

Обоснование-представление цикла работ

«Увеличение светосбора с длинных сцинтилляционных детекторов и разработка этапов создания модулей вето системы эксперимента Mu2e»

на соискание премии ОИЯИ за 2019 г. по категории «научно-методические и научно-технические работы».

Авторы: Артиков А.М., Будагов Ю.А., Васильев И.И., Глаголев В.В., Давыдов Ю.И., Симоненко А.В., Харжеев Ю.Н., Чохели Д. (ЛЯП ОИЯИ), Дьюкс Э.К., Групп К., (Университет Вирджинии, США).

Artikov A.M., Budagov J.A., Vasilyev I.I., Glagolev V.V., Davydov Yu.I., Simonenko A.V., Kharzheev Yu.N., Chokheli D., Dukes E.C., Group C.

Представляется цикл из 7 научно-методических работ и 2 обзоров.

В эксперименте Mu2e планируется поиск конверсии мюона в электрон в поле ядра $\mu^- + N \rightarrow e^- + N$, нарушающего закон сохранения лептонного заряда, с ожидаемой чувствительностью к одному событию 2.9×10^{-17} (в 10000 раз лучше, чем достигнутое в настоящее время значение предела). Важнейшей задачей любого эксперимента, нацеленного на поиск запрещенных или исследование редких процессов, является подавление фоновых событий. Так, согласно Монте-Карло моделированию, для достижения ожидаемой в Mu2e чувствительности к одному событию необходимо подавить космический фон до уровня, когда при наборе данных в течении 3-х лет будет получено не более 0.25 событий от космических мюонов, имитирующих искомый электрон. Такое требование достижимо при использовании вето системы, Cosmic Ray Veto (CRV), с эффективностью регистрации космических лучей не хуже 99.99%. При отсутствии вето системы космические мюоны будут давать примерно одно фоновое событие в сутки, регистрируемое установкой как искомый электрон.

Авторы данного цикла работ внесли определяющий вклад в развитие CRV системы установки Mu2e, разработку всех этапов сборки и тестирования модулей при их массовом производстве. Авторами впервые предложено и экспериментально продемонстрировано увеличение светосбора со сцинтилляторов при съеме сигналов при помощи спектросмещающих волокон путем закачки в отверстия жидкого оптического наполнителя.

Сотрудники НЭОМАП ЛЯП ОИЯИ совместно с учеными университета Вирджинии (США) и ФНАЛ (США) разработали систему детекторов CRV, а также этапы массового производства модулей с контролем качества на каждом этапе. Более 85 модулей должны быть изготовлены к концу 2021 года. Система CRV будет составлена из модулей различной длины (от 0,9 до 7,0 метров) и шириной 1 метр. Модуль состоит из 4-х слоев экструзионных полистирольных сцинтилляционных счетчиков с установленными в продольных отверстиях спектросмещающими волокнами (WLS). Съем света с WLS осуществляется посредством кремниевых фотоумножителей SiPM. Основным компонентом модуля CRV является стрип из экструдированного полистирольного сцинтиллятора сечением $20 \times 50 \text{ мм}^2$. Каждый стрип имеет два так называемых «ко-экструдированных» отверстия диаметром 2.6 мм; в каждом помещается

WLS волокно диаметром 1.4 мм. Два таких стрипа склеены в сдвоенный счетчик, а модуль CRV состоит из четырех слоев по 8 счетчиков в каждом. Светосбор большинства модулей производится с обоих концов с помощью SiPM.

Высокая эффективность регистрации частиц сцинтилляционными детекторами требует обеспечения соответствующего светосбора с детекторов. При съеме сигналов со сцинтилляторов при помощи спектросмещающих волокон последние, как правило, размещаются в канавках или на поверхности сцинтиллятора, либо внутри тела сцинтиллятора в специально выполненных на этапе экструзии отверстиях, как принято в модулях CRV эксперимента Mu2e.

Известно, что вклеивание сцинтилляторов в канавки при помощи оптического клея увеличивает сбор света с детектора на 40-50%. Однако, по нашим данным, до сегодняшнего дня на практике не используется вклеивание спектросмещающих волокон в отверстия внутри длинных сцинтилляторов. Это обусловлено коротким временем до начала полимеризации двухкомпонентных оптических клеев, что не позволяет заполнять отверстия в длинных счетчиках. Для решения этой проблемы авторами данного цикла работ был разработан и предложен оригинальный метод повышения светосбора путем закачки в отверстия жидкого оптического наполнителя с коэффициентом преломления, близким к коэффициенту преломления сцинтиллятора (полистирол) и внешней оболочки WLS волокна. В качестве наполнителя нами использовались силиконовые жидкости SKTN-MED (B) и PMX-200. Было разработано, создано и опробовано оборудование для закачки оптической жидкости в отверстие внутри сцинтиллятора с вставленным в него спектросмещающим волокном. Один из вариантов изготовленного оборудования позволяет одновременно закачивать оптическую жидкость в 32 отверстия. После закачки оптической жидкости в отверстия внутри сцинтиллятора все входные и выходные отверстия герметически закрываются при помощи двухкомпонентного оптического клея. Оптическая жидкость внутри сцинтиллятора остается в жидком состоянии в течении всего времени жизни детектора. **Принципиальным отличием данного метода от использования традиционного двухкомпонентного клея является отсутствие ограничения на время заполнения отверстия.**

Авторами проводились исследования сцинтилляционных счетчиков с жидкими наполнителями длиной 15 см, 50 см, 200 см, 500 см, 600 см. Показано, что данный метод увеличивает светосбор примерно на 30-40% во всех исследованных образцах.

Мы изучили радиационную стойкость на реакторе ИБР-2М предлагаемых наполнителей (силиконовых жидкостей SKTN-MED (B) и PMX-200) и некоторых двухкомпонентных оптических клеев. Обнаружено, что коэффициент пропускания света обоих силиконовых наполнителей практически не меняется после доз облучения до 10^{12} нейтронов на см^2 , на порядок превышающих ожидаемый флюенс за 3 года эксперимента. Продемонстрировано, что силиконовые жидкости SKTN-MED (B) и PMX-200 являются более радиационно стойкими по сравнению с традиционными двухкомпонентными оптическими клеями.

Прототипы счетчиков CRV, в том числе и с жидкими наполнителями, были исследованы нами совместно с коллегами на пучке протонов с энергией 120 ГэВ в Фермилабе. Результаты показали, что в пучке протонов счетчики с жидким наполнителем также имеют светосбор на 30% выше, чем аналогичные счетчики без наполнителя.

Результаты исследований по увеличению световыхода с длинных счетчиков посредством заполнения отверстий жидким оптическим наполнителем будут использованы в CRV системе эксперимента Mu2e. Так, модули CRV длиной 7 м будут размещены в той части установки, где

ожидается высокий флюенс нейтронов (до 10^{11} нейтронов на см^2), а само расположение этих счетчиков предполагает съем света только с одного конца. Коллаборацией рассматривается вариант, что для увеличения светосбора отверстия в данных модулях будут заполняться оптической жидкостью.

По плану работ, утвержденному коллаборацией, к концу 2021 года должно быть создано более 85 модулей CRV, что задает темп массового производства 1 модуль/неделя с проверкой качества на каждом этапе. Авторы разработали каждый этап массового производства модулей, обеспечили контроль качества на каждом этапе и показали, что такой темп достижим, в том числе и с заливкой 7-метровых счетчиков оптическим наполнителем.

Заключительный контроль качества счетчиков производится после сборки модуля CRV на созданном авторами стенде с регистрацией космических мюонов. Для этой цели авторы создали телескоп из 4-х катодно-стриповых камер с размерами $1 \times 1 \text{ м}^2$, которые используются для построения трека мюона с точностью до 0.1 мм. Для формирования быстрого триггера используются два сцинтилляционных счетчика с размерами $1000 \times 1000 \times 50 \text{ мм}^3$. Измеряется отклик каждого из 256 каналов на пролетающие через телескоп мюоны.

Созданные авторами первые несколько модулей длиной 6 м показали ожидаемый результат при измерении светосбора с середины модуля – не менее 55-60 фотоэлектронов с каждого канала.

Результаты, вошедшие в цикл работ, неоднократно представлялись на семинарах в ЛЯП ОИЯИ, в университетах и Лабораториях США, на совещаниях коллаборации Mu2e, на различных международных конференциях.

Список работ, вошедших в представляемый цикл:

1. A.Artikov, et al. **Mass Production and Quality Tests of a High-Efficiency Cosmic Ray Veto Detector for the Mu2e Experiment**
Book of abstracts, 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Manchester, UK.
2. A.Artikov, et al. **Light yield and radiation hardness studies of scintillator strips with a filler**
Nucl.Instrum.Meth. A930 (2019) 87-94, DOI: 10.1016/j.nima.2019.03.087.
3. Yu.N. Kharzheev, **Radiation Hardness of Scintillation Detectors Based on Organic Plastic Scintillators and Optical Fibers (Review)**
Phys.Part.Nucl. 50 (2019) no.1, 42-76, Fiz.Elem.Chast.Atom.Yadra 50 (2019) no.1, p. 6-65, DOI: 10.1134/S1063779619010027/
4. A.Artikov et al., **Photoelectron Yields of Scintillation Counters with Embedded Wavelength-Shifting Fibers Read Out With Silicon Photomultipliers**
Nucl.Instrum.Meth. A890 (2018) 84-95, DOI: 10.1016/j.nima.2018.02.023.
5. A.M. Artikov, et al., **Increase in the light collection from a scintillation strip with a hole for the WLS fiber using filling materials of various types**
Phys.Part.Nucl.Lett. 14 (2017) no.1, 139-143, DOI: 10.1134/S1547477117010058.
6. A.Artikov, et al., **Optimization of light yield by injecting an optical filler into the co-extruded hole of the plastic scintillation bar**
JINST 11 (2016) no.05, T05003, DOI: 10.1088/1748-0221/11/05/T05003.

7. Yu.N. Kharzheev, **Scintillation counters in modern high-energy physics experiments (Review)**
Phys.Part.Nucl. 46 (2015) no.4, 678-728, Fiz.Elem.Chast.Atom.Yadra 46 (2015) no.4, p.1226-1325.
DOI: 10.1134/S1063779615040048
8. Artikov et al., **Performance of Scintillator Counters with Silicon Photomultiplier Readout**
Presentation at the DPF 2015 Meeting of the American Physical Society Division of Particles and Fields, Ann Arbor, Michigan, August 4-8, 2015DPF2015-350
e-Print: arXiv:1511.00374
9. M.G. Albrow et al., **Fermilab Testbeam Facility Annual Report – FY 2015**
FERMILAB-TM-2615-DI, DOI: 10.2172/1251186.