

Система локальных критериев для разделения ШАЛ по массам первичных частиц на основании длин большой оси образов в детекторе углового распределения черенковского света установки СФЕРА-3

О. В. Черкесова^{1,2,*}, В. И. Галкин^{1,2,†}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет космических исследований
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 52

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики космоса
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 08.06.2025; подписана в печать 03.03.2026)

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. Усовершенствован метод оценки массы первичной частицы по длине большой оси черенковского образа и создан метод классификации первичных частиц на основании данных детекторов прямого и отражённого света.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd. УДК: 524.1

Ключевые слова: обширные атмосферные ливни, черенковское излучение, моделирование методом Монте-Карло, оценка массы.

ВВЕДЕНИЕ

Серия экспериментов СФЕРА направлена на исследование массового спектра первичных космических частиц в диапазоне энергий 1–1000 ПэВ. В её основу лёг предложенный А.Е. Чудаковым метод детектирования отражённого от снежной поверхности черенковского света [1]. Установка предыдущего поколения СФЕРА-2 [2] регистрировала черенковский свет, отражённый от покрытого снегом льда озера Байкал [3], но после случайной регистрации прямого черенковского света было принято решение исследовать его информативность с точки зрения оценки массы первичной частицы. В ходе моделирования [4] было установлено, что, при использовании характеристик прямого черенковского света для классификации первичных частиц на три группы в зависимости от массы, можно получить результаты, сравнимые с результатами эксперимента СФЕРА-2 [5], поэтому установка СФЕРА-3 будет иметь детекторы как прямого, так и отражённого света. Поскольку данные, полученные при регистрации одного ШАЛ различными детекторами в достаточной мере независимы, использование критерия, основанного на данных обоих телескопов, снизит вероятность неправильной классификации первичной частицы. Эта статья посвящена разработке такого критерия.

1. ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ХОДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕТЕКТОРА ПРЯМОГО СВЕТА

Целью проекта СФЕРА является поиск параметров прямого и отражённого черенковского света, на осно-

ве которых можно построить регрессию, позволяющую приписать каждому ШАЛ конкретную массу первичной частицы. Для этого осуществляется моделирование развития широких атмосферных ливней при помощи CORSIKA [6] и расчёт прохождения вызванного ими черенковского света через линзу при помощи Geant4 [7]. В настоящий момент осуществляется классификация первичных частиц на три группы по массе на основании длины большой оси черенковского образа. При классификации пары протоны–ядра азота при длине большой оси, большей критической, частица считается протоном, иначе — ядром азота. При классификации пары ядра азота–ядра железа при длине большой оси, большей критической, частица считается ядром азота, иначе — ядром железа.

Поскольку длина большой оси является параметром формы, она слабо зависит от модели ядерного взаимодействия [8], но зависит от других параметров ШАЛ, например от энергии первичной частицы, наклона оси ливня, расстояния от детектора до оси ливня, азимутального положения детектора относительно оси ливня и абсолютного порога — числа фотоэлектронов на ячейку гистограммы, при превышении которого ячейка считается частью образа. Поэтому единого критерия для всех азимутальных положений недостаточно [4], как и системы критериев, зависящей только от азимутального положения детектора относительно оси ливня, так как использование такой системы приводит к большим вероятностям неправильной классификации первичной частицы: вероятность неправильной классификации пары протон–азот составляет 0.44–0.14, а пары азот–железо — 0.42–0.11.

Поскольку эти результаты несимметричны и некоторые из вероятностей неправильной классификации достаточно велики, было принято решение усложнить

* olga.v.cherkesova@yandex.ru

† v_i_galkin@mail.ru

систему критериев, добавив в неё информацию о расстоянии от детектора до оси ливня.

Таким образом была получена система критериев для двадцати четырёх азимутальных положений детектора и пяти диапазонов расстояний: 100.0–112.5 м, 112.5–137.5 м, 137.5–162.5 м, 162.5–187.5 м, 187.5–200.0 м. Шаг 25 м обусловлен тем, что информация о расстоянии от детектора до оси ливня передаётся от детектора отражённого света с погрешностью около 7 м.

Важно отметить, что при использовании дискретной обучающей выборки и непрерывной (под дискретной выборкой подразумевается выборка, в которой используется фиксированный набор координат оси ливня на высоте полёта детектора. В непрерывной выборке координаты оси могут быть любыми в пределах поля зрения детектора) тестовой для энергии первичной частицы 10 ПэВ вероятности неправильной классификации отличаются достаточно мало. Результаты для 30 ПэВ существенно отличаются: на обучающей выборке ошибки пары протон-азот составляют 0.23, азот-железо — 0.24. На тестовой же выборке ошибки равны 0.13–0.64 для пары протон-азот и 0.14–0.46 для пары азот-железо.

Эти вероятности несимметричны, а часть из них достаточно велика, поэтому было принято решение делать и обучающую, и тестовую выборки непрерывными, что незначительно улучшило результаты. После этого изменения ошибки классификации стали следующими: 0.38–0.25 для пары протон-азот и 0.53–0.07 для пары азот-железо.

При использовании одного абсолютного порога для всех расстояний не удаётся добиться вероятностей неправильной классификации, меньших 0.3, поскольку количество света в образе существенно зависит от расстояния от детектора до оси ливня и поэтому при применении одного порога к различным расстояниям будут возникать большие ошибки. Поэтому было принято решение использовать различные абсолютные пороги, поскольку использование относительных порогов не дало удовлетворительных результатов: ошибки классификации составляли около 0.4.

Количество света в черенковском образе существенно зависит от расстояния от детектора до оси ливня: чем оно меньше, тем больше света в образе и тем более высокий порог следует использовать. Это рассуждение иллюстрирует табл. 1.

Видно, что для малых расстояний от детектора до оси ливня минимум вероятности неправильной классификации первичной частицы достигается при использовании больших порогов, для больших расстояний — достаточно маленьких.

Из табл. 1 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 де-

тектора, 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 табл. 1 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 табл. 2.

Результаты, приведённые в табл. 2, сравнимы с результатами, полученными на установке СФЕРА-2, где вероятность неправильной классификации первичной частицы была равна 0.32 [9].

2. ДВОЙНАЯ ДЕТЕКЦИЯ

Как было сказано выше, данные, полученные от различных детекторов при регистрации одного события, имеют высокую степень независимости, что позволяет надеяться на уменьшение вероятности неправильной классификации при использовании критерия, зависящего и от параметров прямого, и от параметров отражённого света. Такой критерий был создан и проанализирован.

Сначала были отобраны события, которые находятся в поле зрения обоих детекторов. Для этого нужно, чтобы на высоте полёта 500 м ось ливня проходила в диапазоне от 100 м до 200 м от детектора, а на снегу ось ливня должна находиться в круге радиусом 175 м с центром в точке, куда проецируется детектор. Положение оси на снегу определяется по максимуму образа [10]. Событий, которые могут зарегистрировать оба детектора, примерно 0.39 от всех событий для высоты полёта 500 м [8]. Затем каждому такому событию был поставлен в соответствие двумерный вектор признаков, состоящий из отношения интегралов по внутреннему кругу и внешнему кольцу в нижнем детекторе и длины большой оси в верхнем телескопе. При этом учитывались результаты, полученные при анализе длины большой оси. Затем при помощи перебора коэффициентов были найдены прямые, наилучшим образом разделяющие классы. Пример таких прямых приведён на рис. 1.

Таблица 1. Вероятности неправильной классификации первичной частицы при использовании различных абсолютных порогов: 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	0.22	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

Таблица 2. Вероятности неправильной классификации первичной частицы для различных энергий и наклонов оси ливня, полученные при использовании абсолютного порога, зависящего от расстояния. p — 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

Энергия	10 ПэВ		30 ПэВ	
	15°	20°	15°	20°
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

Использование двойной детекции сокращает вероятность неправильной классификации до значений, приведённых в табл. 3.

Таблица 3. Вероятности неправильной классификации первичной частицы, полученные при использовании двойной детекции. p — 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	p-N	N-Fe	Fe
0.22	0.15	0.19	0.14

Из табл. 3 видно, что использование двойной детекции существенно уменьшает вероятность неправильной классификации первичной частицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе разработки метода классификации первичных частиц на основании совместных данных детекторов прямого и отражённого света был существенно улучшен метод оценки массы первичной частицы по данным телескопа прямого черенковского света, что позволило добиться вероятности неправильной классификации первичной частицы не более 0.31, что лучше, чем результаты, полученные на установке СФЕРА-2, которые составляют 0.33. Созданный метод совместной обработки данных позволил уменьшить вероятность неправильной классификации первичной частицы до 0.22.

Авторы выражают благодарность Российскому Научному Фонду (грант РНФ №23-72-00006) за поддержку работы.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [11].

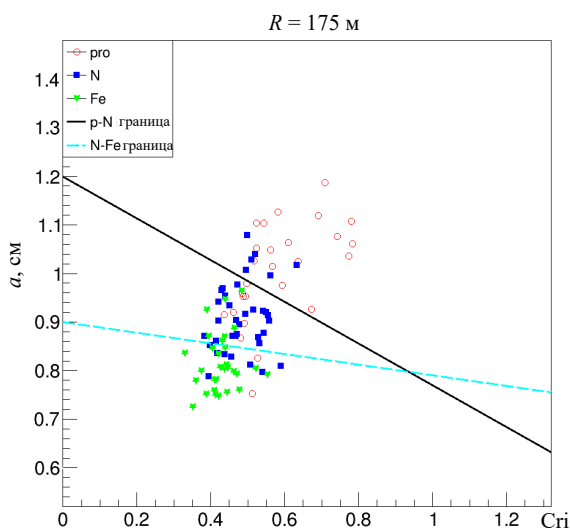


Рис. 1. Пример классификации первичных частиц при использовании двойной детекции. a — длина большой оси, Cg1 — отношение интегралов по внутреннему кругу и внешнему кольцу образов в детекторе отражённого света

- [1] Чудаков А.Е. // Материалы Всесоюз. симп., 19–23 июня 1972 г. Якутск. фил. Сиб. отд. АН СССР с. 69 (1974).
- [2] Antonov R.A., Bonvech E.A., Chernov D.V. et al. *Astroparticle Physics*. **121**. 102460 (2020).
- [3] Bonvech E., Chernov D., Finger M. et al. // *Universe*. **8(1)**, 46 (2022).
- [4] Черкесова О.В., Галкин В.И. // Учёные записки физического факультета Московского университета. № 4. 2441606 (2024).
- [5] Антонов Р.А., Бесшапов С.П., Бонвеч Е.А. и др. // Реконструкция спектра всех ядер и исследование ядерного состава ПКЛ в эксперименте СФЕРА // Изв. РАН. Серия физическая. **77**, № 11. 1564 (2013).
- [6] Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. // FZKA-6019 (1998).
- [7] Agostinelli S. et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A* **506** 250 (2003).
- [8] Бонвеч Е.А., Чернов Д.В., Латыпова В.С. и др. // Изв. РАН. Серия физическая. **88**, № 3. 512 (2024).
- [9] Galkin V.I., Azra C.G., Bonvech E.A. et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **79 (Suppl 1)**, 384 (2024).
- [10] Chernov D.V., Azra C.J., Bonvech E.A. et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. **87**, Suppl. 2. S319 (2024).
- [11] Voevodin V.I., Antonov A., Nikitenko D. et al. // Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale

A system of local criteria for separating EAS by primary particle masses based on the lengths of the major axis of images in the Cherenkov light angular distribution detector of the SPHERE-3 facility

O. V. Cherkesova^{1,a}, V. I. Galkin^{2,b}

¹*Faculty of Cosmic Research, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

²*Department of Space Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^aolga.v.cherkesova@yandex.ru, ^bv_i_galkin@mail.ru

The planned SPHERE-3 installation, unlike the SPHERE-2 installation, will have not only a telescope of reflected Cherenkov light, but also a detector that records the angular distribution of direct Cherenkov light. In this paper, the length of the major axis of the Cherenkov image is considered as a parameter sensitive to the mass of the primary particle. A method for estimating the mass of a primary particle based on the length of the major axis of the Cherenkov image has been improved, and a method for classifying primary particles based on data from direct and reflected light detectors has been created.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd

Keywords: extensive air showers, Cherenkov light, Monte Carlo simulation, mass estimate.

Received 08 June 2025.

Сведения об авторах

1. Черкесова Ольга Викторовна — студентка; тел. (495) 939-36-06, e-mail: olga.v.cherkesova@yandex.ru.
2. Галкин Владимир Игоревич — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел. (495) 939-36-06, e-mail: v_i_galkin@mail.ru.