

Анализ угловых распределений прямого черенковского света детектором установки СФЕРА-3

Н. О. Овчаренко,* В. И. Галкин†

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

(Поступила в редакцию 06.06.2024; подписана в печать 22.07.2024)

В этой статье мы исследуем возможности детектора прямого черенковского света на разрабатываемой в данный момент установке СФЕРА-3 для задачи разделения широких атмосферных ливней по массе первичной частицы. Для этого мы изучаем угловые распределения света в детекторе и выявляем различия в их форме для ядер водорода, азота и железа. Форма распределений анализируется несколькими способами: введением пороговых значений и аппроксимацией двумерным распределением Гаусса. В качестве параметра разделения по массе используется большая ось распределения. Мы сравниваем эффективность данного параметра для этих способов, а также для интегрального и точечного критериев и при различной частоте сетки, на которой задаётся угловое распределение. В заключении мы обсуждаем дальнейшие планы по улучшению аппроксимации и поиска других чувствительных к массе параметров.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd

УДК: 524.1

Ключевые слова: первичные космические лучи, широкие атмосферные ливни, черенковский свет, статистическое моделирование, оценка первичной массы.

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление массового состава первичного космического излучения с энергиями от 10^{15} эВ — важная задача современной физики космических лучей. Получение парциальных спектров первичных ядер разной массы может способствовать уточнению моделей ускорения и распространения частиц в Галактике. В связи с низкой интенсивностью первичных частиц высоких энергий их исследование проводится косвенными методами — например, посредством изучения широких атмосферных ливней (ШАЛ).

СФЕРА — это серия экспериментов по регистрации отражённого от снега черенковского света от ШАЛ. Преимущества детекции черенковского излучения состоят в том, что число черенковских фотонов значительно превышает число частиц ливня, а большая часть света сконцентрирована вдоль оси ШАЛ, что даёт возможность отследить направление прихода ливня. Регистрация отражённого света с помощью небольшого детектора, поднятого в воздух, — идея, предложенная А. Е. Чудаковым в 1972 году [1], — позволяет получить свет с большой площади, сравнимой с площадью наземных установок, и увидеть приосевую область распределения света, чувствительную к массе первичной частицы.

Для предыдущего эксперимента СФЕРА-2, в 2008–2013 гг. проводившего измерения над заснеженной поверхностью льда озера Байкал, уже решалась задача определения массы первичной частицы ШАЛ по форме

пространственного распределения приходящего в детектор света [2]. В качестве параметра для разделения по массам использовалось отношение интеграла функции распределения света по области центрального круга радиуса r_1 к интегралу по кольцевой области с внутренним радиусом r_1 и внешним радиусом r_2 .

1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЯМОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА ДЕТЕКТОРОМ СФЕРА-3

В данный момент ведётся разработка эксперимента СФЕРА-3 [3]. Для нового детектора ожидается понижение энергетического порога регистрации событий в 3–5 раз по сравнению с детектором СФЕРА-2, что позволит увеличить банк событий до 10 раз за равное время экспозиции, а также увеличение времени экспозиции за счёт применения беспилотного летательного аппарата, тогда как предыдущие установки поднимались в воздух с помощью аэростата [4]. Но ключевое отличие — наличие детектора прямого света наравне с отражённым. Поэтому сейчас мы хотим выяснить возможности регистрации прямого света для разделения ливней по первичным массам, а в дальнейшем и совместной регистрации прямого и отражённого света. Для СФЕРЫ-2 удалось добиться ошибок разделения около 30% [2], и для будущего эксперимента ожидается улучшение этих результатов, то есть уменьшение ошибок как за счет оптимизации детектора отраженного света, так и с помощью независимых измерений тех же событий в прямом свете.

В данной работе исследуются возможности угловых распределений прямого черенковского света до его прохождения через детектор. Получаемые в этом случае ошибки разделения первичных масс неизбежно бу-

* ovcharenko.no19@physics.msu.ru

† v_i_galkin@mail.ru

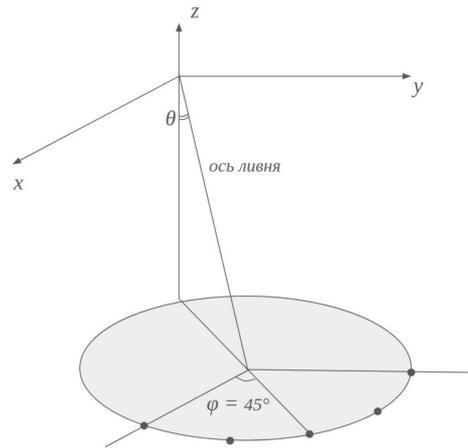


Рис. 1. Положение детектора относительно оси ливня

дуг меньше, чем аналогичные ошибки, вычисленные по образам в будущем детекторе прямого света, они будут служить ориентиром, к которому надо стремиться при разработке этого детектора.

Угловые распределения света получены с помощью кода CORSIKA [5, 6]. Детектор располагается на высоте 500 м, имеет площадь 1 дм² и поле зрения 50° × 50°. Распределение задаётся на сетке 100 × 100 с ячейкой 0.5° × 0.5°. Расположение детектора относительно оси ливня определяется углом азимута φ и расстоянием R . Детектор видит ливень сбоку, поэтому пятно в поле зрения детектора вытянуто и повёрнуто относительно осей детектора. В качестве параметра, с помощью которого будет проводиться разделение по массам, был выбран один из параметров Хилласа [7] — длина большой оси распределения [8–10]. Ориентация распределения зависит от взаимного расположения оси ливня и детектора, поэтому для оценки длины его большой оси нужно повернуть распределение так, чтобы его оси были параллельны осям детектора, угол поворота находится по формуле

$$\psi = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_{x^2} - \sigma_{y^2}},$$

где $\sigma_{xy}, \sigma_{x^2}, \sigma_{y^2}$ — вторые центрированные моменты распределения до поворота.

Разделение по массам проводилось на основе смоделированных распределений от ядер водорода, азота и железа, по 120 событий для каждого ядра. Были выбраны несколько положений детектора на постоянном расстоянии $R = 140$ м от оси ливня, но с различными азимутами. Зенитный угол для всех ливней $\theta = 15^\circ$ (рис. 1).

2. АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Параллельно рассматриваются два способа анализа угловых распределений света с целью разделения событий по первичной массе для выбранного параметра

ра — длины большой оси: 1) расчет первых и вторых моментов распределения и 2) аппроксимация распределения какой-либо двумерной модельной плотностью. Первый способ просто реализуется, второй потенциально более информативен, поскольку адекватный выбор модельной плотности позволяет точнее воспроизвести распределение и лучше выбрать критериальный параметр для разделения по массам.

2.1. Анализ без аппроксимации

Для анализа без аппроксимации мы вводили некоторое пороговое значение количества фотонов в ячейке. Если число фотонов в рассматриваемой ячейке меньше порога, то точка отбрасывается из рассмотрения, а если число фотонов превышает порог, то ячейка учитывается для вычисления моментов. Использование нескольких значений порога — простой способ выявить различия в форме распределения для разных ядер.

Порог может быть относительным и абсолютным. Относительный порог зависит от конкретного распределения: необходимо найти максимум распределения, то есть ячейку с наибольшим количеством фотонов, и от этого максимального значения взять долю в несколько процентов (мы рассматривали 1%, 3%, 5%, 7% и 10%). Абсолютный порог — некоторое постоянное значение, одинаковое для всех распределений (мы рассматривали 1, 2, 3, 5, 7, 10 и 12 фотонов). На практике относительный и абсолютный пороги близки по величине.

Моменты повёрнутого распределения вычисляются на основе моментов неповёрнутого распределения и угла поворота:

$$a_1 = \sigma_{x^2} \cdot \cos^2(\psi) + 2\sigma_{xy} \cdot \sin(\psi) \cdot \cos(\psi) + \sigma_{y^2} \cdot \sin^2(\psi),$$

$$a_2 = \sigma_{y^2} \cdot \cos^2(\psi) - 2\sigma_{xy} \cdot \sin(\psi) \cdot \cos(\psi) + \sigma_{x^2} \cdot \sin^2(\psi).$$

Здесь $a = \max\{a_1, a_2\}$ — длина большой оси распределения, на основе которой мы строим критерий.

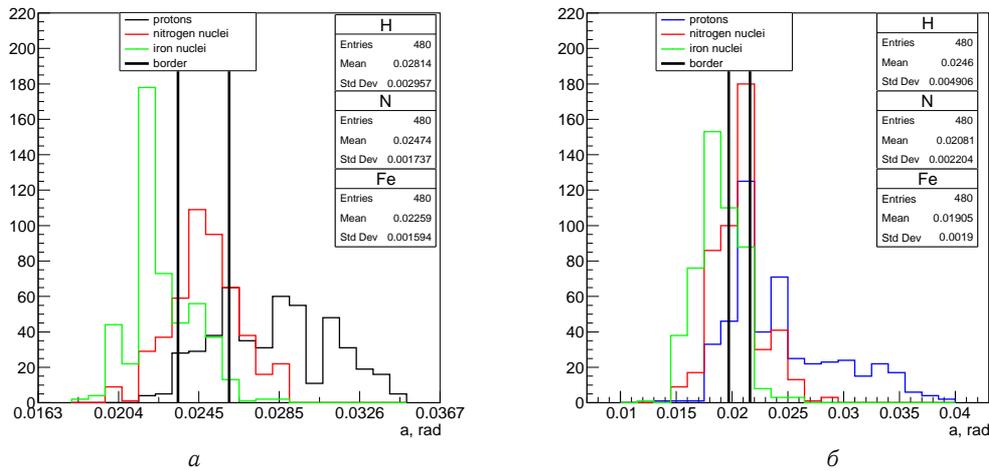


Рис. 2. Распределение длин больших осей для разных масс при абсолютном пороге 3 фотона (а) и при относительном пороге 3% (б)

Таблица 1. Ошибки разделения по массам при различных значениях абсолютного порога для интегрального критерия по кругу

	p-N			N-Fe		
порог	граница	ошибка p	ошибка N	граница	ошибка N	ошибка Fe
1	0.0355	0.32	0.31	0.0331	0.25	0.27
2	0.0291	0.28	0.28	0.0269	0.26	0.26
3	0.0260	0.26	0.23	0.0234	0.21	0.25
5	0.0218	0.26	0.28	0.0202	0.24	0.25
7	0.0205	0.23	0.22	0.0182	0.30	0.30
10	0.0179	0.33	0.24	0.0159	0.19	0.35
12	0.0173	0.25	0.15	0.0154	0.35	0.37

Таблица 2. Ошибки разделения по массам при различных значениях относительного порога для интегрального критерия по кругу

	p-N			N-Fe		
порог	граница	ошибка p	ошибка N	граница	ошибка N	ошибка Fe
1%	0.0301	0.35	0.36	0.0281	0.36	0.35
3%	0.0216	0.34	0.37	0.0197	0.27	0.33
5%	0.0193	0.33	0.34	0.0172	0.29	0.32
7%	0.0173	0.36	0.27	0.0152	0.40	0.35
10%	0.0162	0.44	0.18	0.0139	0.38	0.24

2.2. Интегральный и точечный критерии

На рис. 2 приведены гистограммы параметра *a* для ядер различной массы при разных порогах. Для разделения по массам необходимо провести границу между ними так, чтобы ошибки классификации были минимальны (положение границы в каждом случае указано в таблицах 1–9). Изначально мы попробовали построить единый критерий, независимый от положения детектора, поэтому использовали распределения в четырёх точках с азимутами через 90° начиная с 45°. По-

лученные ошибки разделения приведены в табл. 1–2. Большие значения ошибок (порядка 40–50%) в нижних строчках объясняются тем, что при максимальных порогах в расчёт принимаются значения не более 10 ячеек, и расчёт большой полуоси оказывается неточным. Такая тенденция наблюдается для обоих типов порогов для всех дальнейших результатов.

После этого мы попробовали рассмотреть более ограниченный набор положений детектора с азимутами в первой четверти: были выбраны пять точек с азимутами от 0° до 90°. Это позволило уменьшить ошибки (см. табл. 3–4), поэтому можно предположить, что

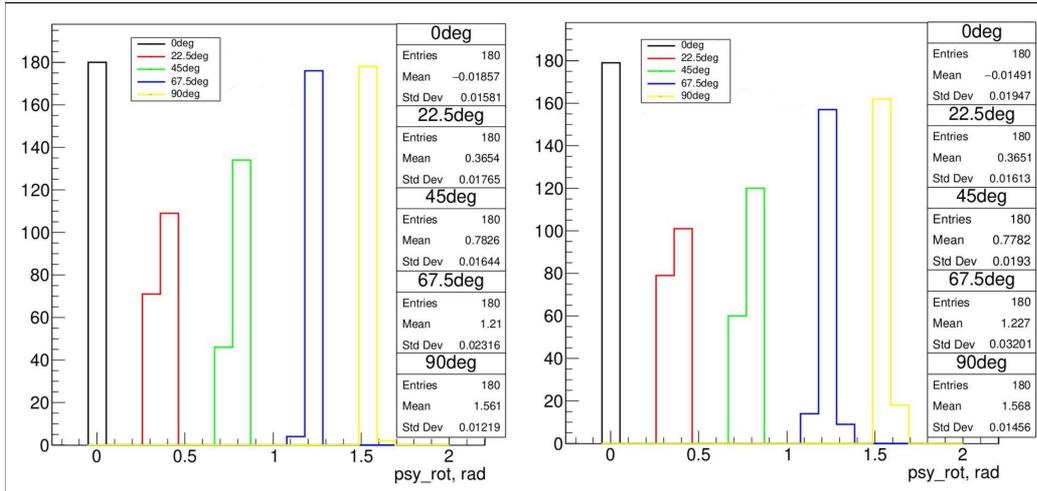


Рис. 3. Разделение по азимутам при абсолютном пороге 5 фотонов (слева) и относительном пороге 3 % (справа)

примерное знание азимута позволит улучшить разделение по массам.

Как видно из рис. 3, угол большой оси образа относительно оси x хорошо коррелирует с азимут (коэффициент корреляции $r = 0.9995$), что даёт возможность построить отдельные критерии в зависимости от положения детектора. В качестве иллюстрации, в табл. 5–6 приведены ошибки разделения по массам для одного положения детектора с азимут 315° : несмотря на меньшую статистику, ошибки разделения уменьшились.

2.3. Анализ с аппроксимацией

На данный момент лучшая найденная нами функция, аппроксимирующая угловое распределение черенковского света, выглядит следующим образом:

$$F(x, y) = p_0 \times \exp \left[-\frac{(x - p_1)^2}{p_2^2} - \frac{(y - p_3)^2}{p_4^2} - \frac{2p_5 \cdot (x - p_1) \cdot (y - p_3)}{p_2 \cdot p_4} \right]$$

В случае такой аппроксимации длина большой оси находится как

$$a = \max\{p_2, p_4\}.$$

$\frac{\chi^2}{n}$ (где n — число степеней свободы) для такой аппроксимации составляет до 24.73 (рис. 4), это минимальное значение среди рассмотренных нами функций.

В табл. 7 приведены ошибки разделения ядер по массам для этой аппроксимации, и можно видеть, что разделение гораздо хуже, чем в отсутствие аппроксимации. Корреляция углов также заметно хуже, чем показанная в предыдущем разделе ($r = 0.2767$). Это говорит о том, что найденная аппроксимирующая функция плохо описывает имеющееся распределение, что подтверждается следующим наблюдением:

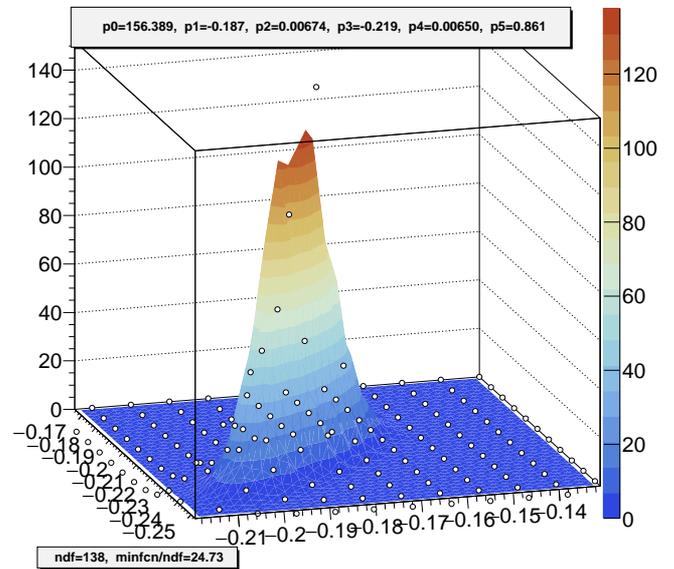


Рис. 4. Пример аппроксимированного распределения. Белые точки — данные, цветная поверхность — аппроксимация

при каждом положении детектора от одного до трёх событий из статистики предлагали параметры распределения, резко отличающиеся от параметров остальных событий. На рис. 4 также заметно, что данная аппроксимация может указать примерное положение пика, но неспособна точно описать его высоту и форму, которая характеризуется асимметрией относительно малой оси. Поэтому более полезным может быть обратиться к логнормальному распределению, а также бета- и гамма-распределениям. В любом случае, необходимо продолжать поиск аппроксимирующей функции, так как аппроксимация,

Таблица 3. Ошибки разделения по массам при различных значениях абсолютного порога для интегрального критерия по первой четверти

порог	p-N			N-Fe		
	граница	ошибка p	ошибка N	граница	ошибка N	ошибка Fe
3	0.0252	0.25	0.24	0.0233	0.25	0.21
5	0.0218	0.26	0.26	0.0200	0.24	0.31

Таблица 4. Ошибки разделения по массам при различных значениях относительного порога для интегрального критерия по первой четверти

порог	p-N			N-Fe		
	граница	ошибка p	ошибка N	граница	ошибка N	ошибка Fe
1%	0.0297	0.31	0.30	0.0274	0.33	0.33
3%	0.0217	0.30	0.30	0.0199	0.35	0.35

Таблица 5. Ошибки разделения по массам при различных значениях абсолютного порога в точке с азимутом 315°

порог	p-N			N-Fe		
	граница	ошибка p	ошибка N	граница	ошибка N	ошибка Fe
3	0.0255	0.23	0.24	0.0249	0.19	0.26
5	0.0217	0.22	0.28	0.0203	0.24	0.23

Таблица 6. Ошибки разделения по массам при различных значениях относительного порога в точке с азимутом 315°

порог	p-N			N-Fe		
	граница	ошибка p	ошибка N	граница	ошибка N	ошибка Fe
1%	0.0306	0.34	0.34	0.0286	0.39	0.38
3%	0.0218	0.37	0.36	0.0217	0.27	0.33

Таблица 7. Ошибки разделения по массам для аппроксимации в точке с азимутом 315°

p-N			N-Fe		
граница	ошибка p	ошибка N	граница	ошибка N	ошибка Fe
0.0185	0.62	0.12	0.0154	0.23	0.27

Таблица 8. Ошибки разделения по массам на разных сетках для относительного порога 1% в точке с азимутом 315°

сетка	p-N			N-Fe		
	граница	ошибка p	ошибка N	граница	ошибка N	ошибка Fe
грубая	0.0418	0.38	0.42	0.0410	0.37	0.37
частая	0.0306	0.34	0.34	0.0286	0.39	0.38
сверхчастая	0.0265	0.32	0.35	0.0245	0.27	0.25

Таблица 9. Ошибки разделения по массам на разных сетках для абсолютного порога 5 фотонов в точке с азимутом 315°

сетка	p-N			N-Fe		
	граница	ошибка p	ошибка N	граница	ошибка N	ошибка Fe
грубая	0.0296	0.30	0.38	0.0287	0.07	0.48
частая	0.0217	0.22	0.28	0.0203	0.24	0.23
сверхчастая	0.0136	0.25	0.23	0.0128	0.23	0.15

несмотря на некоторую потерю данных в отдельно взятом событии, позволяет выявить более общие закономерности при наборе достаточной статистики.

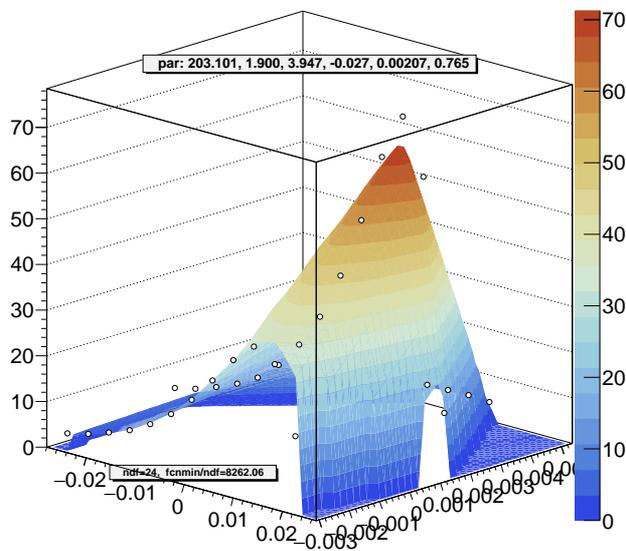


Рис. 5. Пример аппроксимации с помощью копула-функции

На рис. 5 приведён пример альтернативной аппроксимации: нормальное распределение по переменной x с помощью нормальной копулы [11] соединено с гамма-распределением по y . Такая аппроксимация отражает асимметричную форму распределения со смещённым от центра пятна положением максимума.

3. ВЛИЯНИЕ ШАГА СЕТКИ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАССИФИКАЦИИ

Результаты выше приведены для сетки с ячейкой $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Изначально предполагалось, что ячейка сетки детектора будет иметь размер $1^\circ \times 1^\circ$, но для улучшения критерия удалось получить распределения ещё на двух вариантах сетки: частая — с ячейкой $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ и сверхчастая — с ячейкой $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Пример результатов разделения по массам на сетках с различной

частотой приведены в табл. 8–9. Видно, что ошибки разделения уменьшаются с уменьшением ячейки для всех ядер и порогов, ошибки более 40% на сверхчастой сетке практически исчезают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент наилучшее разделение ливней по массе первичной частицы достигается без аппроксимации, с помощью непосредственного подсчёта моментов распределения света на сетке детектора. Наименьшие ошибки получены для точечного критерия с помощью абсолютного порога на сверхчастой сетке. Мы пока будем продолжать рассматривать относительный порог наравне с абсолютным, но от более грубых сеток можно отказаться.

Тем не менее, это только первая попытка добиться разделения, используя достаточно очевидную аппроксимирующую функцию и простейший параметр — длинную ось распределения. Возможности усовершенствования аппроксимирующей функции обсуждались в прошлом разделе, и задача на ближайшее время: подобрать асимметричную двумерную модель, наилучшим образом описывающую угловое распределение прямого черенковского света. Критериальные параметры тоже можно пробовать разные — главное, чтобы они основывались на форме распределения света. В частности, на СФЕРЕ-2 [2] для отражённого света и на проекте «Памир-XXI» [12, 13] для прямого использовали критерии на основе интегрирования по различным областям распределения света.

Благодарности

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

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М. В. Ломоносова [14].

[1] Чудаков А.Е. Возможный метод регистрации ШАЛ по черенковскому излучению, отражённому 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.
[2] Латыпова В.С., Галкин В.И. // Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. № 4, 2341604 (2023).

[3] Antonov R.A., Beschapov S.P., Bonvech E.A. et al. // J. 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] Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers. Forschungszentrum Karlsruhe 1998. FZKA 6019.
[6] Иванов В.А., Галкин В.И. // Ученые записки физическо-

- го ф-та Московского ун-та. № 6. 2360802 (2023).
- [7] *Hillas A.* // Cherenkov light images of EAS produced by primary gamma, in: Proc.19th I.C.R.C. (La Jolla), **3**. 445 (1985).
- [8] *Puhlhofer G., Bolz O., Gotting N.* et al. (HEGRA Collaboration) // *Astropart. Phys.* **20**(3). (2003).
- [9] *Hinton J.A.* // *New Astron. Rev.* **48** (2004).
- [10] *Ferenc D., for the MAGIC Collaboration* // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 553 (2005).
- [11] *Фантазицини Д.* // *Прикладная эконометрика* **2**(22). 98 (2011).
- [12] *Галкин В.И., Борисов А.С., Бахромзод Р.* и др. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* N 2. (2018).
- [13] *Батраев В.В., Галкин В.И.* // *УЗФФ МГУ.* № 3. 1830202 (2018).
- [14] *Voevodin V.I., Antonov A., Nikitenko D.* et al. // *Journal: Supercomputing Frontiers and Innovations.* **6**, N 2 4 (2019).

Analysis of the angular distributions of the direct Cherenkov light by the SPHERE-3 detector

N. O. Ovcharenko^{1,a}, V. I. Galkin^{1,b}

¹*Department of Space Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^aovcharenko.no19@physics.msu.ru, ^bglk@dec1.sinp.msu.ru

In the present article we study the capability of a detector of the direct Cherenkov light intended for the future SPHERE-3 detector which is to separate the extensive air shower by the primary particle mass. For the purpose we analyze the angular distributions of light in detector and reveal the differences of their shapes for hydrogen, nitrogen and iron nuclei. Distribution shape are treated a few ways: with the use of threshold values and by approximating them with normal distribution. The length of the distribution long axis is used as a parameter for the mass separation. We compare the efficiency of the parameter for the methods considered as well as for the integral and local criteria for different grid pitches of the angular distribution. In the conclusion we discuss the future plans to improve the approximation and to search for the other sensitive mass parameters.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd

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

Received 06 June 2024.

Сведения об авторах

1. Овчаренко Наталья Олеговна — студент; тел.: (495) 939-36-06, e-mail: ovcharenko.no19@physics.msu.ru.
2. Галкин Владимир Игоревич — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (495) 939-36-06, e-mail: vi.galkin@physics.msu.ru.