

## ВЛИЯНИЕ ДЕТЕКТОРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ОТКЛИК ВЫСОКОГРАНУЛЯРНОГО АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА НА ОДИНОЧНЫЕ АДРОНЫ

С. С. Корпачев, М. В. Чадеева

*В детекторах, разрабатываемых для экспериментов на лептонных коллайдерах следующего поколения, предполагается использовать высокогранулярные калориметры. В частности, адронный калориметр планируется собрать из сцинтилляционных ячеек с прямым считыванием света кремниевыми фотоумножителями. По результатам экспериментального измерения светосбора в ячейке, разработанной для прототипа адронного калориметра CALICE, при регистрации минимально ионизирующих частиц была получена оценка детекторных эффектов. Влияние этих эффектов на разрешение адронного калориметра ILD было исследовано путем моделирования отклика детектора на одиночные нейтральные каоны. Показано, что вклад экспериментально измеренных детекторных эффектов в разрешение для одиночных частиц составляет порядка 0.5–1% в диапазоне энергий адронов 5–60 ГэВ.*

**Ключевые слова:** сцинтилляционные ячейки, высокогранулярный адронный калориметр, энергетическое разрешение.

*Введение.* Коллаборация CALICE разрабатывает прототипы высокогранулярных калориметров для детекторов нового поколения, в том числе для экспериментов на будущих лептонных коллайдерах. Основной подход к реконструкции энергии в детекторах с высокогранулярными калориметрами состоит в использовании метода потока частиц [1–3]. С 2006 по 2012 годы был проведен ряд успешных испытаний прототипов электромагнитных и адронных калориметров с беспрецедентной гранулярностью на тестовых пучках и была продемонстрирована эффективность и надежность метода

---

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: korpachevss@lebedev.ru.

потока частиц на реальных данных [4, 5]. Сейчас разрабатывается новый технологический прототип адронного калориметра на основе метода прямого считывания сигнала со сцинтиллятора кремниевым фотоумножителем (SiPM). Главная цель этой разработки – тестирование новой технологии считывания в системе сцинтиллятор-SiPM, методов измерения временных характеристик и калибровки, а также демонстрация масштабируемости встроенной электроники. Выбор конструкции ячейки с прямым считыванием оптического сигнала с помощью SiPM без спектросмещающего волокна обусловлен требованиями массового производства, чтобы гарантировать реалистичность как временных, так и трудовых затрат на сборку адронного калориметра из  $\sim 8$  миллионов ячеек, например, для детектора ILD [6]. Были протестированы ячейки различной геометрии [7–10] и была выбрана форма ячейки с лункой в центре большой поверхности, что обеспечивает возможность массового производства и достаточно хорошую однородность отклика.

В настоящей работе на основе экспериментально определенных в [11] детекторных эффектов в одной ячейке проведено моделирование влияния этих эффектов на энергетическое разрешение детектора в целом.

*Сцинтилляционные ячейки для технологического прототипа и измерение их характеристик.* В техническом описании проекта детектора ILD предполагается высокая сегментация всех подсистем детектора, включая калориметры со встроенной электроникой [6]. Детектор состоит из чередующихся слоёв сцинтиллятора и поглотителя. Активные слои адронного калориметра будут собраны из сцинтилляционных ячеек размером  $30 \times 30 \times 3$  мм<sup>3</sup>, а плоскости поглотителя предполагается сделать из стали или вольфрама. Каждая ячейка будет иметь лунку на одной из больших плоскостей, над которой будет располагаться SiPM, припаянный к встроенной плате электроники. Ячейки предполагается оборачивать в светоотражающую фольгу для предотвращения утечки сигнала в соседние ячейки.

Нами была протестирована одна такая ячейка, изготовленная для технологического прототипа калориметра CALICE. Ячейка изготовлена из материала BICRON408 на основе сцинтиллятора из поливинилтолуола. Радиус лунки равен 4.5 мм, а её глубина равна 1.6 мм. Ячейка была завернута в фольгу (3M<sup>TM</sup> Enhanced Specular Reflector), которая представляет собой плёнку с улучшенными оптическими свойствами и очень высокой отражающей способностью. Материал фольги сделан на основе алюминия. Фольга имеет отверстие в центре над лункой для размещения одного SiPM и дополнительное, меньшее по размеру отверстие для подвода сигнала от калибровочного светодиода.

Экспериментальная установка состояла из двух основных элементов: неподвижного столика, где находилась исследуемая сцинтилляционная ячейка в фольге, и движущейся подставки с закреплённым на ней источником частиц. Подвижный элемент позволял выполнять прецизионное сканирование по большой плоскости ячейки ( $xy$ ). В качестве источника в эксперименте был использован  $\beta$ -радиоактивный  $^{90}\text{Sr}$ , в котором правая граница энергетического спектра электронов составляет 2.28 МэВ. Источник располагался над исследуемой ячейкой, и электроны из источника двигались, соответственно, вдоль вертикальной оси  $z$ . Под основной ячейкой находилась триггерная ячейка для отбора тех событий, в которых электроны имеют достаточную энергию (от  $\sim 1.5$  МэВ и выше) для имитации минимально ионизирующей частицы при прохождении сцинтиллятора толщиной 3 мм. Для считывания сигнала с триггерной ячейки был использован другой кремниевый фотоумножитель в пороговом режиме, порог был установлен на уровне половины наиболее вероятного значения отклика на минимально ионизирующую частицу. Сканирование было выполнено с шагом 1.5 мм по обоим направлениям в плоскости  $xy$ . Более подробно эти измерения описаны в работе [11].

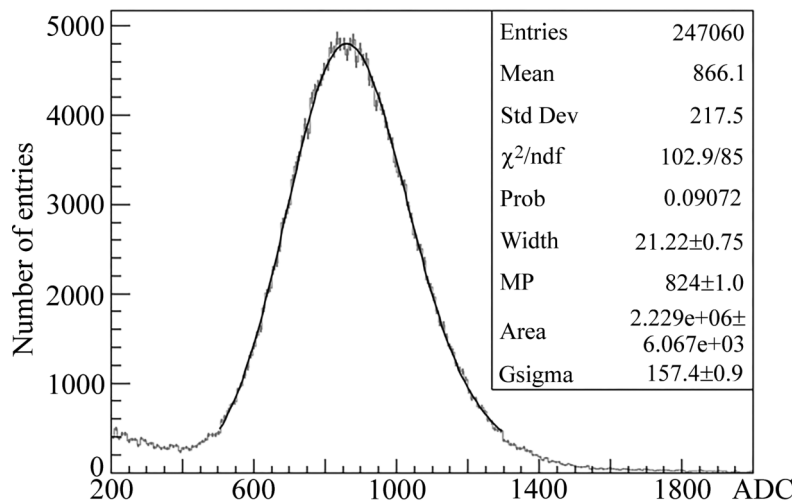


Рис. 1: Среднее по площади распределение отклика на минимально ионизирующую частицу по амплитуде в единицах отсчетов АЦП.

По результатам измерений во всех точках сканирования было получено обобщённое распределение отклика ячейки, которое представляет собой свертку идеального сигнала, возникающего вследствие ионизационных потерь, и детекторного отклика, включающего и неоднородность светосбора за счет геометрии ячейки, и шумы кремниевого фотоумножителя. Среднее по площади ячейки распределение отклика на минимально

ионизирующую частицу по амплитуде, полученное при сканировании ячейки с шагом 1.5 мм, показано на рис. 1. Идеальный сигнал описывается распределением Ландау, а детекторный отклик – функцией Гаусса. С помощью аппроксимации обобщённого распределения свёрткой функций Ландау и Гаусса была получена оценка вклада детекторных эффектов для одной ячейки. Под детекторными эффектами в данной работе имеются в виду неоднородность светосбора в системе сцинтиллятор-SiPM и шумы самого SiPM. Этот вклад, соответствующий дополнительному уширению сигнала, описываемому функцией Гаусса, составляет порядка 20% для ячейки с описанной выше конфигурацией.

*Моделирование и отбор событий.* С целью изучения вклада детекторных эффектов в энергетическое разрешение адронного калориметра детектора ILD было проведено моделирование отклика детектора на одиночные адроны с добавлением и без добавления экспериментально измеренного эффекта светосбора для одной ячейки. Для моделирования было использовано готовое программное обеспечение ILCSOFT, разработанное для реконструкции и анализа событий в экспериментах на электрон-позитронном коллайдере, включающее пакет Marlin, который обеспечивает модульную структуру программного обеспечения. Для подключения пакета Geant4, отвечающего за моделирование прохождения излучения через вещество детектора, был использован пакет DD4Sim, который содержит готовые драйверы с описанием геометрии детектора ILD. Кроме драйверов в пакете есть специальные файлы с набором параметров, отвечающих за калибровку энергетической шкалы как электромагнитного, так и адронного калориметров. При моделировании полномасштабного детектора транспорт оптических фотонов в сцинтилляторе не моделируется, и учёт этих эффектов реализован в специальном модуле оцифровки, который позволяет учесть геометрию ячейки, эффективность светосбора в ней и шумы фотодетектора.

Для изучения влияния детекторных эффектов модуль оцифровки был модифицирован. В этот модуль была введена функция, которая позволяет добавлять случайный сигнал в соответствии с распределением Гаусса при вычислении сигнала в каждой ячейке. Экспериментальные измерения отклика ячейки были выполнены только для прохождения минимально ионизирующей частицы перпендикулярно большой поверхности ячейки, в то время как в реальных событиях как первичная, так и вторичные частицы из адронного ливня могут двигаться под разными углами относительно большой поверхности ячеек. Однако нужно отметить, что эффект пересечения сцинтиллятора под разными углами автоматически учитывается при моделировании отклика в детек-

торе, поскольку ионизационные потери вычисляются вдоль всей траектории частицы в сцинтилляторе.

Моделирование включает несколько этапов. На первом этапе вычисляются ионизационные потери на основе пакета Geant4 в активном веществе детектора, затем проводится оцифровка, т.е. учёт детекторных эффектов, и на последнем этапе – кластеризация и реконструкция энергии адрона с учетом калибровки. При оцифровке с использованием модифицированного модуля детекторные эффекты были учтены путём добавления к отклику каждой ячейки вклада, имеющего распределение Гаусса с шириной, которую можно варьировать. На последнем этапе, поскольку в данном случае используются одиночные адроны, кластеризация сводится к простому суммированию всех сигналов в калориметрах. Для анализа разрешения адронного калориметра важно также было выбрать те события, в которых адронный ливень развивается преимущественно в адронном калориметре. Для такого отбора было использовано ограничение на величину энергии, зарегистрированной в электромагнитном калориметре, на уровне 1.5 ГэВ.

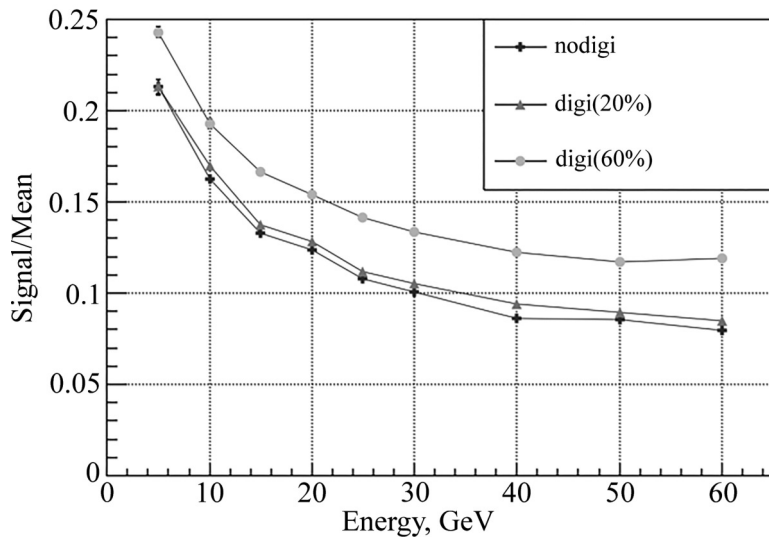


Рис. 2: Относительное энергетическое разрешение адронного калориметра ILD на одиночные каоны.

*Результаты.* Было проведено моделирование отклика для долгоживущих нейтральных каонов с энергиями 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 и 60 ГэВ, вылетающих изотропно из центра детектора ILD. Каждый набор данных содержал 40000 событий. Стандартная калибровка энергетической шкалы была выполнена по энергии адрона 20 ГэВ. Энерге-

тические распределения для каждой энергии были аппроксимированы функцией Гаусса в интервале  $\pm 1.5$  среднеквадратичных отклонений. Относительное разрешение вычислялось как отношение  $\sigma_G/M_G$ , где  $\sigma_G$  и  $M_G$  – это ширина и среднее аппроксимирующей функции, соответственно. Зависимость относительного разрешения от энергии адронов показана на рис. 2. Черные крестики соответствуют случаю, когда детекторные эффекты отсутствуют, серые треугольники отвечают случаю с детекторными эффектами на уровне 20%, а светло-серые кружки – детекторным эффектам на уровне 60%. Величина 60% была выбрана для проверки процедуры оцифровки, реализованной в моделировании. Таким образом показано, что реалистичная (экспериментально измеренная) величина детекторного эффекта на уровне 20%, включающая неоднородность светосбора в ячейке, ухудшает относительное разрешение адронного калориметра ILD не более, чем на 1% в диапазоне энергий адронов 5–60 ГэВ, то есть даёт незначительный вклад в энергетическое разрешение.

Авторы выражают благодарность Б. М. Бобченко, В. Ю. Русинову и Е. И. Тарковскому за предоставленное оборудование и помощь в проведении измерений. Работа была выполнена при поддержке гранта МОН 14.W03.31.0026.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. A. Thomson, Nucl. Instrum. Meth. A **611**(1), 25 (2009); doi: 10.1016/j.nima.2009.09.009.
- [2] CMS Collaboration (A. M. Sirunyan et al.), JINST **12**, 10003 (2017); doi: 10.1088/1748-0221/12/10/P10003.
- [3] ATLAS Collaboration (M. Aaboud et al.), Eur. Phys. J. C **77**, No. 466 (2017); doi: 10.1140/epjc/s10052-017-5031-2.
- [4] CALICE Collaboration (C. Adloff et al.), JINST **5**, P05004 (2010); doi: 10.1088/1748-0221/5/05/P05004.
- [5] CALICE Collaboration (C. Adloff et al.), JINST **6**, P07005 (2011); doi: 10.1088/1748-0221/6/07/P07005.
- [6] T. Behnke, J. E. Bray, P. N. Burrows, et al., The International Linear Collider Technical Design Report – Volume 4: Detectors (2013); <https://arxiv.org/abs/1306.6329>.
- [7] F. Simon, C. Soldner, Nucl. Instrum. Meth. A **620**(2-3), 196 (2010); doi: 10.1016/j.nima.2010.03.142.
- [8] G. Blazey, D. Chakraborty, D. Dysh Kant, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **605**(3), 277 (2009); doi: 10.1016/j.nima.2009.03.253.

- [9] F. Abu-Ajamieh, G. Blazey, S. Cole, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **659**(1), 348 (2011); doi: 10.1016/j.nima.2011.06.090.
- [10] B. Bobchenko, M. Chadeeva, M. Danilov, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **787**, 166 (2015); doi: 10.1016/j.nima.2014.11.086.
- [11] S. Korpachev, M. Chadeeva, Bulletin of the Lebedev Physics Institute **45**(11), 322 (2018); doi: 10.3103/S1068335618100093.

Поступила в редакцию 13 декабря 2019 г.

После доработки 3 февраля 2020 г.

Принята к публикации 26 февраля 2020 г.

*Публикуется по рекомендации Московской международной школы физики-2019 (ФИАН, Москва).*