УДК 520.39

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ГОДОСКОПА ДЛЯ МЕТОДА МЮОНОГРАФИИ

© 2021 г. Е. С. Аношина^{1, *}, А. Н. Дмитриева¹, В. В. Шутенко¹, Е. И. Яковлева¹, И. И. Яшин¹

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

> **E-mail: ESAnoshina@mephi.ru* Поступила в редакцию 19.10.2020 г. После доработки 19.11.2020 г. Принята к публикации 28.12.2020 г.

Рассмотрена универсальная модель сцинтилляционного мюонного годоскопа (МГ) для проведения мюонографии крупномасштабных объектов. Регистрация треков мюонов осуществляется многослойной сборкой узких длинных сцинтилляционных стрипов с оптоволоконным светосбором на кремниевые фотоумножители. Обсуждаются характеристики сцинтилляционного МГ и описывается его модель в пакете Geant4. Выполнена калибровка параметров модели стрипа по экспериментальным данным.

DOI: 10.31857/S0367676521040049

ВВЕДЕНИЕ

Поток мюонов вторичных космических лучей наблюдается на поверхности Земли постоянно. С помощью анализа изменений потока мюонов, обладающих большой проникающей способностью, можно исследовать различные объекты, такие как: вулканы [1], пирамиды [2], различные строения [3], энергоблоки АЭС [4] и др. Метод, позволяющий получать пространственную картину изменений потока мюонов в веществе, называется мюонографией. Данный метод имеет следующие преимущества: в нем используется высокая проникающая способность мюонов, отсутствие дополнительной лучевой нагрузки на людей и возможность построения трехмерного изображения объекта. Все это делает метод мюонографии перспективным методом исследования.

На сегодняшний день для регистрации мюонной компоненты используются эмульсионные трековые детекторы, мюонные телескопы (МТ), мюонные спектрометры, много направленные мюонные телескопы (ММТ) и МГ. Существенным недостатком фотоэмульсий является невозможность регистрации в режиме реального времени [5]. Недостатками МТ и ММТ являются низкое угловое разрешение, наличие только двух координатных плоскостей и, в отличие от МГ [6], отсутствие непосредственной реконструкции треков. Для проведения исследований в области мюонографии необходимо, чтобы детектор обладал такими свойствами как: большая эффективная площадь, регистрация мюонов одновременно с различных направлений, возможность реконструкции треков мюонов с высоким угловым разрешением в режиме реального времени. Поэтому возникает необходимость создания новой установки, максимально отвечающей перечисленным требованиям. Цель данной работы – разработка универсальной модели сцинтилляционного мюонного годоскопа в пакете Geant4 для проведения мюонографии крупномасштабных объектов. В работе описываются результаты моделирования как отдельного стрипа с оптоволоконным светосбором на кремниевые фотоумножители, так и всего сцинтилляционного МГ в пакете Geant4 версии 10.5 [7], а также сопоставление параметров модели стрипа с результатами его калибровки на прецизионном МГ УРАГАН, прошедшем государственную аттестацию № 10-15/62а.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО МЮОННОГО ГОДОСКОПА

За основу разрабатываемого детектора выбран созданный в НИЯУ МИФИ сцинтилляционный МГ [8, 9]. Отличительной особенностью разрабатываемого МГ является оптоволоконный светосбор на индивидуальные кремниевые фотоумножители SiPM для исключения кросс-наводок от разных каналов многоанодного ФЭУ. Основным детектирующим элементом установки является узкий длинный сцинтилляционный стрип, на конце которого размещается индивидуальный SiPM. Схема модели стрипа приведена на рис. 1*a*. Его ба-



Рис. 1. Схема модели стрипа: *1* – сцинтиллятор, *2* – фольга, *3* – оптоволокно, *4* – кремниевый фотоумножитель, *5* – АБС пластик, *6* – эпоксидный клей (*a*). Визуализация результата моделирования прохождения μ⁺ с энергией 3 ГэВ через супермодуль (*б*).

зовыми элементами являются: пластиковый сцинтиллятор на основе полистирола с добавками 2% p-Terphenyl и 0.02% POPOP; кремниевый фотоумножитель MPPC (multi-pixel photon counter) S13360-1350PE, который находится внутри черного АБС (акрилонитрил бутадиен стирол) пластика. Для улучшения светосбора поверхность стрипов покрыта тонким (~0.1 мм) белым слоем вспененного полистирола. На одной из поверхностей стрипа прорезана канавка, в которую с помощью эпоксидного клея EJ-500 [10] вклеивается спектросмещающее оптоволокно (Kuraray Y11 S200).

Супермодуль состоит из восьми слоев, по 128 стрипов в каждом, сгруппированных в два базовых модуля (БМ). Каждый БМ содержит 64 стрипа, расположенных внутри специального защитного корпуса и скрепленных с помощью двухстороннего скотча толщиной 1 мм, расстояние между стрипами 0.1 мм. Корпус обеспечивает жесткость, дополнительную светоизоляцию и защиту стрипов от повреждений. В качестве основного материала корпуса заложен алюминий толщиной 0.8 мм. Размеры корпуса БМ рассчитываются автоматически и зависят от количества и ширины стрипов. Слои накладываются друг на друга перпендикулярно, образуя координатную плоскость. Таким образом, из восьми слоев формируются четыре координатные плоскости. При создании универсальной модели МГ предусмотрена возможность добавления новых слоев и стрипов в годоскоп. Модель стрипа так же является универсальной.

ГЕОМЕТРИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРИПА В GEANT4

Для создания геометрии стрип разделен на четыре части. В сцинтиллятор размерами 3000 мм × \times 7 мм \times 23 мм (последнее значение можно изменять) помещен объем, заполненный эпоксидным клеем, размерами 2992 мм × 1.2 мм × 2 мм, в объем с клеем помещено оптоволокно диаметром 1 мм и длиной 2992 мм. Для модели крепления кремниевого фотоумножителя внутрь сцинтиллятора помещен черный АБС пластик размерами 8 мм × \times 7 мм \times 10.5 мм, с проходящим через него оптоволокном. Для подвода оптоволокна к фотокатоду, на сцинтиллятор крепится черный АБС пластик. В следующем слое пластика располагается светочувствительная поверхность и фотокатод SiPM, которые представляют собой площадку из силиконовой смолы размерами 0.5 мм × 1.3 мм × × 1.3 мм и алюминиевую пластинку размерами 0.3 мм × 1.3 мм × 1.3 мм. Противоположный торец стрипа заклеен зеркальным скотчем. Основные свойства сцинтиллятора, выбранные для математической модели: химический состав С₈H₈, плотность 1.032 г/см³, показатель преломления света 1.581, время высвечивания 1.6 нс.

В модели подключены частицы: лептоны, мезоны, барионы, ионы и короткоживущие частицы; физические процессы: ионизационные потери, тормозное излучение, эффект Комптона, образование пар, аннигиляция электрон-позитрон, фотоэффект, множественное рассеяние и радиоактивный распад; оптические процессы: черенковское излучение, преломление света при пересечении границы сред с различной оптической



Рис. 2. Зависимость средней амплитуды срабатывания SiPM от места прохождения мюона через сцинтилляционный стрип: экспериментальные данные (a), результат моделирования (b).

плотностью, ослабление светового потока при прохождении через вещество, рассеяние Рэлея; оптические поверхности: диффузно отражающая боковая поверхность и зеркальная на дальнем торце стрипа между сцинтиллятором и фольгой.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И КАЛИБРОВКИ

Проведено моделирование отклика модели сцинтилляционного МГ на прохождение мюона с энергией 3 ГэВ (рис. 1 δ). Подтверждено, что разработанная модель работает корректно. Реализована запись в файл номеров сработавших слоев и стрипов, а так же число фотонов и фотоэлектронов, выбитых с фотокатода, для каждого сработавшего стрипа и слоя.

Проведена калибровка модели с помощью результатов исследования прототипа стрипа на прецизионном МГ УРАГАН [6], прошедшем государственную аттестацию № 10-15/62а: экспериментально получена зависимость средних амплитуд срабатывания SiPM (в фото-электронах) при прохождении мюонов через стрип от координат стрипа (рис. 2*a*). Получены параметры, при которых в модели максимально близко воспроизводится экспериментальная зависимость (рис. 2*б*): световыход 11500 фотон/МэВ, длина поглощения света в сцинтилляторе 10 см, коэффициенты отражения от внутренней поверхности стрипа 0.98 и от фольги 0.98. Параметры модели для конкретного стрипа находятся в хорошем согласии с результатами его калибровки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пакете Geant4 разработаны следующие универсальные модели: сцинтилляционного стрипа с оптоволоконным светосбором на кремниевые фотоумножители и на его базе сцинтилляционного мюонного годоскопа для мюонографии крупномасштабных объектов.

Проведена калибровка модели стрипа. Модельные характеристики конкретного стрипа оказались в хорошем согласии с результатами его калибровки на прецизионном мюонном годоскопе УРАГАН, прошедшем государственную аттестацию № 10-15/62а.

Работа выполнялась в рамках договора между НИЯУ МИФИ и АО ВНИИАЭС № 00-3-700-0650 от 19.11.2019 г. с использованием уникальной научной установки "Экспериментальный комплекс НЕВОД".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Tanaka H.K.M., Kusagaya T., Shinohara H. // Nat. Commun. 2014. V. 5. Art. No. 3381.
- 2. Kuno M., Morishima K., Nishio A. et al. // Proc. ICRC2017. (Busan, 2017). Art. No. 294.
- 3. *Durham J.M., Guardincerri E., Morris C.L. et al.* // AIP Adv. 2015. V. 5. Art. No. 067111.

- 4. *Morris C.L., Bacon J., Borozdin K. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. Art. No. 024110.
- Александров А.Б., Баклагин С.А., Галкин В.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 538; Aleksandrov A.B., Baklagin S.A., Galkin V.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 4. P. 500.
- Ампилогов Н.В., Барбашина Н.С., Компаниец К.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 420; Ampilogov N.V., Barbashina N.S., Kompaniets K.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 3. P. 386.
- 7. *Geant4 Collaboration*. Book for application developers. Release 10.5, 2019.
- Ампилогов Н.В., Амельчаков М.Б., Бритвич Г.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 5. С. 675; Ampilogov N.V., Amelchakov M.B., Britvich G.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2009. V. 73. No. 5. Р. 637.
- Яшин И.И., Ампилогов Н.В., Астапов И.И.и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 5. С. 621; Yashin I.I., Ampilogov N.V., Astapov I.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 5. P. 554.
- 10. https://eljentechnology.com/products/accessories/ej-500.

Simulation of scintillation hodoscope for the muonography method

E. S. Anoshina^{*a*, *}, A. N. Dmitriyeva^{*a*}, V. V. Shutenko^{*a*}, E. I. Yakovleva^{*a*}, I. I. Yashin^{*a*}

^aNational Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia *e-mail: ESAnoshina@mephi.ru

The model of the universal scintillation muon hodoscope (MH) for realization of muonography of largescale objects is considered. The registration of muon tracks is carried out by a multilayer assembly of narrow long scintillation strips with optical fiber light collection on silicon photomultipliers. In the article, the characteristics of the scintillation MH are discussed and its model in the Geant4 package is described. Calibration of the strip model parameters based on experimental data is considered.