

ОЦЕНКА ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ ПО УГЛОВОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ СФЕРА-3

© 2025 г. Е. А. Бонвеч^{1,*}, Н. О. Овчаренко^{1,2}, О. В. Черкесова^{1,3}, Е. Л. Энтина¹,
В. И. Галкин^{1,2}, Д. В. Чернов¹, В. А. Иванов^{1,2}, Т. А. Колодкин^{1,2},
Д. А. Подгрудков^{1,2}, Т. М. Роганова¹, М. Д. Зива^{1,4}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт
ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова», Физический факультет, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова», Факультет космических исследований, Москва, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова», Факультет вычислительной математики и
кибернетики, Москва, Россия

*E-mail: bonvech@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.12.2024 г.

После доработки 14.02.2025 г.

Принята к публикации 28.02.2025 г.

Представлены некоторые планы дальнейшего развития эксперимента СФЕРА. Обсуждается необходимость введения дополнительного направленного в зенит детектора углового распределения черенковского света. Он функционирует только в паре с основным телескопом отраженного света, но дает возможность получить важную информацию о направлении и массе первичной частицы. Описываются конструкция и возможности детектора, раскрываются основы алгоритмов определения направления, показывается чувствительность к массе первичной частицы.

Ключевые слова: широкий атмосферный ливень, черенковский свет, моделирование Монте-Карло, первичные космические лучи

DOI: 10.31857/S0367676525060317

ВВЕДЕНИЕ

Метод регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) по черенковскому свету, отраженному от снежной поверхности, был предложен А.Е. Чудаковым в 1972 г. [1]. Он был неоднократно реализован в экспериментах [2–5]. В настоящее время планируется новый эксперимент серии СФЕРА [6], основной целью которого является уточнение массового состава первичных космических ядер в диапазоне энергий 1–1000 ПэВ. Ставший уже привычным для таких экспериментов зеркальный телескоп отраженного черенковского света оптимизируется именно под эту задачу и будет дополнен детектором для регистрации угловых распределений света. Расчеты показывают, что новый детектор даст возможность определять направление пер-

вичной частицы, а также оценивать ее массу не хуже, чем телескоп отраженного света. В случае одновременной регистрации ливня обоими детекторами точность оценки всех первичных параметров заметно выше.

ДЕТЕКТОР ПРЯМОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА

Детектор прямого света должен регистрировать угловое распределение в деталях, достаточных для разделения событий ШАЛ по массе первичного ядра. В то же время, получаемые с его помощью данные должны быть пригодны для оценки направления прихода ШАЛ. Были рассмотрены два варианта детектора. Оба представляют собой собирающую линзу и расположенный на ее фокальной поверхности позиционно-

чувствительный фотосенсор. Первый вариант оснащен небольшой линзой площадью 100 см^2 с фокусным расстоянием 10.3 см, второй — 400 см^2 и 64 см, соответственно. В первом случае поле зрения $30^\circ \times 30^\circ$ обеспечивается одной линзой, во втором — детектор должен состоять из нескольких (7 или 19) одинаковых сегментов, расположенных в гексагональной сетке того же поля зрения. На данном этапе был полностью проанализирован только вариант с одной линзой, показанный на рис. 1.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для моделирования искусственных событий ШАЛ используется код CORSIKA 7.7500 [7], как описано в [8]. Вычисления по коду CORSIKA проводятся на суперкомпьютере «Ломоносов-2» МГУ [9]. На основании искусственных событий ШАЛ с помощью пакета Geant4 [10] генерируются черенковские образы в телескопе отраженного света и в детекторе углового распределения прямого черенковского света.

ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЯ ОСИ ШАЛ ПО ПРЯМОМУ ЧЕРЕНКОВСКОМУ СВЕТУ

Определение направления прихода ШАЛ по прямому черенковскому свету выполняли по угловому распределению прямого черенковского света и по черенковским образам в идеальном детекторе прямого света без учета помех электроники. В обоих случаях направление прихода оценивали двумя способами: по положению максимума светового пятна и по положению центра масс светового пятна. Прямое черенковское распределение света несимметрично, поэтому максимум и центр тяжести смещены относительно

первичного направления прихода и друг от друга. Первичное направление, максимум и центр тяжести лежат на одной прямой в определенном порядке. С одной стороны, это вносит систематическую ошибку в оценку направления прихода, которая зависит от расстояния от оси ливня до детектора. С другой стороны, это позволяет ввести поправку, основанную на смещении максимума светового пятна и центра масс по отношению к направлению оси. С применением этой поправки оценка направления прихода может достичь точности, представленной в табл. 1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫМ МЕТОДОМ

Одним из подходов к дизайну детектора прямого черенковского света в мобильной установке является использование кодирующей маски — предварительно сделанных отверстий в зеркале телескопа, через которые прямой черенковский свет попадает на ту же мозаику светочувствительных элементов, что и отраженный. Основным преимуществом такого детектора можно считать отсутствие дополнительной электроники и весовой нагрузки. Основным недостатком этого метода является ограниченное разрешение и относительно небольшое количество собранного света.

Для исследования такого варианта дизайна в текущую схему моделирования прохождения фотонов через оптическую схему было добавлено одно круглое отверстие диаметром 97 мм в центре главного зеркала (см. рис. 2). Распределение падающего света моделировали как гауссовское распределение падающего пучка света. Поток прослеживались через основную модель детектора с помощью Geant4. Отклик электроники мо-

Таблица 1. Ошибки определения направления прихода ливня (град)

расстояние до оси ливня, м	Угловые распределения		Черенковские образы	
	по максимуму	по центру тяжести	по максимуму	по центру тяжести
140	0.20	0.32	0.12	0.16
100	0.10	0.22	0.14	0.19

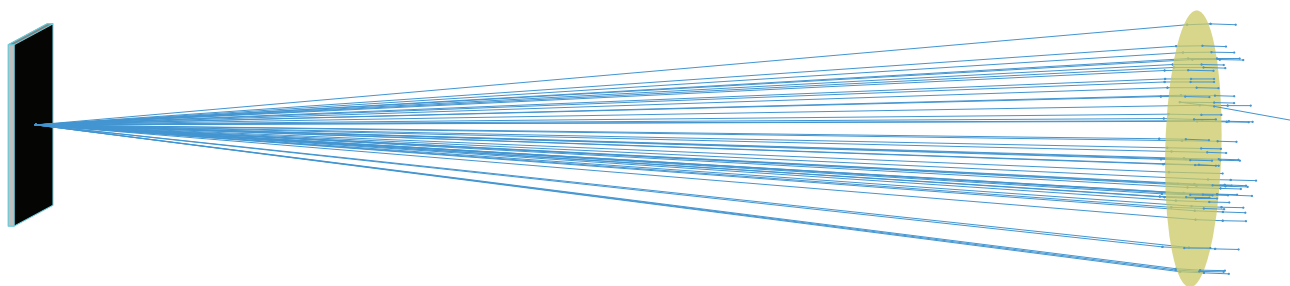


Рис. 1. Сегмент детектора прямого света, вариант с площадью линзы (слева) 400 см^2 и фокусным расстоянием 64 см. Детектор будет включать 7 или 19 таких линз с одним чувствительным элементом в фокусе.

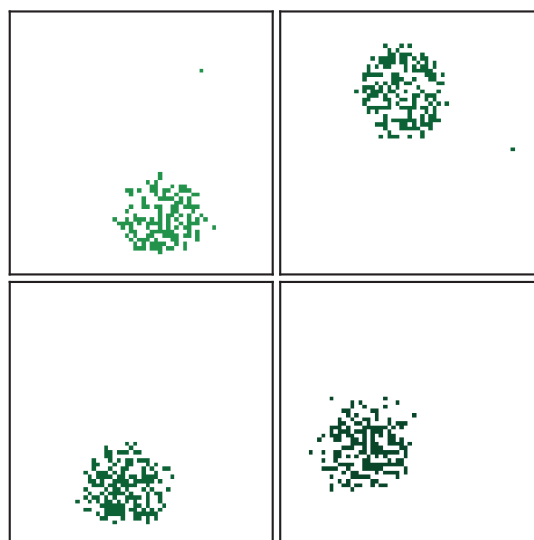
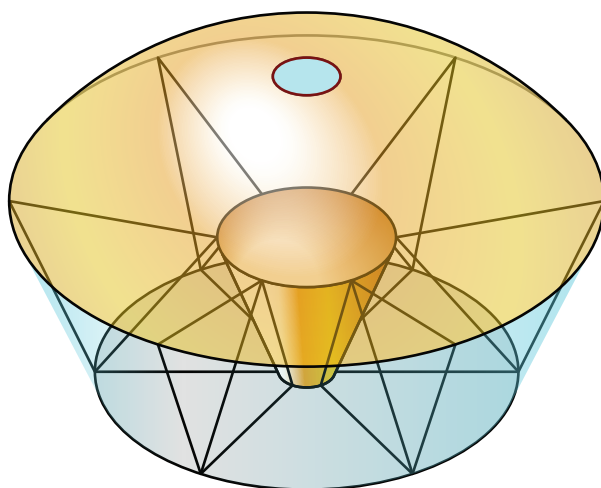


Рис. 2. Схематическое изображение кодирующего отверстия, позволяющего использовать детектор отраженного черенковского света для регистрации прямого (слева), и примеры изображений на мозаике от искусственных событий (справа).

делировали по той же схеме, что и для детектора отраженного света ШАЛ [8] без добавления фона.

Оценку чувствительности такого метода регистрации прямого черенковского света ШАЛ к угловому распределению направления прихода света ШАЛ проводили следующим образом:

1. Исходные изображения предварительно обрабатывали таким образом, что из них алгоритмически извлекали сконструированные признаки; сперва определяли геометрический центр основного пятна в полярных координатах (r_0, φ_0) относительно центра изображения.

2. Полученные величины (r_0, φ_0) подавали в качестве обучающих входов в модель линейной регрессии и в качестве проектируемых признаков в полносвязную нейронную сеть многослойный перцептрон с одним скрытым слоем.

3. На тестовом наборе событий результаты двух моделей (r_1, φ_1) , (r_2, φ_2) и полученные алгоритмически значения (r_0, φ_0) сравнивали с истинными направлениями (r, φ) , заложенными при генерации.

Параметры линейной регрессионной модели оценивали методом наименьших квадратов. Нейронную сеть обучали на 5000 выборках в течение 10 эпох со средним абсолютным отклонением в качестве функции потерь.

Полученные ошибки оценки направления для всех трех методов представлены на рис. 3. Предварительное извлечение релевантных признаков позволяет достичь точности восстановления направления $2.0^\circ \pm 0.8^\circ$. Линейная регрессионная модель обеспечивает точность $0.6^\circ \pm 0.3^\circ$, а нейросетевая модель дает точность $0.44^\circ \pm 0.26^\circ$ (градусы дуги).

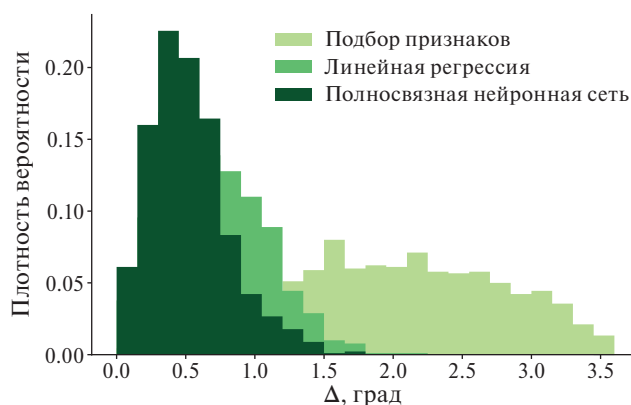


Рис. 3. Распределения ошибок восстановления направления прихода ШАЛ для трех разных методов определения направления по прямому черенковскому свету.

ОЦЕНКА ПЕРВИЧНОЙ МАССЫ ПО ПРЯМОМУ ЧЕРЕНКОВСКОМУ СВЕТУ

К задаче оценки массы первичной частицы применяется тот же подход, что и к оценке направления прихода: с помощью угловых распределений света и изображений черенковского света в детекторе. В качестве численного параметра формы светового пятна была выбрана длина его большей оси. Для уменьшения влияния флуктуаций был введен порог — минимальное количество фотонов в ячейке изображения, необходимое для того, чтобы ячейка была учтена в анализе. Несколько пороговых уровней позволяют изучать форму распределения на разных уровнях. Также было изучено влияние размера угловой ячейки сетки моделирования распределения черенковского света в CORSIKA. Были рас-

Таблица 2. Средние ошибки разделения по массам на разных сетках моделирования угловых распределений (детектор 100 см², порог 3 фотона, расстояние до оси ливня 140 м)

ячейка	1.0°×1.0°	0.5°×0.5°	0.25°×0.25°	0.2°×0.2°
ошибка p-N	0.37	0.25	0.25	0.22
ошибка N-Fe	0.25	0.26	0.20	0.20

Таблица 3. Ошибки классификации первичных частиц по массам при площади линзы 400 см² (расстояние до оси ливня 140 м, размер ячейки 0.2°×0.2°)

	Порог	P–N	N–Fe
Угловые распределения	15	0.270 ± 0.005	0.230 ± 0.005
	30	0.270 ± 0.005	0.240 ± 0.005
	80	0.270 ± 0.005	0.220 ± 0.005
Черенковские образы	12	0.270 ± 0.005	0.260 ± 0.005
	14	0.270 ± 0.005	0.260 ± 0.005
	16	0.270 ± 0.005	0.260 ± 0.005

смотрены четыре варианта размера ячейки сетки: 1.0°, 0.5°, 0.25° и 0.2°. При уменьшении размера ячейки наблюдается заметное улучшение качества оценки массы (см. табл. 2).

Как видно из табл. 2, угловое распределение прямого черенковского света более чувствительно к массе первичных частиц по сравнению с детектором отраженного света [8], имеющим средние ошибки классификации 0.3. Однако, для детектора с площадью линзы 100 см² и кривизной 11.3 см характерные ошибки классификации даже для наилучшей сетки 0.2°×0.2° составляли 0.44 для обеих пар ядер «протон–азот» и «азот–железо».

Для улучшения качества разделения был проведен анализ относительных флуктуаций плотности фотонов в пределах поля зрения детектора и выделена область, где относительные флуктуации не превосходят единицы. Это привело к уменьшению ошибок классификации до значений 0.43 для пары «протон–азот» и 0.39 для пары «азот–железо» для сетки 0.2°×0.2°.

Поскольку полученная точность оставалась меньшей, чем в детекторе отраженного света, было протестирована другая модель детектора с линзой 400 см² и фокусным расстоянием 64 см (см. рис. 1). В отличие от предыдущей версии детектора, она имеет тонкую линзу, что существенно уменьшает вносимые линзой искажения изображения и, следовательно, обеспечивает меньшие ошибки классификации (см. табл. 3).

Поскольку линза большей площади собирает большее света, пороговые значения для анализа изображения могут быть установлены выше. С более высокими порогами были достигнуты результаты лучше, чем для отраженного света.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка нового эксперимента серии СФЕРА и оптимальное конструирование установки

ориентируются прежде всего на задачу определения массового состава первичных ядер в диапазоне энергий 1–1000 ПэВ. Существенную помощь в ее решении может оказать новый детектор углового распределения черенковского света, работающий в паре с основным телескопом, регистрирующим отраженный от снега свет. Нами были рассмотрены возможности такого детектора. Уже можно утверждать, что со своими задачами – оценкой направления оси и разделением первичных ядер по массе – он может справиться не хуже основного телескопа.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М. В. Ломоносова [9]. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда по гранту № 23-72-00006, <https://rscf.ru/project/23-72-00006/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чудаков А.Е. // Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий. Материалы Всесоюзного симпозиума (Якутск, 1972). С. 69.
2. Castagnoli C., Navarra G., and Morello C. // Proc. 17th ICRC. 1981. V. 6. P. 103.
3. Antonov R.A., Ivanenko I.P., and Rubtsov V.I. // Proc. 14th ICRC. 1975. V. 9. P. 3360.
4. Антонов Р.А., Петрова Е.А., Сыроева Т.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 1999. Т. 63. № 3. С. 520.
5. Антонов Р.А., Аулова Т.В., Бонвеч Е.А. и др. // ЭЧАЯ. 2015. Т. 46. С. 115; Antonov R.A., Aulova T.V., Bonvech E.A. et al. // Phys. Part. Nucl. 2015. V. 46. P. 60.
6. Бонвеч Е.А., Чернов Д.В., Латыпова В.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2024. Т. 88. № 3. С. 518; Bonvech E.A., Chernov D.V., Latypova V.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. V. 88. No. 3. P. 435.
7. Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. // FZKA-6019. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 1998.

8. Chernov D.V., Kolodkin T.A., Ivanov V.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2025. V. 89. No. 6. P. 1002.
9. Voevodin V.V., Antonov A.S., Nikitenko D.A. et al. // Supercomp. Front. Innovations. 2019. V. 6. No. 2. P. 4.
10. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. V. 506. P. 250.

Estimation of extensive air shower primary parameters using angular distribution of the Cherenkov light in the SPHERE-3 experiment

**E. A. Bonvech^{a,*}, N. O. Ovcharenko^{a,b}, O. V. Cherkesova^{a,c}, E. L. Entina^a, V. I. Galkin^{a,b},
D. V. Chernov^a, V. A. Ivanov^{a,b}, T. A. Kolodkin^{a,b}, D. A. Podgrudkov^{a,b}, T. M. Roganova^a,
M. D. Ziva^{a,d}**

^aSkobeltsyn Institute for Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^bLomonosov Moscow State University, Physics Department, Moscow, 119991 Russia

^cLomonosov Moscow State University, Space Research Department, Moscow, 119991 Russia

^dLomonosov Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: bonvech@yandex.ru

Some plans for the development of the SPHERE experiment are presented. Namely, reasons for the introduction of an additional detector of the angular distribution of Cherenkov light, pointed at zenith, are given. It can only work together with the main telescope but can yield important information on the primary particle direction and mass. Construction and capabilities of the detector are discussed, draft algorithms for direction definition are revealed, and sensitivity to the primary mass is shown.

Keywords: extensive air shower, Cherenkov light, Monte Carlo simulation, primary cosmic rays