

## Множественная генерация образов в оптической модели детектора СФЕРА-3

В.А. Иванов,\* 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 15.11.2023; подписана в печать 04.12.2023)*

Изучение происхождения и распространения космических лучей в диапазоне от 1 до 1000 ПэВ имеет важное значение. Разрабатывается новая установка СФЕРА-3 с более высокой светосилой и лучшим оптическим разрешением на основе опыта, полученного при эксплуатации аэростатной установки СФЕРА-2. В данной работе представлен моделирующий комплекс для генерации образов черенковского света на детекторной мозаике телескопа СФЕРА-3.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd

УДК: 524.1

Ключевые слова: ШАЛ, моделирование, черенковский детектор, автоматизация.

### ВВЕДЕНИЕ

Задача регистрации первичного космического излучения (ПКИ) активно решается на протяжении многих десятилетий. Полученные в последнее время результаты [1] указывают на то, что основная часть событий первичных космических лучей (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.

Метод детектирования, отраженного от снежной поверхности черенковского света, предложенный А.Е. Чудаковым [2], лёг в основу серии экспериментов СФЕРА.

Проведение чувствительных к ядерному составу 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 СФЕРА-3 [4], позволят получить более детальное представление о массе ПКЛ в диапазоне энергий от 1 до 1000 ПэВ.

Основной информационной единицей является образ на мозаике, так как благодаря ему получается вся основная информация о событии. Возникает необходимость получения как можно более точного образа события на мозаике детектора. Таким образом возникает задача генерации достоверных образов на мозаике в терминах модели планируемого детектора. Которая решается с помощью многошагового моделирования с помощью программного пакета CORSIKA [5], программного пакета GEANT4 [6] и приложения на языке FORTRAN.

### 1. 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.

Планируется, что детектор СФЕРА-3 будет иметь эффективную площадь входного окна диафрагмы не менее 1 м<sup>2</sup> и оптическое разрешение не хуже 2000 пикселей. Поле зрения должно быть не менее  $\pm 20^\circ$ . Окончательные характеристики будут определены после оптимизации параметров оптической системы и моделирования.

В качестве предварительного варианта оптической конструкции детектора рассматривается измененная оптическая схема Шмидта с асферическим зеркалом и пластиной-корректором. Входное окно телескопа закрыто пластиной-корректором из акрила толщиной от 5 до 30 мм и диаметром 1700 мм. Между зеркалом и корректором располагается светочувствительная часть детектора — мозаика SiPM [7] с диаметром чувствительной части 660 мм и полным диаметром 680 мм, а также блок электроники. С учетом затенения мозаикой и блоком электроники эффективная площадь входного окна составляет 1.9 м<sup>2</sup>.

### 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА СФЕРА-3

Важным шагом при работе над решением поставленной задачи являлось создание новой достоверной модели детектора СФЕРА-3. Ключевыми изменения в геометрии детектора по сравнению с прошлой версией стали:

1. асферическая линза корректор на входном отверстии из акрила;

\* [Ivanov.va18@physics.msu.ru](mailto:Ivanov.va18@physics.msu.ru)

2. асферическое зеркало;
3. детекторная решетка из SIPM со светосборниками

Оптическая модель детектора с этими нововведениями выглядит следующим образом (см. рис. 1):

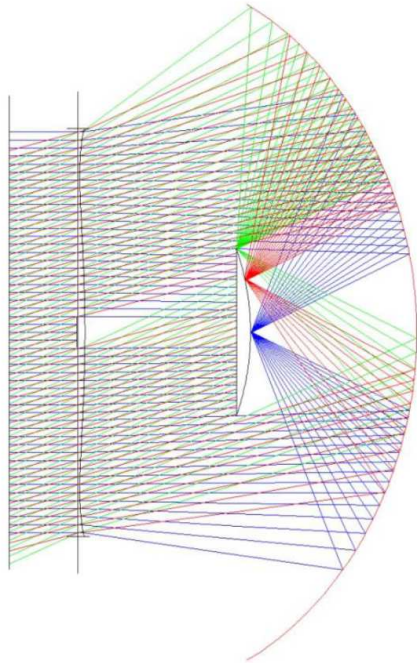


Рис. 1. Оптическая модель детектора СФЕРА-3 с асферическим зеркалом и линзой корректором на входе

Так как моделирование детектора производилось в программном пакете Geant4, где по умолчанию не реализованы поверхности сложной формы, был использован класс G4TessellatedSolid [8]. Для задания асферических плоскостей использовалась следующая формула поверхности:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - c^2r^2}} + \alpha_1r^2 + \alpha_2r^4 + \alpha_3r^6 + \alpha_4r^8 + \alpha_5r^{10}$$

Параметры поверхностей представлены в следующей таблице (все размеры в мм):

### 3. ПРОЦЕСС ГЕНЕРАЦИИ ОТКЛИКА НА МОЗАИКЕ ДЕТЕКТОРА

#### 3.1. Генерация черенковских фотонов заряженными частицами ШАЛ

Традиционно телескопы СФЕРА регистрировали черенковский свет ШАЛ, отраженный от снежной поверхности. Оценка первичных параметров ливней производилась по пространственно-временному распределению света на мозаике телескопа. На части событий

телескопа СФЕРА-2 отчетливо виден сигнал [9], опережающий отраженный от снега свет на характерное время распространения фотонов от уровня наблюдения до снега и обратно. Сигнал был однозначно интерпретирован как прямой черенковский свет, попавший на мозаику через технологические отверстия в зеркале. Так возникла идея регистрации прямого черенковского света наряду с отраженным.

При конструировании СФЕРА-3 планируется рассмотреть несколько вариантов мозаики ФЭУ, корректирующей линзы, зеркала и, возможно, объектива и светочувствительной матрицы для прямого света. Поэтому для каждого моделируемого события ШАЛ необходимо сохранить:

- а) пространственно-временное распределение ЧС на уровне снежной поверхности для дальнейшего моделирования образа отраженного света,
- б) распределение фотонов по поперечному пространству, углам и временам прихода на нескольких потенциальных уровнях наблюдения над снегом для последующего расчета образа прямого света.

Код CORSIKA позволяет сразу учесть спектральную чувствительность используемых фотосенсоров и поглощение света в атмосфере, что дает возможность экономить время процессора — проследить только те фотоны, которые производят фотоэлектроны в сенсоре с вероятностью единица. В этом смысле их логично сразу называть фотоэлектронами.

Мы не используем стандартные выводные файлы CORSIKA для частиц и черенковского света в силу их избыточной детальности, приводящей к их неприемлемо большому размеру.

Вместо этого мы сохраняем распределения в виде многомерных массивов, адекватных по подробности и объему. Пространственно-временное распределение света на снегу сохраняется в виде квадратного ковра 3.2 км×3.2 км в массиве 1280×1280, каждая ячейка которого соответствует квадрату 2.5 м×2.5 м. Импульс света в каждом квадрате сохраняется в массив их 100 ячеек размером 5 нс. Прямой свет сохраняется на уровнях 0.5, 1.0, 2.0 км над снегом в три массива размером 40×40×40×40×100. Первые две размерности соответствуют пространственным координатам (400 м×400 м), вторые две — угловым (50°×50°), последняя — временной задержке (500 нс).

Набор параметров, задаваемых коду при моделировании, включает первичную энергию, зенитный и азимутальный углы и тип первичной частицы, а также модель атмосферы и модель ядерного взаимодействия при сверхвысоких энергиях (модель ШАЛ). Мы используем набор фиксированных первичных энергий 1, 3, 10, 30 и 100 ПэВ и набор фиксированных зенитных углов 5, 10, 15, 20 и 25°, а азимутальные углы разыгрываются равномерно в диапазоне 0–360°. Базовый набор первичных ядер: H, He, N, S, Fe. Используются несколько моделей атмосферы из набора CORSIKA и модели

Таблица. Параметры асферических поверхностей

Название элемента	Радиус кривизны	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$
Линза	$\infty$	$-1.1E-4$	$5.8E-11$	$5.6E-16$	$-1.2E-21$	$1.9E-27$
Зеркало	1200	$2.5E-5$	$4.7E-11$	$-5.6E-17$	$5.7E-23$	$-1.7E-29$

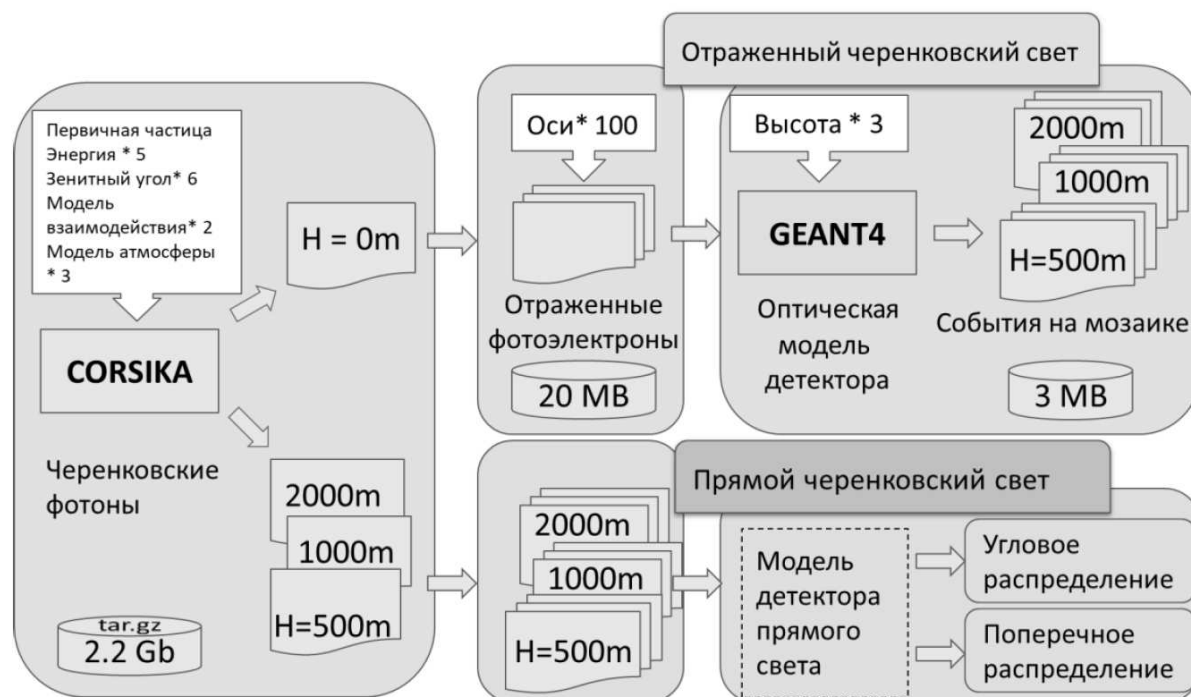


Рис. 2. Конвейер вычислений

ШАЛ QGSJET01 [10] и QGSJETII-04 [11]. Набор параметров при необходимости будет изменен и дополнен в процессе работы.

Базовый объем выборки искусственных событий ШАЛ составляет 100, что вполне достаточно для выявления основных флуктуаций продольного развития ливней. Поскольку сохраняются практически полные распределения по поперечному пространству и задержкам, на основе этих выборок затем генерируются значительно более объемные выборки черенковских образов.

### 3.2. Расшифровка данных CORSIKA и клонирование событий

Для генерации образов черенковского света на мозаике детектора используется приложение на языке FORTRAN.

На вход приложения подается следующая информация:

1. используемая модель атмосферы;
2. наименование выводного файла CORSIKA; Высота полета детектора относительно поверхности; Ключ регистрации;
3. 0 — только черенковские фотоэлектроны;
4. 1 — только фоновые фотоэлектроны;
5. 2 — черенковские и фоновые фотоэлектроны.

Так как генерация событий в программном пакете CORSIKA требует большой вычислительной мощности и больших временных затрат, было принято решение клонировать полученные события без потери физического смысла для увеличения суммарного числа событий. Это было сделано с помощью параллельного переноса пятна черенковского света относительно оси телескопа с сохранением направления и угла широкого атмосферного ливня. Благодаря этому процессу из одного исходного события мы получаем 100 событий-клонов, которые в дальнейшем используются для расчетов Geant4.

### 3.3. Моделирование регистрации черенковского света детектором СФЕРА-3

Полученные с помощью FORTRAN распределения черенковского света на входном окне детектора подаются на вход модели, написанной на Geant4. С помощью инструментов, предоставляемых пакетом, происходит моделирование прохождения фотоэлектронов от входного окна детектора до конечного элемента мозаики. В результате мы получаем выводной файл с полной информацией о каждой зарегистрированной частице: номер пикселя, в котором произошла регистрация; время регистрации фотоэлектрона в детекторной мозаике (время наследуется из CORSIKA, отсчет начинается с взаимодействия первичной частицы) и информационный ключ (событие или фон). Полученные образы могут использоваться для оценки используемых моделей с помощью дополнительной обработки.

### 3.4. Скрипт множественной генерации

Для получения образа на мозаике детектора необходимо совершить большое количество действий с использованием различных программ. Для того, чтобы упростить процедуру генерации и снизить вероятность человеческой ошибки, было принято решение автоматизировать генерацию образов в детекторе.

Для написания программы был выбран язык программирования Python в силу своей универсальности. Данный скрипт подразумевает дальнейшее масштабирование и внедрение не только процессов генерации откликов мозаики детектора СФЕРА-3, но и обработки полученных данных для определения массового состава первичной частицы.

На данный момент в скрипте реализованы все шаги регистрации данных из программы CORSIKA. Данные из полученных ковров протягиваются до снежной поверхности озера Байкал, выступающей в роли зеркала, после чего рассчитывается положение на входном окне детектора, где полученные образы обрабатываются приложением Geant4. Все промежуточные файлы сохраняются и архивируются в каталоги с наследованием всех параметров первичного файла данных. Схема конвейера вычислений представлена на рисунке 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был представлен программный комплекс для множественной генерации образов черенковского света на детекторной мозаике телескопа СФЕРА-3. Разработка новых геометрий детектора и проверка построенных критериев разделения широких атмосферных ливней по первичной массе требует набора большой статистики событий.

Автоматизации рутинных задач и объединение отдельных программ в общий комплекс позволит упростить процедуру набора статистики, а также снизит влияние человеческого фактора на этот процесс.

При дальнейшем развитии комплекса этапы обработки получаемых событий также будут интегрированы и автоматизированы, что позволит эффективно проверять новые геометрии детектора.

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

- [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] Sandroock A. Status and prospects of the CORSIKA

- 8 air shower simulation framework // arXiv (Cornell University) [Preprint] DOI:10.48550/arXiv.2211.16057.
- [6] Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // *Geant4a simulation toolkit* // *NIMA* 506 250. (2003). DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125
- [7] Acerbi F., Gundacker S. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. **926**. 16 (2016).
- [8] Poole C.J., Cornelius I., Trapp J., Langton C.M. // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. **59**, N 4. 1695 (2012).
- [9] Чернов Д.В. и др. // *Ядерная физика*. **85**, № 6. 435 (2022).
- [10] Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I. // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **52B**. 17 (1997).
- [11] Ostapchenko S. // *Phys. Rev.* **D89**. 074009. (2014).

## Multiple image generation in the optical model of the SPHERE-3 detector

V.A. Ivanov<sup>a</sup>, V.I. Galkin

Department of Cosmos Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>Ivanov.va18@physics.msu.ru

The study of the origin and propagation of cosmic rays in the range from 1 to 1000 PeV is important. A new facility, SPHERE-3, with higher luminosity and better optical resolution, is being developed, based on the experience gained from the operation of the balloon facility SPHERE-2. This paper presents a simulation complex for the generation of Cherenkov light images on the detector mosaic of the SPHERE-3 telescope.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd.

*Keywords:* EAS, simulation, Cherenkov detector, automation.

*Received 15 November 2023.*

#### **Сведения об авторах**

1. Иванов Владимир Александрович — студент кафедры физики космоса физического факультета МГУ; e-mail: Ivanov.va18@physics.msu.ru.
2. Галкин Владимир Игоревич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч., профессор на кафедре физики космоса физического факультета МГУ;