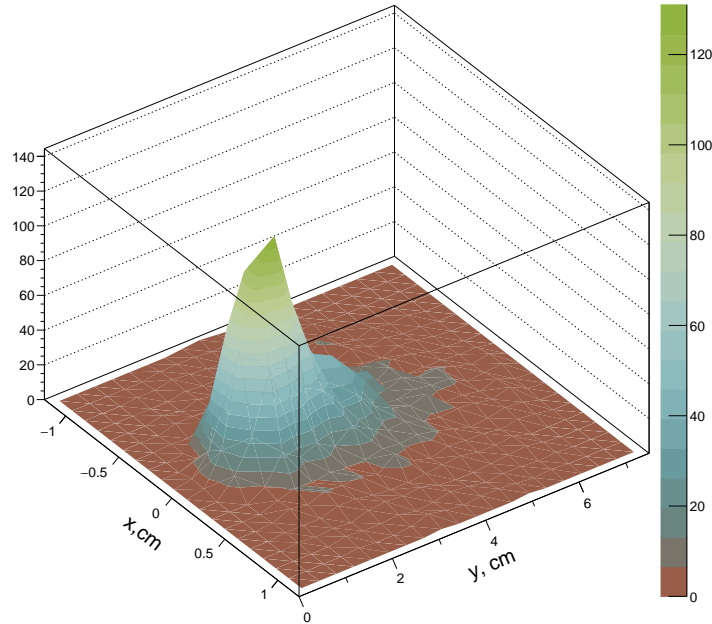


Рис. 5: Пример черенковского образа

При обработке вычисляются длины большой оси для различных порогов. После этого для каждого набора образов с фиксированным положением детектора и расстоянием от детектора до оси ливня устанавливаются критические длины большой оси, при которых вероятность ошибочной классификации минимальна.

Для создания системы критериев необходимо было обработать большое число наборов черенковских образов, что занимало достаточно много времени. Поэтому потребовалось оптимизировать создание образов черенковского света и повысить уровень автоматизации при их обработке. Для этого была переписана программа, создающая предобразы. Теперь она создаёт полный набор предобразов для каждого CLOUT, что позволяет сократить время, которое требуется для копирования и разархивирования CLOUT. Также был написан скрипт, который запускает программу обработки для каждого набора образов. До этого программы запускались вручную, что занимало много времени.

Также было замечено, что в некоторых протонных событиях из-за флуктуаций очень мало света, поэтому при анализе таких событий с использованием высоких порогов образ сокращается до одной или нескольких ячеек, что не позволяет оценить его длину большой оси. Поэтому был создан фильтр, который считает и отбраковывает такие события. Таких событий меньше процента, поэтому ими можно пренебречь.

5 Создание системы критериев

Как было сказано выше, длина большой оси черенковского образа зависит от расстояния от детектора до оси ливня и азимутального положения детектора относительно оси ливня, поэтому была создана система критериев, представляющая собой две таблицы: в одной пред-

ставлены критерии для классификации пары протоны-ядра азота, в другой – критерии для классификации пары ядра азота-ядра железа. Фрагмент системы представлен в таблице 2.

Таблица 2: Фрагмент системы критериев, созданной на основе образов с энергией первичной частицы 10 ПэВ и углом наклона оси ливня 15° . Размер выборки – 50000 событий.

азимут/радиус, м	100	125	150
0°	0.854678	0.910345	0.956415
15°	0.858165	0.910962	0.949921
30°	0.875753	0.925635	0.953182

Система критериев создаётся на обучающей выборке, затем тестируется на тестовой выборке, состоящей из событий с произвольными расстояниями от детектора до оси ливня и азимутальными положениями детектора относительно оси ливня. Изначально обучающая выборка была дискретной, то есть состояла из набора событий с различными фиксированными расстояниями от детектора до оси ливня и азимутальными положениями детектора относительно оси ливня, однако было установлено, что это увеличивает вероятность неправильной классификации первичной частицы, что отражено в таблице 3.

Таблица 3: Сравнение вероятностей неправильной классификации первичной частицы при использовании дискретной обучающей выборки и непрерывной тестовой. Для тестовой выборки pro – вероятность неверной классификации протона, p-N – вероятность классифицировать ядро азота как протон, N-Fe – вероятность классифицировать ядро азота как ядро железа, Fe – вероятность неправильной классификации ядра железа. Для обучающей выборки p-N – максимум из вероятностей неправильной классификации частиц в паре протоны-ядра азота, N-Fe – максимум из вероятностей неправильной классификации частицы в паре азот-железо.

Тренировочная выборка		Тестовая выборка			
p-N	N-Fe	pro	p-N	N-Fe	Fe
0.23	0.24	0.13	0.64	0.14	0.46

При использовании непрерывной обучающей выборки результаты на тестовой выборке незначительно улучшились, что показано в таблице 4.

Таблица 4: Вероятности неправильной классификации первичной частицы при использовании непрерывной обучающей выборки. pro – вероятность неверной классификации протона, p-N – вероятность классифицировать ядро азота как протон, N-Fe – вероятность классифицировать ядро азота как ядро железа, Fe – вероятность неправильной классификации ядра железа.

pro	p-N	N-Fe	Fe
0.38	0.25	0.53	0.07

Из таблицы 4 видно, что при использовании одного абсолютного порога для различных расстояний не удаётся получить для любой первичной частицы вероятность неправильной классификации, меньшую 0.3. Поэтому было принято решение попробовать использовать различные пороги для различных расстояний от детектора до оси ливня.

6 Влияние абсолютных порогов на вероятности неправильной классификации первичной частицы

Количество света в черенковском образе существенно зависит от расстояния от детектора до оси ливня на высоте полёта: чем детектор ближе к оси ливня, тем больше света в образе и тем более высокий абсолютный порог стоит накладывать на образ. Это рассуждение иллюстрирует рисунок 6.

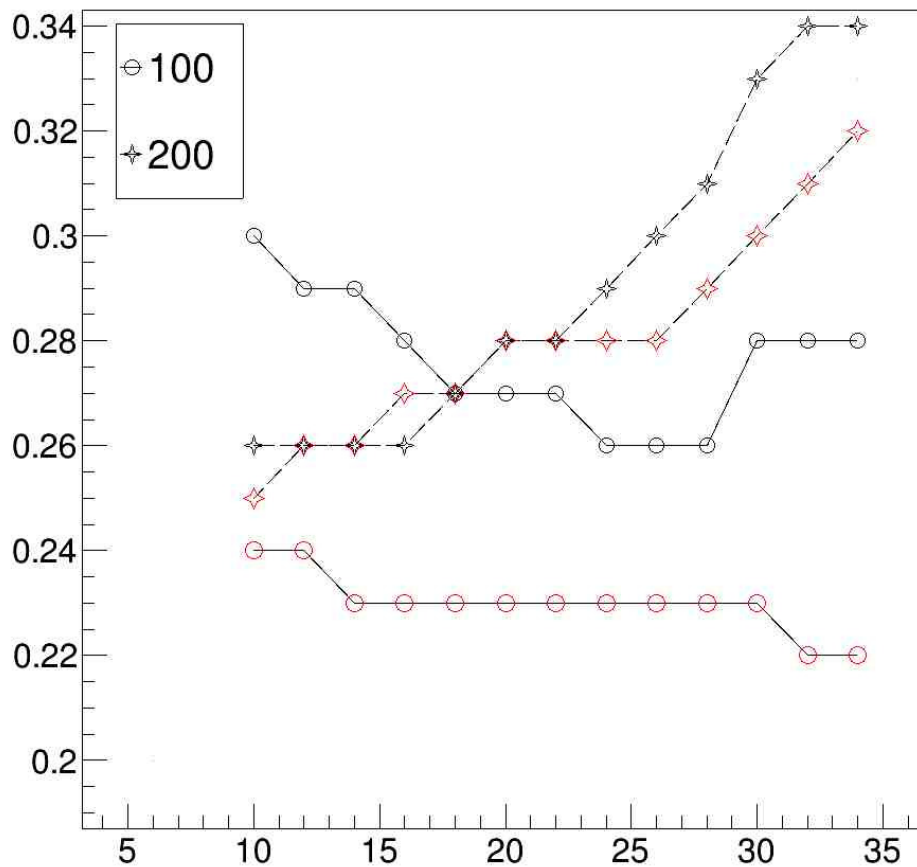


Рис. 6: Распределение вероятностей неправильной классификации первичной частицы в зависимости от абсолютного порога для двух расстояний от детектора до оси ливня. Чёрным обозначены ошибки классификации внутри пары протоны-ядро азота, красным – ошибки классификации пары ядра азота-ядро железа.

Из рисунка 6 видно, что для малых расстояний от детектора до оси ливня наименьшие ошибки классификации достигаются при достаточно больших порогах, а для больших расстояний – при малых порогах. Более точный подбор диапазонов расстояний показан в таблице 5.

Таблица 5: Зависимость вероятности неправильной классификации первичной частицы от абсолютного порога и расстояния от детектора до оси ливня на высоте полёта. p-N – максимум из вероятностей неправильной классификации первичной частицы в паре протоны-ядра азота, N-Fe – максимум из вероятностей неправильной классификации частицы в паре азот-железо

порог/расстояние	32		38		40		44		56	
	p-N	N-Fe	p-N	N-Fe	p-N	N-Fe	p-N	N-Fe	p-N	N-Fe
100 м	0.31	0.24	0.30	0.23	0.30	0.223	0.29	0.23	0.27	0.22
125 м	0.28	0.24	0.28	0.23	0.28	0.23	0.27	0.23	0.27	0.23
150 м	0.27	0.22	0.26	0.22	0.26	0.22	0.25	0.22	0.24	0.22
175 м	0.25	0.23	0.25	0.24	0.25	0.23	0.25	0.24	0.25	0.25
200 м	0.27	0.24	0.27	0.23	0.28	0.24	0.26	0.24	0.28	0.25

Из таблицы 5 видно, что вероятности неправильной классификации частицы, породившей ливень с осью, расположенной в диапазоне расстояний 100-150 м от детектора на высоте полёта, уменьшаются с ростом абсолютного порога. Для частиц, вызвавших ливень, ось которого проходит на расстоянии 175 м и 200 м от детектора, наилучшее качество разделения достигается при абсолютных порогах 40 и 44 фотоэлектрона соответственно. Поскольку для расстояния 175 м при переходе от порога 40 к порогу 44 качество разделения меняется незначительно, при необходимости можно использовать порог 44 для набора расстояний от оси ливня до детектора 175 м и выше. Важно отметить, что такое разделение расстояний на два диапазона сохраняется при любых рассмотренных энергиях и наклонах оси ливня. Также из таблицы 5 видно, что вероятность неправильной классификации первичной частицы внутри пары азот-железо меньше зависит от абсолютного порога, чем вероятность неправильной классификации внутри пары протоны-ядра азота. Это вызвано меньшим числом флуктуаций при развитии ливня, вызванного тяжёлой заряженной первичной частицей. При использовании одного из двух абсолютных порогов в зависимости от расстояния, удалось достичь достаточно малых вероятностей неправильной классификации первичной частицы, приведённых в таблице 6.

Таблица 6: Вероятности неправильной классификации первичной частицы, полученные при использовании абсолютного порога, зависящего от расстояния. pro – вероятность неверной классификации протона, p-N – вероятность классифицировать ядро азота как протон, N-Fe – вероятность классифицировать ядро азота как ядро железа, Fe – вероятность неправильной классификации ядра железа.

pro	p-N	N-Fe	Fe
0.30	0.28	0.28	0.28

Результаты, приведённые в таблице 6, сравнимы с результатами, полученными на установке СФЕРА-2, где вероятность неправильной классификации первичной частицы была равна 0.32[5].

7 Зависимость критерия от наклона и энергии

Были проанализированы ливни с двумя значениями энергии первичной частицы и с двумя наклонами оси ливня. Сравнение результатов приведено в таблице 7.

Таблица 7: Значения вероятностей неправильной классификации первичной частицы в зависимости от первичной энергии и наклона оси ливня.

Энергия	10 ПэВ		30 ПэВ	
Наклон	15°	20°	15°	20°
p-p	0.25	0.27	0.31	0.30
p-N	0.26	0.28	0.26	0.28
N-Fe	0.23	0.23	0.23	0.28
Fe	0.24	0.24	0.23	0.28

Из таблицы 7 видно, что наилучшие результаты достигаются при первичной энергии 10 ПэВ и наклоне оси 15°. При наклоне 20° и той же энергии ливень развивается выше и отдаляется от детектора, поэтому вероятности неправильной классификации пары протоны-ядра азота несколько увеличиваются. Для энергии 30 ПэВ аналогично: для ливней с наклоном оси 15° вероятность неправильной классификации первичной частицы меньше, чем для ливней с наклоном оси 20°. Также для ливней с первичной энергией 10 ПэВ вероятность неверной классификации меньше, чем для ливней с энергией 30 ПэВ.

Также из таблицы 7 видно, что результаты, полученные при моделировании детектора прямого света, сопоставимы с результатами, полученными при использовании установки СФЕРА-2, и даже превосходят их.

8 Двойная детекция

Для уменьшения вероятностей неправильной классификации была учтена информация, приходящая со второго детектора. Для того, чтобы при высоте полёта 500 м у обоих детекторов была информация о событии, необходимо, чтобы на высоте полёта ось ливня проходила в диапазоне от 100 м до 200 м от детектора, а на снегу ось ливня должна находиться в круге радиусом 230 м с центром в точке, в которую проецируется детектор. Расстояние до оси ливня на снегу вычисляется по максимуму образа в детекторе отражённого света [7]. Моделирование показывает, что двойная детекция возможна примерно для 0.39 событий [8]. Взаимное положение оси ливня и детектора иллюстрирует схема 7.

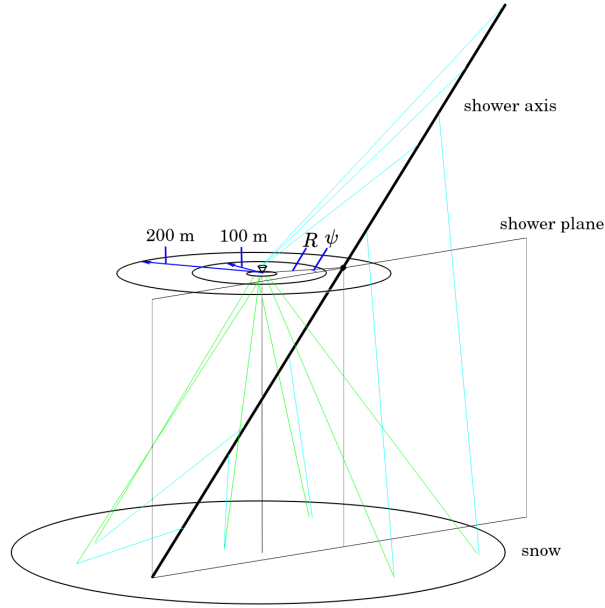


Рис. 7: Схема взаимного положения ливня и детектора, при котором возможна двойная детекция события.

То есть, каждому событию был поставлен в соответствие вектор из двух признаков: отношение интегралов по центральному кругу и внешнему кольцу для образа в нижнем телескопе и длина большой оси образа в верхнем детекторе. Таким образом, событие можно было рассматривать как точку в двумерном пространстве. Далее для пары событий протоны-ядра азота и азот-ядра железа была найдена при помощи перебора коэффициентов прямая вида $ax + b$, разделяющая их наилучшим образом, то есть, с наименьшей вероятностью неверной классификации первичной частицы. При этом также использовалась система критериев и зависящий от расстояния абсолютный порог, то есть, изначально события были разделены на группы в зависимости от расстояния от детектора до оси ливня и азимутального положения детектора, а затем внутри каждой группы была произведена классификация. На рисунке 8 приведены разделяющие прямые для одной группы событий.

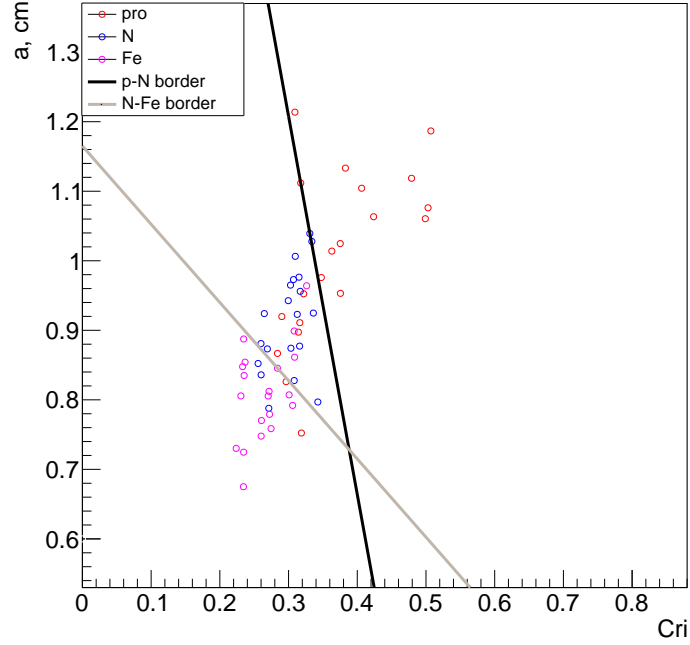


Рис. 8: Оптимальные разделяющие прямые для событий с расстоянием от детектора до оси ливня в диапазоне от 100 м до 112.5 м и азимутальным положением детектора в диапазоне от 0° до 15° . a – длина большой оси черенковского образа в детекторе прямого света, Cri – критерий образа в детекторе отражённого света.

9 Планы

Дальше планируется исследование черенковских образов при помощи более сложных параметров, например, параметров аппроксимации образа при помощи копулы. Пример такой аппроксимации приведён на рисунке 9. Также можно изучить отношения интегралов по различным областям образа.

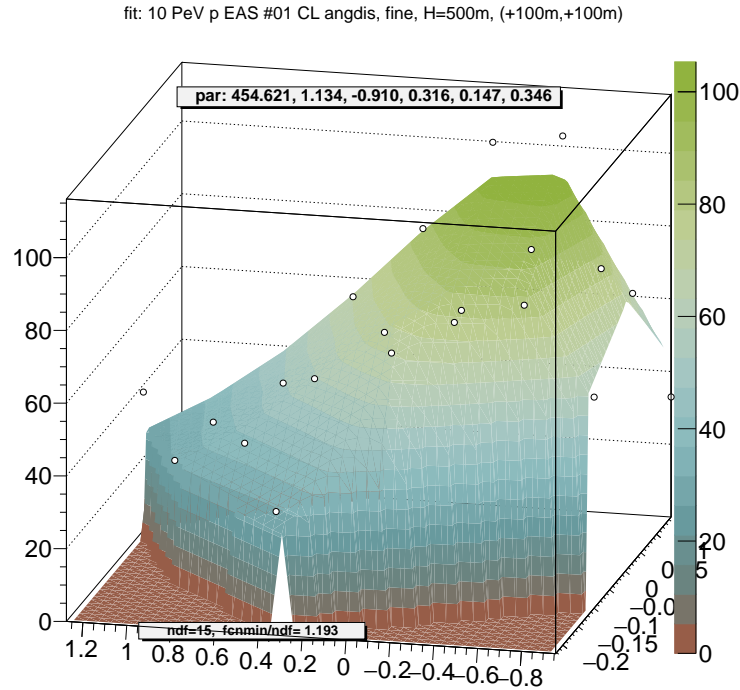


Рис. 9: Пример аппроксимации черенковского образа при помощи копулы

Список литературы

- [1] Thoudam S., Rachen J.P., Vliet A., Achterberg A. et al. // A&A. A33, 595. (2016). DOI: 10.1051/0004- 6361/201628894
- [2] Чудаков А.Е. // Возможный метод регистрации ШАЛ по черенковскому излучению, отраженному от заснеженной поверхности Земли // Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий: Материалы Всесоюз. симп., 19-23 июня 1972 г. Якутск. фил. Сиб. отд. АН СССР, 1974. С.69.
- [3] Antonov R.A., Beschapov S.P., Bonvech E.A. et al. // Journal of Physics: Conference Series, 409(1) 012088. (2013).
- [4] Чернов Д.В., Азра К.Ж., Бонвеч Е.А. и др. // Ядерная Физика. 85, № 6. 435 (2022).
- [5] Galkin V.I., Azra C.G., Bonvech E.A. et al. SPHERE-3: Tackling the Problem of Primary Cosmic Ray Mass Composition with a New Approach. Moscow Univ. Phys. 79 (Suppl 1), 384-391 (2024). <https://doi.org/10.3103/S002713492470111X>
- [6] Черкесова О.В, Галкин В.И. // Поиск критерия оценки массы первичных космических ядер по прямому черенковскому свету ШАЛ для телескопа СФЕРА-3 // Учёные записки физического факультета Московского университета. 2024. № 4. 2441606
- [7] D.V. Chernov, C.J. Azra, E.A. Bonvech, O.V. Cherkessova, E.L. Entina, V.I. Galkin, V.A. Ivanov, T.A. Kolodkin, N.O. Ovcharenko, D.A. Podgrudkov, T.M. Roganova, M.D. Ziva // Approaches to OPTimization of Experimental Design for Cosmic Rays Mass Composition

Studies in the 1-1000 PeV Energy Range // Physics of Atomic Nuclei // 2024, Vol. 87, Suppl, 2, pp S319-S338

- [8] E.A. Bonvech, D.V. Chernov, V.S. Latypova, C. Azra, V.I. Galkin, V.A. Ivanov, D.A. Podgrudkov, T.M. Roganova // The SPHERE Project: Developing a Technique for Reflected Cherenkov Light // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2024, Vol. 88, №3, pp 435-440