

УДК 539.1.07

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА ТРЕК ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ГРУПП МЮОНОВ ОТ ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

© 2021 г. Р. В. Николаенко¹ *, А. Г. Богданов¹, В. С. Воробьев¹,
Е. А. Задеба¹, И. Ю. Трошин¹, Е. П. Хомчук¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: rvnikolaenko@mephi.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

В НИЯУ МИФИ создается крупномасштабный координатно-трековый детектор на дрейфовых камерах ТРЕК, предназначенный для регистрации околоразностного потока групп мюонов, генерируемых первичными космическими лучами сверхвысоких энергий. Для интерпретации экспериментальных данных проведено комплексное моделирование работы установки, включающее три стадии: моделирование широких атмосферных ливней в среде CORSIKA, расчет взаимодействий частиц ливня с детектором и несущими конструкциями в Geant4, получен отклик дрейфовых камер и электроники в Garfield++. Приводится описание каждого этапа моделирования, передачи данных между ними, а также первые полученные результаты.

DOI: 10.31857/S0367676521040256

ВВЕДЕНИЕ

В ряде экспериментов наблюдается избыток групп мюонов, генерируемых первичными космическими лучами с энергией выше 10^{17} эВ (т.н. “мюонная загадка”) [1]. Актуальность этой проблемы подчеркивается созданием международной группы WHISP [2], включающей представителей ключевых экспериментов, регистрирующих многомюонные события от первичных космических лучей (ПКЛ) сверхвысоких энергий (Pierre Auger, IceCube, НЕВОД и др.). Комплекс НЕВОД-ДЕКОР [3, 4], включающий черенковский водный детектор объемом 2000 м^3 и координатно-трековый детектор ДЕКОР площадью 70 м^2 , позволяет исследовать энергетический интервал от 10^{15} до 10^{18} эВ. Для дальнейшего расширения диапазона исследуемых энергий в составе экспериментального комплекса создается крупнейший в мире координатный детектор ТРЕК [5, 6] на основе многопроволочных дрейфовых камер (ДК), имеющий площадь 250 м^2 .

Метод спектров локальной плотности мюонов [7], разработанный в НОЦ НЕВОД, рассматривает детектор ДЕКОР, как точечный в сравнении с размерами широких атмосферных ливней (ШАЛ) и не предполагает моделирования отклика на отдельные ливни. Детектор ТРЕК полностью не

экранируется бассейном черенковского водного детектора (ЧВД), для него необходимо полное моделирование развития ШАЛ и отклика на все частицы, попавшие в его объем.

Для интерпретации экспериментальных данных новой установки, учета ее конструктивных особенностей, влияния вторичных частиц, образованных от взаимодействий частиц ливня с веществом, окружающем детектор, а также отработкой методов реконструкции событий создан полный комплекс программ для моделирования всего процесса регистрации групп мюонов от первого взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой Земли до формирования электронного сигнала. Комплекс состоит из трех основных стадий моделирования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В CORSIKA

Первая стадия реализуется на базе программы CORSIKA [8], с помощью которой моделируются широкие атмосферные ливни и формируются сведения о частицах, достигших уровня детектора. В файлы вывода CORSIKA записывает необходимую для следующей программы моделирования (Geant4 [9]) информацию о частицах, долетевших до установленной пользователем высоты над уровнем моря, то есть поверхность детектора

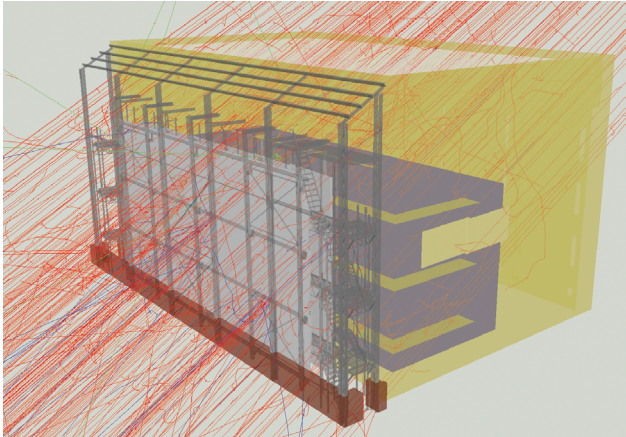


Рис. 1. Результаты трансляции геометрии детектора ТРЕК и здания НЕВОД в Geant4. Для наглядности отключено отображение облицовки пристройки. Показан также результат моделирования события регистрации группы мюонов, прошедшей под зенитным углом 60° со стороны черенковского водного детектора.

в данной программе представляет собой горизонтальную плоскость. Такой формат записи неудобен при моделировании работы детектора ТРЕК, поскольку его плоскости ориентированы вертикально, и из всего массива частиц на плоскости невозможно выделить только те, которые попадут в установку, расположенную произвольным образом.

Для решения описанной проблемы создан алгоритм смены формата записи данных о частицах ШАЛ, получивший название IGESICA (Input for GEANT4 Simulation from Corsika data generation Algorithm). В его основе лежит программа, реализованная в Geant4, позволяющая использовать для каждого сгенерированного ШАЛ до 10^6 вариантов его прохождения через установку. При этом из CORSIKA передается информация о треках частиц, попавших не на плоскость над детектором, а на поверхность параллелепипеда, в котором заключен его объем (это является ключевым отличием данного метода), что позволяет учитывать все частицы, прошедшие через детектор, и исключает розыгрыш частиц, не попадающих в установку, сокращая время вычислений.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В GEANT4

Для моделирования прохождения частиц ливня через здание НЕВОД, рамную конструкцию и дрейфовые камеры детектора ТРЕК используется пакет Geant4. Сложная геометрия окружающих детектор конструкций потребовала применения дополнительной библиотеки CADMesh [10]. Она позволяет транслировать объемные модели, созданные в программах САПР, в тело в Geant4 на этапе инициализации геометрии. С помощью

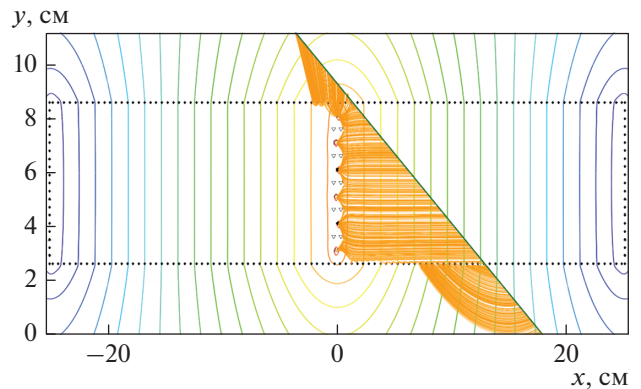


Рис. 2. Модель дрейфовой камеры, прохождение через нее мюона и дрейф электронов в среде Garfield++.

библиотеки транслированы модели металлоконструкций детектора ТРЕК, его облицовки и здания НЕВОД (рис. 1). На этом рисунке также представлен пример моделирования события, всего в настоящий момент разыграно более 1200 ШАЛ в диапазоне энергий от 10^{16} до 10^{18} эВ.

Для дрейфовых камер в программе реализованы алгоритмы независимой регистрации частиц, с доступной для Geant4 точностью моделирующие работу дрейфовой камеры. Это позволяет проводить первичный анализ зарегистрированного события на предмет образования вторичных частиц и их влияния на определение множественности мюонов в данной группе. Помимо первичного анализа событий, используется алгоритм вывода информации о частицах, попавших в дрейфовые камеры для последующей загрузки в Garfield++ [11].

МОДЕЛИРОВАНИЕ В GARFIELD++

Третья стадия комплекса моделирования — среда Garfield++, в которой детально симулируется отклик дрейфовых камер и усилителей-формирователей AMP-4 по данным от Geant4. Для дрейфовых камер установки ТРЕК разыгрывается ионизация при прохождении заряженных частиц, дрейф высвобождающихся электронов и токовый сигнал при достижении электронами сигнальных проволок.

На рис. 2 показана модель дрейфовой камеры в среде Garfield++ с указанием всех проволок. Также показаны эквипотенциальные линии электростатического поля, пример прохождения мюона через рабочий объем и дрейф электронов к сигнальным проволокам.

Получаемый в моделировании токовый сигнал может быть преобразован в более удобный сигнал по напряжению с учетом устройства усилителя-формирователя [12, 13] путем математи-

ческой свертки, которая дает длительности сигналов, близкие к наблюдаемым в эксперименте.

В экспериментальных данных наблюдаются послеимпульсы – вторичные сигналы, возникающие вследствие разброса электронов в электронном облаке вдоль линии дрейфа. Моделирование в Garfield++ впервые позволило создать математический аппарат для их учета. Это необходимо при обработке данных с применением методов машинного обучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан программный комплекс многоэтапно-го Монте-Карло моделирования координатно-трекового детектора от первого взаимодействия космических лучей с атмосферой до формирования электронных сигналов. Разработан оригинальный метод трансляции данных программы CORSIKA в Geant4, позволяющий использовать для каждого сгенерированного ШАЛ до 10^6 вариантов его прохождения через установку. Впервые в пакете Garfield++ смоделированы послеимпульсы, наличие которых необходимо учитывать при реконструкции событий.

Работа выполнена на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект “Фундаментальные проблемы космических лучей и темная материя” № 0723-2020-0040), а также РФФИ (проект № 20-32-90155).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Petrukhin A.A.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2014. V. 742. P. 228.
2. *Dembinski H.P., Arteaga-Velázquez J.C., Cazon L. et al.* // EPJ Web Conf. 2019. V. 210. Art. No. 02004.
3. *Петрухин А.А.* // УФН. 2015. Т. 185. № 5. С. 521; *Petrukhin A.A.* // Phys. Usp. 2015. V. 58. P. 486.
4. *Киндин В.В., Амельчаков М.Б., Барбашина Н.С. и др.* // ПТЭ. 2018. № 5. С. 23; *Kindin V.V., Amelchakov M.B., Barbashina N.S. et al.* // Instr. Exp. Tech. 2019. V. 61. P. 649.
5. *Zadeba E.A., Borisov A.A., Vorobyev V.S. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1390. Art. No. 012132.
6. *Zadeba E.A., Ampilogov N.V., Barbashina N.S. et al.* // J. Instrum. 2014. V. 9. Art. No. C08018.
7. *Богданов А.Г., Громушкин Д.М., Кокоулин Р.П. и др.* // ЯФ. 2010. Т. 73. № 11. С. 1904; *Bogdanov A.G., Gromushkin D.M., Kokoulin R.P. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2010. V. 73. P. 1852.
8. <https://www.iap.kit.edu/corsika>.
9. <https://geant4.web.cern.ch>.
10. <https://github.com/christopherpoole/CADMesh>.
11. <https://garfieldpp.web.cern.ch>.
12. *Vorobev V.S., Borisov A.A., Kozhin A.S. et al.* // J. Instrum. 2020. V. 15. Art. No. C08007.
13. *Zadeba E.A., Barbashina N.S., Borisov A.A. et al.* // ЭЧАЯ. 2018. Т. 49. № 1. С. 147; *Zadeba E.A., Barbashina N.S., Borisov A.A. et al.* // Phys. Part. Nucl. 2018. V. 49. P. 86.

Simulation of the TREK detector response at registration of muon bundles from ultra-high energy primary cosmic rays

R. V. Nikolaenko^{a, *}, A. G. Bogdanov^a, V. S. Vorobev^a, E. A. Zadeba^a,
I. Yu. Trosin^a, E. P. Khomchuk^a

^aNational Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: rvnikolaenko@mephi.ru

At MEPhI, a large-scale coordinate-tracking detector TREK based on drift chambers is being created, designed to detect the near-horizontal flux of muon bundles generated by ultrahigh-energy primary cosmic rays. To interpret the experimental data a comprehensive simulation of the operation of the detector is carried out, including three stages at once: modeling of an EAS in the CORSIKA environment, calculating the interactions of shower particles with a detector and supporting structures in Geant4, obtaining a response from drift chambers and on-chamber electronics in Garfield ++. We describe each stage of simulation, the data transfer between them, as well as the first obtained results.