

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Отчет по проекту
“Модернизация детектора CMS до 2020”
за 2013-2020 гг.**

ШИФР ТЕМЫ 02-0-1083-2009/2022

ДИРЕКТОР ЛФВЭ

В.Д.Кекелидзе

РУКОВОДИТЕЛИ ПРОЕКТА

А. В. Зарубин

И. А. Голутвин

ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОТЧЕТА В НОО

ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ

СПИСОК УЧАСТНИКОВ ТЕМЫ от ОИЯИ И СТРАН-УЧАСТНИЦ

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В.Ю.Алексахин, А.Б.Арбузов, С.А.Афанасьев, И.И.Белотелов, П.Д.Бунин, С.Г.Бондаренко, С.Е.Васильев, А.Ю.Верхеев, Н.Н.Войтишин, А.Г.Володько, М.Г.Гавриленко, Г.А.Голованов, А.О.Голунов, А.О.Голунов, И.А.Голутвин, Н.В.Горбунов, И.Н.Горбунов, Н.С.Голова, И.М.Граменицкий, Н.Н.Евдокимов, Ю.В.Ершов, В.Е.Жильцов, Н.И.Замятин, А.В.Зарубин, В.А. Зыкунов, В.Д.Калагин, А.Ю.Каменев, В.Ю.Каржавин, Л.Г.Кобылец, В.Ф.Конопляников, А.В.Котиков, Г.А.Козлов, В.В.Кореньков, А.М.Куренков, Е.Кураев, А.В.Ланёв, А.М.Маканькин, А.В.Малахов, В.А.Матвеев, И.М.Мельниченко, А.Мествиришвили, В.В.Мицын, П.В.Моисенз, Д.А.Олейник, Г.А.Ососков, Р.С.Пасечник, В.В.Пальчик, В.В.Перелыгин, А.Ш.Петросян, М.В.Савина, Р.Н.Семенов, А.В.Сидоров, А.Н.Скачкова, Н.Б.Скачков, В.Слунечкова, М.Слунечка, В.А.Смирнов, Д.А.Смолин, О.В.Теряев, Е.А.Тихоненко, С.В.Шматов, С.Г.Шульга, И.А.Филозова, М.Фингер, М.Фингер (мл)

Ереванский физический институт им. А. Алиханяна, Ереван, Армения

Н.Григорян, А.М.Сирунян, А.Тумасян, В.А.Хачатрян, Г.А.Хмаякян, С.А.Чатрчян

Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь

О.В.Дворников, Я.Дыдышка, Р.Ф.Зуевский, И.Ф.Емельяничик, Д.Ермак, В.Ермольчик, М.В.Коржик, А. Корнеев, В.Кувшинов, А.В.Литомин, В.В.Макаренко, И.Б.Марфин, В.А.Мосолов, А.В.Солин, Р.В.Стефанович, Х.С.Гонсалес, А.Г.Тихонов, А.А.Федоров, В.А.Чеховский, Н.М.Шумейко

Институт ядерных исследований и ядерной энергии, София, Болгария

К.Абаджиев, Ц.Х.Ангелов, И.Х.Атанасов, Г.Х.Анчев, И.Д.Ванков, В.И.Генчев, Й.В.Дамгов, Н.Дарменов, Л.П.Димитров, Б.И.Панев, С.Р.Пиперов, С.Г.Стойкова, Г.Г.Султанов, Р.К.Траянов, П.С.Яйджиев

Софийский университет, София, Болгария

А.Димитров, М.Дюлендарова, В.Кожухаров, Л.Литов, Е.Маринова, С.Марков, М.Матеев, Б.Павлов, П.Петков, Х.Сабева, Ж.Тотева

Институт физики высоких энергий ТГУ, Тбилиси, Грузия

Ю.Багатурия, Р.Квагадзе, Д.Ломидзе, В.Н.Роинишвили, Л.Рура, В.Чиладзе, Р.Шанидзе, З.Цамалаидзе

Грузинский технический университет, Тбилиси, Грузия

Г.Адамов, А.Хведелидзе

Харьковский физико-технический институт, Харьков, Украина

Х.Бессонова, О.Бунецкий, А.Исаев, В.Киска, К.Кименко, Л.Г.Левчук, С.Т.Лукьяненко, Т.Обиход, В.Попов, А.Приставка, Д.В.Сорока, П.В.Сорокин

Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков, Украина

С.Бараник, А.Бояринцев, Н.Галунов, Б.В.Гринев, В.Р.Любинский, О.Соболев, П. Жмурич

Институт ядерной физики Узбекской академии наук, Ташкент, Узбекистан

Э.А.Гасанов, Ю.Н.Коблик, М.Нишонов, Х.К.Олимов, А.Умаралиев, М.И.Фазылов, Б.С.Юлдашев

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК УЧАСТНИКОВ ТЕМЫ ОТ ОИЯИ И СТРАН-УЧАСТНИЦ	2
ОГЛАВЛЕНИЕ	3
1. ЦЕЛЬ МОДЕРНИЗАЦИИ CMS	5
2. ОБЯЗАТЕЛЬСТВА ОИЯИ В МОДЕРНИЗАЦИИ CMS	5
2. МОДЕРНИЗАЦИЯ ПЕРЕДНЕЙ МЮОННОЙ СТАНЦИИ ME1/1	7
2.1. РЕЗУЛЬТАТЫ 1-ОЙ ФАЗЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ТОРЦЕВОЙ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ CMS	7
2.1.1. МОДЕРНИЗАЦИЯ ТОРЦЕВОЙ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ В ПЕРИОД ПЕРВОЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ ОСТАНОВКИ LS1 LHC 8	8
2.2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ CSC В НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД ВТОРОГО ЭТАПА РАБОТЫ LHC (RUN 2).	11
2.3. ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ ТОРЦЕВОЙ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ CMS В ПЕРИОД НАБОРА ДАННЫХ RUN 2 В 2016-2017 Г.	12
2.4. РЕЗУЛЬТАТЫ 2 ФАЗЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ТОРЦЕВОЙ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ CMS	14
2.4.1. МОТИВАЦИЯ.	14
2.4.2. МОДЕРНИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРОВ ТОРЦЕВОЙ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ (ME).....	15
2.4.3. МОДЕРНИЗАЦИЯ, ТЕСТИРОВАНИЕ, СБОРКА И УСТАНОВКА MEх/1 CSC.	16
2.4.4. МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ CSC В ПЕРИОД LS2.	18
2.5. ВЫВОДЫ.....	19
2.6. ПУБЛИКАЦИИ	19
3. МОДЕРНИЗАЦИЯ ТОРЦЕВЫХ АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ HE (ФАЗА I).....	21
3.1. ЗАМЕНА ЭЛЕКТРОНИКИ HE.....	21
3.2. МОДЕРНИЗАЦИЯ HE В ПЕРИОД ПЕРВОЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ ОСТАНОВКИ LHC.....	22
3.3. ТЕСТИРОВАНИЕ НОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ HE.....	23
3.3.1. ТЕСТИРОВАНИЕ КРЕЙТА МТСА И ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ МОДУЛЕЙ RM И ССМ НА ПРОТОТИПЕ HE ДЕТЕКТОРА В ЗОНЕ H2 ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА УСКОРИТЕЛЯ SPS	23
3.3.2. ТЕСТИРОВАНИЕ НА СТЕНДЕ СЕРИЙНЫХ МОДУЛЕЙ RM И ССМ	24
3.3.3. ТЕСТИРОВАНИЕ НА СТЕНДЕ ПО ПРОВЕРКЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ ВСЕХ МОДУЛЕЙ RM И ССМ.....	25
3.4. МОДЕРНИЗАЦИЯ ТОРЦЕВЫХ АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ В ПЕРИОД ДЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ОСТАНОВКИ БАК В 2017-2018 ГГ.	25
3.5. МОНТАЖ, ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ И КАЛИБРОВКА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ HE.....	26
3.6. МОДЕРНИЗАЦИЯ ЦЕНТРАЛЬНЫХ АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ В ПЕРИОД ДЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ОСТАНОВКИ БАК В 2019-2020 ГГ.	28
3.7. ПУБЛИКАЦИИ	31
4. НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ HE ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ФАЗЫ II МОДЕРНИЗАЦИИ УСТАНОВКИ.....	32
4.1. РАЗРАБОТКА ВАРИАНТА СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ТАЙЛА, РАЗДЕЛЕННОГО НА НЕСКОЛЬКО ПОЛОСКОВЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ	33
4.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ С ОБЛУЧЕННЫМИ МЕГАТАЙЛАМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МОДЕРНИЗАЦИИ HE.....	35
4.3. ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТООВОГО ВЫХОДА ИЗ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ.....	37
4.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ SiPM ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ БОЛЬШИМИ ПОТОКАМИ НЕЙТРОНОВ	43
4.5. ИЗМЕРЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ПЛЕНОЧНЫМИ ДОЗИМЕТРАМИ В ДВУХ СЛОЯХ КАЛОРИМЕТРА HE... ..	45
4.6. ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ ДЛЯ ФАЗЫ II	46
4.7. ОПТИМИЗАЦИИ ПОПЕРЕЧНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА ДЛЯ ФАЗЫ II	47
4.8. ПУБЛИКАЦИИ	48
5. НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТОРЦЕВОЙ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ CMS В РАМКАХ ФАЗЫ II	50
5.1. ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТОВ «СТАРЕНИЯ» НА УСТАНОВКЕ GIF++.....	50
5.1.1. ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК CSC В ПУЧКАХ HL-LHC ПРИ НАЛИЧИИ НЕКОРРЕЛИРОВАННОГО ФОНА .	52
5.2. ПУБЛИКАЦИИ	54
6. РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ.....	55

6.1.	РАЗВИТИЕ АЛГОРИТМОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	55
6.1.1.	РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕК-СЕКМЕНТОВ	55
6.1.2.	РЕКОНСТРУКЦИЯ МЮОНОВ И ПАР МЮОНОВ	57
6.1.3.	РЕКОНСТРУКЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ТОРЦЕВОМ КАЛОРИМЕТРЕ ФАЗА II И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРА	60
6.1.4.	РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ С КВАРКОВЫМИ И ГЛЮОННЫМИ СТРУЯМИ.....	62
6.2.	РАЗВИТИЕ СЦЕНАРИЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ GRID- ТЕХНОЛОГИЙ	64
6.3.	ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ СВЕТИМОСТИ HL-LHC	64
6.4.	ПУБЛИКАЦИИ	66
7.	ПУБЛИКАЦИИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ	69
8.	ПЛАН-ГРАФИК РАБОТ	69

Проект участия ОИЯИ в модернизации CMS основан на утвержденном ЦЕРН проекте модернизации детектора CMS до 2020 “Upgrade of CMS Detector through 2020”, CERN-LHCC-2011-06.

1. Цель модернизации CMS

Фаза I: Усовершенствование детектора CMS, необходимое для обеспечения эффективной работы в установки в режиме высокой светимости $1-2 \times 10^{34} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$ и полной энергии LHC до $\sqrt{s} = 14 \text{ ТэВ}$.

Фаза II: Развитие детектора CMS, необходимое для эффективной работы в установки в режиме очень высокой светимости до $5 \times 10^{34} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$ и интегральной светимости до 3 абн^{-1} (attobarn physics).

ОИЯИ в составе сотрудничества RDMS CMS участвует в модернизации под-систем детекторов, за которые несет с самого начала проекта полную ответственность: передние мюонные станции ME1/1, торцевые адронные калориметры HE, а также участвует в проведении научно-методических исследований, необходимых для подготовки дальнейшей модернизации установки (Фаза II проекта).

2. Обязательства ОИЯИ в модернизации CMS

Полная стоимость проекта модернизации детектора CMS в Фазе I “Upgrade of CMS Detector through 2020”, CERN-LHCC-2011-06, утверждена на заседании ресурсного комитета ЦЕРН – RRB в октябре 2012 г. в размере $\sim 66,6$ млн. шв. франков.

При утверждении этого проекта дирекция ОИЯИ взяла на себя следующие обязательства:

- модернизация передних мюонных станций ME1/1 500 тыс. шв. франков
- дополнительное финансирование российского правительства 90 тыс. шв. франков
- модернизация торцевых адронных калориметров HE 486 тыс. шв. франков
- вклад в общий фонд (Common Fund in-cash) 100 тыс. шв. франков.
- при полном вкладе ОИЯИ в размере 1,086 млн. шв. франков до 2020 г.

Для выполнения этого обязательства с руководством CMS согласован следующий график работ, по которому будет осуществляться зачет вклада ОИЯИ в проект, представленный в приложении – форма № 29:

- подготовка и проведения демонтажа ME1/1 (2013)
- разработка, создание, монтаж и наладка электроники ME1/1 (2013- 2019)
- монтаж камер ME1/1 (2013-2014)
- запуск, обеспечение работы и развитие ME1/1 (2013-2019)
- пучковые исследования продольной сегментации HE (2013-2015)
- создание, наладка и запуск электроники и фотодетекторов HE (2014- 2019)

Выполнение обязательств ОИЯИ и стран участниц ОИЯИ (RDMS-DMS) по 1-ой фазе модернизации торцевой мюонной системы CMS успешно завершены в 2019 г.

Обязательства по 2ой фазе модернизации мюонной системы CMS определены в дополнении №3 Приложения №13 к Меморандуму о взаимопонимании в области сотрудничества по созданию детектора CMS (CERN-MoU-2019-008) [9]: «Электроника детектора и ОТМВ» и «Камеры RE3/1 RE4/1».

Общий вклад ОИЯИ в CORE¹ (Приложение 4 к Меморандуму о взаимопонимании) составил 151 тыс. шв. франков (76 тыс. шв. франков - из бюджета ОИЯИ и 75К шв. франков – из бюджета Грузинского технического университета и Тбилисского государственного университета).

Кроме того, дополнительные расходы ОИЯИ на создание новых систем охлаждения для ME1/1 камер и на систему контроля утечки воды, составили 63 тыс. шв. франков. Расходы будут зачтены в качестве дополнительного вклада ОИЯИ в бюджет M&O-B мюонной системы в 2021 году.

Оценка бюджета расходов на НИР в рамках 2ой фазы модернизации мюонной системы включает следующее:

- Подготовка к модернизации в период LS3. Оборудование рабочей зоны для реконструкции ME_x/1 камер, создание испытательных стендов, сервисных коммуникаций и т.д. – 12 тыс. шв.франков.
- Модернизация КСК в течение периода останковки БАК LS2 и подготовка к периоду LS3. Изготовление кабелей, сервисных коммуникаций для КСК, закупка инструмента, разъемов, труб и т. д. – 13 тыс. шв. франков.
- Модернизация соединительной панели ME1/1. Приобретение компонентов, материалов и изготовление механических деталей – 15 тыс. шв. франков.
- Модернизация высоковольтного фильтра для ME1/1 КСК. Затраты на комплектующие, изготовление печатных плат и монтаж компонентов - 7 тыс. шв. франков.
- Разработка и создание прототипа электронной платы LVDB со встроенным модулем управления и контроля LVMB. Испытание на радиационную стойкость платы LVDB. Приобретение комплектующих для опытных образцов, кабелей и разъемов, Изготовление тестовых плат для испытаний на радиационную стойкость - 5,0 тыс. шв. франков.
- Модернизация стенда для НИР по исследованию старения КСК на GIF ++. Сборка тестовой ME1/1 КСК, монтаж камеры на установке GIF ++. Закупка кабелей, разъемов, и др. компонентов - 4 тыс. шв. франков.
- Участие в НИР по исследованию новых газовых смесей.
 - Создание газосмесительного стенда для исследования свойств новых газовых смесей. Приобретение флоуметров для контроля скорости потока газов, насосов, разъемов, труб, баллонов с различными газовыми смесями – 24 тыс. шв. франков.
 - Сборка тестовых камер: мини-КСК - 4 тыс. шв. франков.

2. МОДЕРНИЗАЦИЯ ПЕРЕДНЕЙ МЮОННОЙ СТАНЦИИ ME1/1

2.1. Результаты 1-ой фазы модернизации торцевой мюонной системы CMS

В разделе представлены цели и результаты модернизации катодно-стриповых камер (CSC) торцевой части мюонной системы CMS, выполненной в период первой длительной остановки LHC. CSC регистрируют мюоны с высокой точностью в области псевдобыстрот $0,9 < |\eta| < 2,4$, работая в неоднородном магнитном поле и в условиях высокого уровня радиационного фона. Торцевая мюонная система CMS состоит из четырех мюонных станций (ME1–ME4), включающих 468 CSC. Каждая камера состоит из 7 фольгированных панелей, образующих 6 газовых зазоров (субкамер), в которых анод представляет из себя массив проволочек, находящиеся под потенциалом 2,9–3,6 кВ (в зависимости от типа камеры). Координата трека определяется распределением наведенного заряда на стрипах и электронным сигналом с анодных проволочек. Информация, считываемая с катодных стрипов, имеющих ширину 3–16 мм, отфрезерованных на поверхности фольгированных панелей, определяет азимутальную координату мюона, которая важна для измерения его поперечного импульса. Информация, считываемая с анодных проволочек, позволяет измерить радиальную координату мюона и точную временную отметку регистрации локального мюонного трека в каждой из 6-ти плоскостей камеры. 3-D сегменты, полученные фитированием локальных координат мюона в каждой из 6-ти плоскостей камеры, называемые заряженными треками, образуют примитивы для выработки триггера в заданной области интереса.

Передняя мюонная станция ME1/1 является важнейшим детектором передней торцевой части установки CMS. ME1/1 расположена внутри соленоида сверхпроводящего магнита в зазоре шириной 70 см между адронным калориметром HE и железным диском (рис. 2.1).

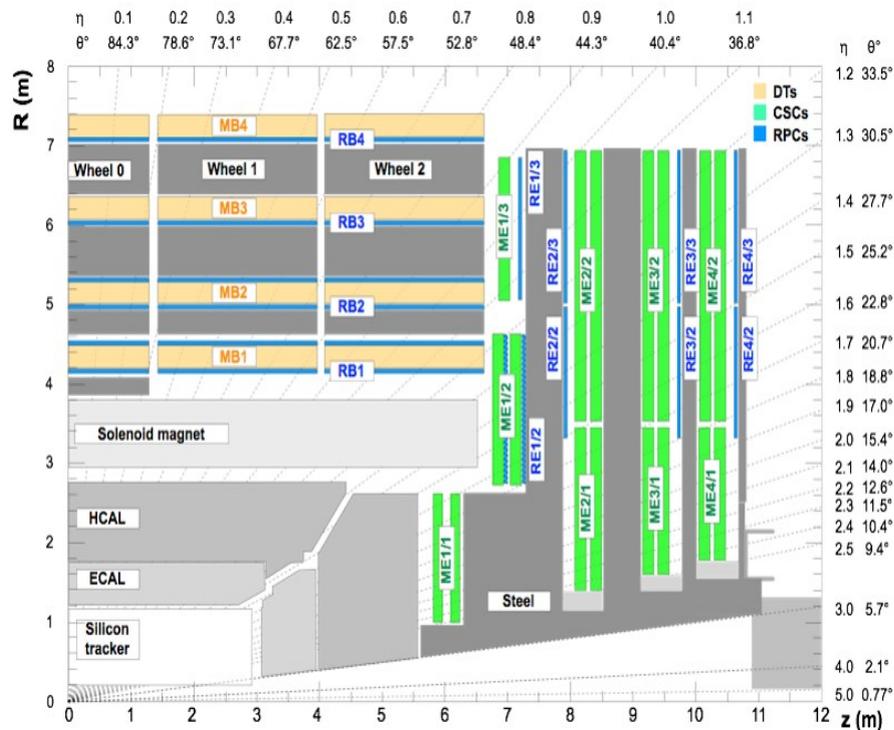


Рис. 2.1. Продольное сечение детектора CMS (1/4 часть).

Азимутально передняя мюонная станция разделена на 36 секторов (камер CSC). Всего на 2 торцевые части установлено 72 камеры, которые работают в сильном аксиальном магнитном поле ($B_z \sim 3$ Тесла) при высоком уровне фоновых загрузок до $10^3 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (~ 100 кГц на канал) и при этом обладают лучшим в торцевой мюонной системе пространственным разрешением: $\sigma_x \leq 75$ мкм, что обеспечивает точную привязку пространственной координаты мюона, определяемой мюонной системой, к координате внутреннего трекера детектора CMS.

CSC оснащены быстрой и надежной электроникой, обеспечивающей способность работы в режиме самотриггирования. В начальный период работы LHC, при низкой светимости, мюонная система CMS обеспечила надежный и эффективный набор экспериментальных данных.

Основной задачей модернизации установки CMS является обеспечение эффективной работы всех систем в условиях повышенной светимости LHC (более $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) протон-протонных соударений.

План первого этапа модернизации торцевой мюонной системы CMS в течение периода первой длительной остановки LHC, сформулированный в техническом проекте CMS¹, включает следующие основные направления: строительство новой мюонной станции ME4/2 (рис. 3.1), модернизация детекторов передней станции ME1/1 и оснащение их новой быстродействующей электроникой считывания.

2.1.1. Модернизация торцевой мюонной системы в период первой длительной остановки LS1 LHC

Строительство новой мюонной станции ME4/2, состоящей из 72-х (CSC), расширяет мюонную систему на одну дополнительную мюонную станцию, повышая надежность и эффективность регистрации мюонов в диапазоне псевдобыстрот $1,2 < \eta < 1,8$. Уменьшение количества ложных событий при триггировании и реконструкции трека (рис. 2.2) позволяет снизить порог измерения поперечного импульса мюона. Детекторы мюонной станции ME4/2 оснащались электроникой, демонтированной со станции ME1/1 (восстановленной после замены).

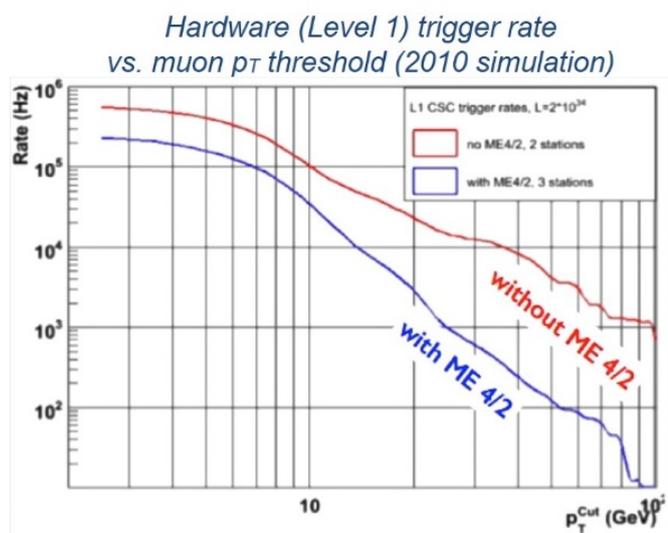


Рис. 2.2. Зависимость частоты триггера первого уровня от порога регистрации поперечного импульса.

¹ CMS Collaboration, “Technical Design Proposal for the Upgrade of the CMS Detector through 2020”, CMS UG-TP-1, 2011.

Основные задачи модернизации передней мюонной станции ME1/1: повышение эффективности и точности измерения координаты мюона, а также повышение эффективности выработки триггера. Особенность детекторов мюонной станции ME1/1 состоит в том, что для уменьшения загрузок в области больших значений псевдобыстрот $2,1 < \eta < 2,4$ (субкамера ME1/1a) плоскости стрипов разделены поперечным зазором на две субкамеры ME1/1a и ME1/1b.

На этапе строительства CMS для уменьшения количества каналов электроники считывания стрипы в субкамере ME1/1a были объединены в группы по три и вместо трех карт считывания информации со стрипов (CFEB) была установлена одна, что привело к неоднозначности в триггировании в области $2,1 < \eta < 2,4$. Занятость каналов считывания в камере ME1/1a возросла примерно в 3 раза (рис. 2.3), что привело к деградации эффективности триггирования. В результате модернизации объединение стрипов 3 в 1 было устранено, и восстановлен порядок считывания, при которой каждому стрипу соответствует свой канал считывания.

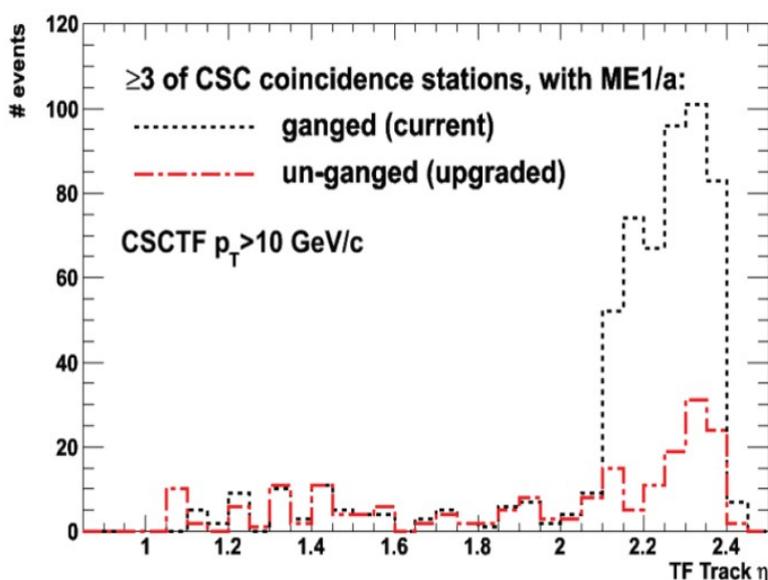


Рис. 2.3. Гистограмма количества событий в каналах считывания информации при объединении в субкамере ME1/1a 3-х стрипов в один канал считывания и без него.

В субкамере ME1/1a было установлено 2 дополнительные карты считывания информации со стрипов. Всего на каждой камере ME1/1 после модернизации было установлено семь 96-ти канальных цифровых карт считывания информации с катодных стрипов (DCFEB). Отличие DCFEB от предыдущей аналоговой версии карты CFEB состоит в следующем: аналоговая память заменена на цифровую конвейерную память, позволяющую работать без мертвого времени, что повысило эффективность детектора при больших нагрузках. На цифровой карте DCFEB установлена современная логическая матрица Virtex 6 и организован оптический съем информации. Всего для установки на камеры ME1/1 изготовлено и проверено 554 карты DCFEB. Заменяемые платы CFEB монтировались на новые камеры мюонной станции ME4/2. Плата выработки анодного локального трека ALCT снабжена новой программируемой схемой Spartan 6, позволяющей работать с большими нагрузками. Модернизация накамерной электроники в свою очередь потребовала замены триггерных модулей TMB и модулей считывания информации DMB в периферийных крейтах.

Разработаны, изготовлены и установлены новые модули OTMB и ODMB, способные принимать оптическую информацию с 7 цифровых карт DCFEB. Увеличение количества электроники повлекло за собой необходимость в новой, более мощной системе низковольтного питания, включающей 4 дополнительных первичных источника питания Maraton мощностью 3,6 кВт, коммутационные панели и 7-ми каналные платы распределения питания на детекторах LVDB-7. Блок-схема модернизированной электроники считывания мюонной станции ME1/1 расположенной на камерах и в периферийных крейтах, представлена на рис. 2.4. Желтым цветом отмечены электронные модули, разработанные и изготовленные для модернизации мюонной станции ME1/1.

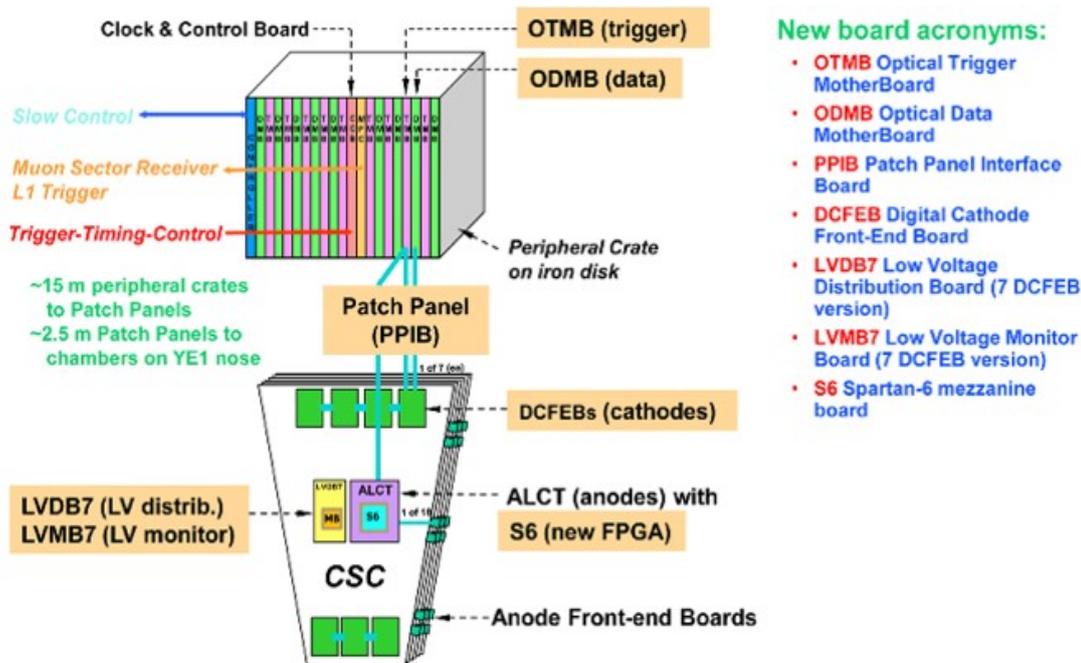


Рис. 2.4. Блок-схема модернизированной электроники считывания мюонной станции ME1/1.

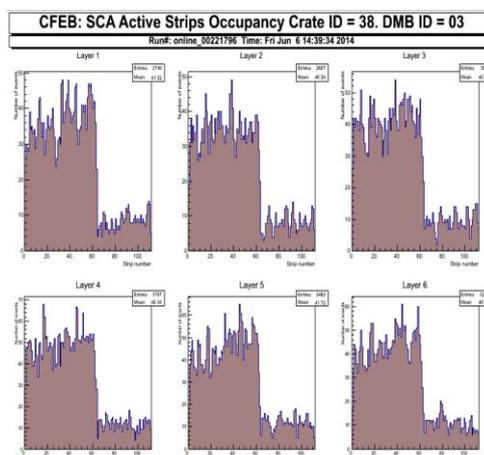


Рис. 2.5. Слева: стенд для проверки камер после сборки; справа: пример гистограммы качества данных – загрузка по стрипам.

Все детекторы мюонных станций ME1/1 и ME4/2 были многократно проверены до и после монтажа в экспериментальную установку CMS. Полный набор тестов включал про-

верку общего функционирования, проверку соединений, тесты триггерной логики, проверку качества передаваемых данных и измерение уровня шумов. Для проверки использовался входной сигнал как от генератора импульсов, так и от космических частиц. Каждая камера проходила поэтапное тестирование параметров электроники и финальный тест – набор данных на космических мюонах. Камеры, прошедшие все этапы тестирования, считались готовыми к монтажу в экспериментальную установку.

На рис. 2.5 показаны стенд для проверки камер после сборки и пример проверки качества данных – гистограммы загрузки 6-ти субкамер по каналом катодной электроники. Тесты проверки соединений и качества данных повторены после монтажа камер в CMS.

2.2. Характеристика работы CSC в начальный период второго этапа работы LHC (Run 2).

Первые протон-протонных соударения с энергией $\sqrt{s}=13$ ТэВ были получены на LHC 13 июня 2015 г. С тех пор модернизированные камеры торцевой мюонной системы стабильно работают, показывая лучшие, по сравнению с первым периодом набора данных, характеристики. Загрузка реконструированных событий однородна для каждого отдельного кольца (рис. 2.6). Это наглядный тест работоспособности камер.

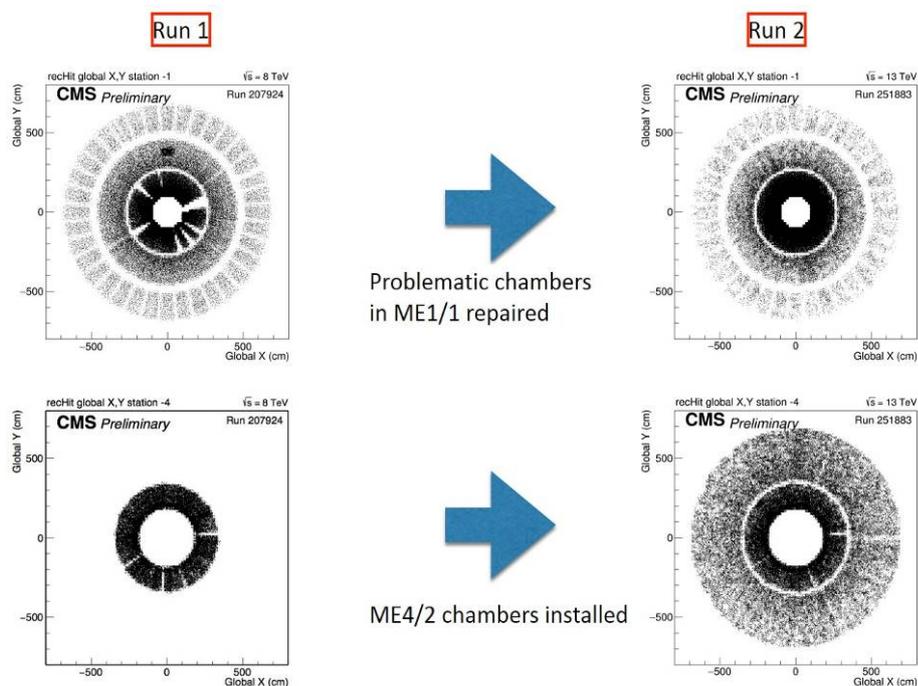


Рис. 2.6. Распределение реконструированных событий для станций ME1/1 и ME4/2.

Неправильно работающие детекторы показывают либо слабую, либо слишком высокую загрузку. Сравнительная характеристика загрузки реконструированных событий, полученных во время 1-го и 2-го периодов набора данных, можно увидеть улучшение работоспособности мюонных камер во 2-м периоде за счет замены и ремонта нескольких проблемных камер ME1/1. Пространственное разрешение модернизированных детекторов ME1/1a, перекрывающих кинематическую область с псевдобыстродами $2,1 < |\eta| < 2,4$ улучшилось на 20%. Во втором периоде набора данных значение пространственного разрешения ME1/1a составило $\sigma = 51$ мкм, в то время как в первом периоде разрешение было $\sigma = 64$ мкм (рис. 2.7). Причина повышения точности восстановления пространственной координаты в ME1/1a определяется тем, что при исправлении, упомянутого выше 3-х

стрипового объединения, произошло уменьшение входной емкости и, соответственно, снизились шумы в канале считывания. Пространственное разрешение всех камер торцевой мюонной системы варьируется в пределах: 50–140 мкм, в зависимости от станции, что соответствует азимутальному разрешению $\Phi \sim 0,1$ мрад.

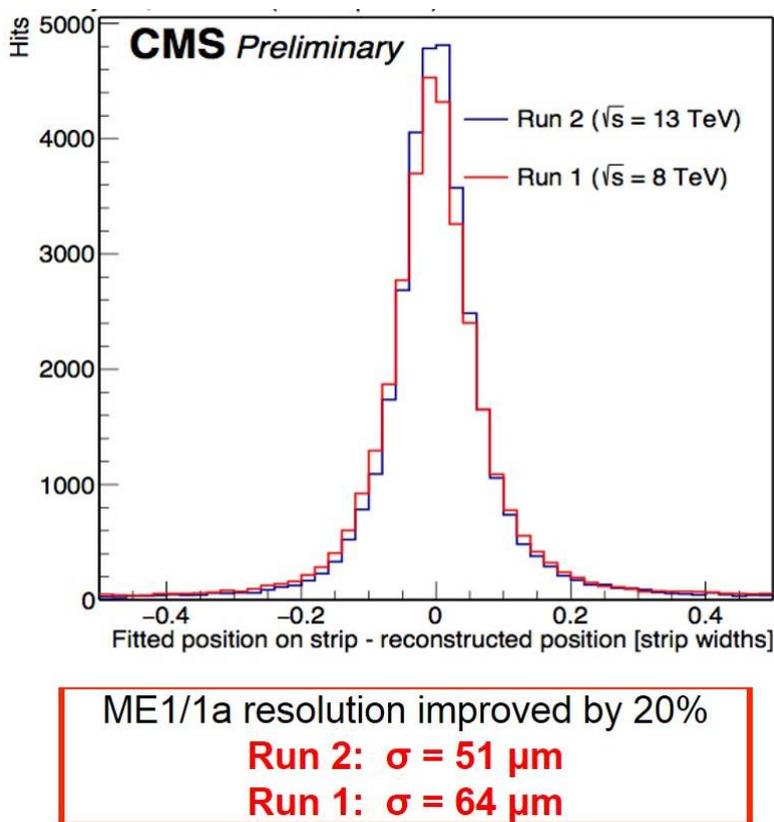


Рис. 2.7. Гистограмма отклонения координаты трека в субкамере ME1/1a, от расчетной координаты трек-сегмента по данным Run 1 и Run 2.

Модернизация мюонной станции ME1/1 в период первой длительной остановки LHC позволила устранить неоднозначность в определении координаты в области больших значений псевдобыстрот $2,1 < \eta < 2,4$ и уменьшить мертвое время. Пространственное разрешение субдетектора ME1/1a улучшилось на 20%. Станция ME4/2 расширила торцевую мюонную систему до 4-х станций, уменьшила количество ложных треков и повысила надежность и эффективность регистрации событий.

2.3. Характеристика работы торцевой мюонной системы CMS в период набора данных Run 2 в 2016-2017 г.

В 2016–2017 гг. CMS набирал данные на pp-взаимодействиях. Мгновенная светимость в точке взаимодействия P5 в 2017 г. достигла рекордного значения $1,8 \times 10^{34}$ Гц/см². В 2017 году LHC уже превысил величину интегральной светимости в 41 фбн^{-1} , что превышает статистику 2016 г. Рис. 2.8 показывает гистограмму относительного количества рабочих каналов в суб-детекторах установки CMS. Видно, что в целом рабочая эффективность детектора в 2017 г. выше 95%, в то время как эффективность Мюонного детектора (DT, RPC и CSC) выше 98%. Сравнивая данные 2016–17 гг. можно увидеть, что ухудшение эффективности каналов мюонной системы за этот период незначительно.

Данные в таблице 2.1 представляют величины пространственного разрешения в 10-ти станциях ME торцевой мюонной системы в pp-взаимодействиях 2016 и 2017 гг. Видно,

что в эти периоды пространственное разрешение станций было стабильным. Временное распределение трек-сегментов в катодно-стриповых камерах торцевой мюонной системы CMS приведено на рис. 2.9. В гистограмму заносились данные трек-сегментов, ассоциированных с мюонами, имеющими $p_T > 5$ ГэВ/с, полученными в протон-протонных взаимодействиях с энергией в системе центра масс 13 ТэВ в 2017 г. Средняя величина 0,1 нс и среднеквадратичное отклонение 3,3 нс хорошо согласуются с данными 2016 г. (0,2 нс и 3,2 нс соответственно). Подробно результаты исследований работы мюонной системы изложены в [1].

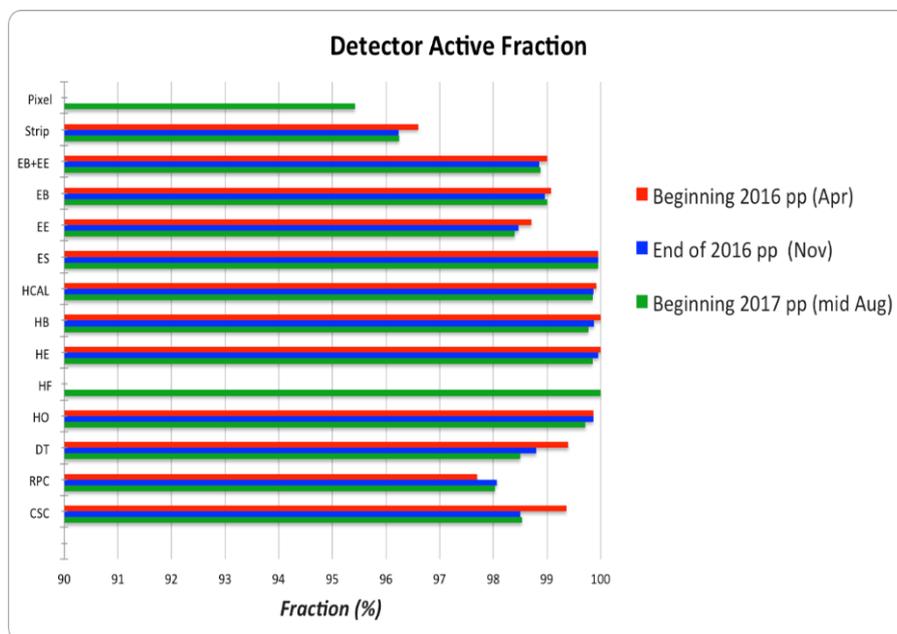


Рис. 2.8. Относительное количество рабочих каналов в суб-детекторах установки CMS.

Табл. 2.1. Величины пространственного разрешения в станциях Торцевой мюонной системы в pp-взаимодействиях (данные приведены в микронах).

Station	Oct 2016 6 fb^{-1}	Jun 2017 4 fb^{-1}
ME1/1a	46	45
ME1/1b	52	52
ME1/2	87	88
ME1/3	105	105
ME2/1	129	132
ME3/1	123	126
ME4/1	123	126
ME2/2	139	141
ME3/2	139	141
ME4/2	143	144

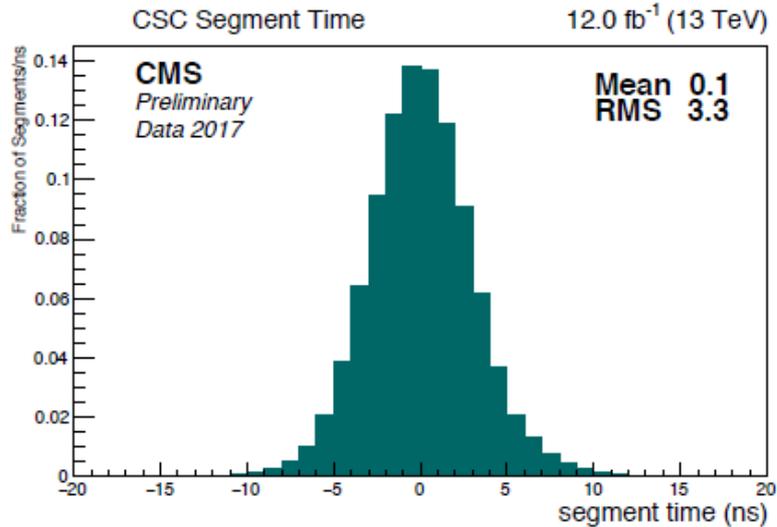


Рис. 2.9. Временное распределение трек-сегментов, полученное на данных pp-взаимодействий в катодно-стриповых камерах торцевой мюонной системы CMS.

2.4. Результаты 2 фазы модернизации торцевой мюонной системы CMS

2.4.1. Мотивация.

Основная задача 2-го этапа модернизации CMS [5] направлена на обеспечение эффективной работы установки в условиях высокой светимости БАК до $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ при интегральной величине светимости 3000fb^{-1} .

В Таблице 2.2. приведены сравнительные характеристики параметров коллайдера и мюонной системы CMS для работы в условиях максимальной расчетной светимости и в условиях повышенной светимости БАК (HL-LHC). Очевидно, что увеличение светимости в 5 раз, увеличение частоты триггера в 7,5 раза и увеличение задержки триггера первого уровня в 4 раза накладывают дополнительные требования для эффективной работы детекторов и электроники, что требует модернизации некоторых систем и электронных модулей.

Основной задачей модернизации торцевой мюонной системы является замена электроники считывания CSC, расположенной как на камерах, так и в удаленных крейтах. На детекторы, расположенные на внутренних кольцах четырех мюонных станций: ME1/1, ME2/1, ME3/1 и ME4/1 (обобщенно: ME x /1) планируется установить более быстродействующие электронные модули, которые соответствуют требованиям для работы в условиях высокой светимости БАК: задержке триггера 12,5 мкс и максимальной частоте триггера 750 кГц.

Большинство обновлений будет выполнено в период LS3. Однако, поскольку период LS3 будет крайне загруженным, принято решение заменить электронику на камерах ME x /1 в период длительной остановки LS2 (2019-2021 гг.).

Таблица 2.2

	Parameter	LHC	HL-LHC	Increase factor
Collider	Instantaneous luminosity ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	10^{34}	5×10^{34}	5
	Pileup collicions	30	150	5

	Integrated luminosity (fb ⁻¹)	300	3000	10
CMS	L1 trigger rate (kHz)	100	750	7.5
	L1 trigger latency (μs)	3.2	12.5	3.9
	Muon system DAQ bandwidth		x10	10

Электроника считывания информации с катодных стрипов (CFEB) на камерах ME2/1, ME 3/1 и ME 4/1 заменяются на платы DCFEB, которые в период LS1 были установлена на камерах ME1/1. Замена электроники будет произведена на 108 камерах MEx/1. Для обеспечения низковольтного питания MEx/1 камер был спроектирован и изготовлен в количестве 120 блоков электронный модуль распределения низковольтного питания LVDB5. На камеры мюонной станции ME1/1 устанавливаются новые платы xDCFEB с повышенным быстродействием. Для замены в период LS3 электроники в периферийных крейтах разрабатываются новые электронные модули управления триггером и считыванием данных (OTMB, ODMB). Кроме того, существующие оптоволоконные кабели, соединяющие электронику считывания CSC модулями DAQMB в периферийных крейтах, будут заменены во время периода LS3 на оптоволоконные кабели с более высокой пропускной способностью.

В условиях высокой светимости БАК существенно возрастает радиационное воздействие на детекторы и электронику, приводящее к эффектам «старения» элементов конструкции CSC и радиационному повреждению компонентов электронных модулей. Общая доза облучения увеличится в 5 раз (требуемый коэффициент безопасности 3), одновременно в 5 раз увеличится частота событий и фоновая загрузка. В связи с этим, необходимо проверить и сертифицировать детекторы и электронику считывания для работы в условиях высокой светимости БАК (HL LHC). Комплексное исследование старения детекторов проводится на установке GIF ++ в ЦЕРНе [6,7]. Для старения электроники подбирались условия, аналогичные работе в режиме высокой светимости. Облучение проводилось на различных установках: CERN (CHARM), UC Davis (циклотрон) и TAMU (реактор).

2.4.2. Модернизация детекторов торцевой мюонной системы (ME).

Основной задачей модернизации торцевой мюонной системы CMS в период LS2 является замена электроники считывания CSC внутренних мюонных станций MEx/1 (всего 180 камер).

Период LS3 посвящен существенной модернизации CMS - созданию новых детекторных систем: мюонной станции ME0 на основе детекторов GEM, адронного калориметра с высокой гранулярностью HGCal и торцевой станции временной синхронизации (ETL-Endcap Timing Layer). Интеграция кабелей и сервисов указанных выше детекторов подразумевает значительную модернизацию и реинтеграцию торцевого диска YE1, так как имеющиеся на диске радиальные кабельные лотки не смогут вместить все коммуникации систем HGCal, ME1/1, ME0, RE. Наряду с этим потребуются модернизация распределительных панелей камер ME1/1, расположенных на дисках YE1. Для освобождения пространства для укладки кабелей HGCal, которые планируется проложить поверх ME1/1 камер, требуется уменьшить высоту распределительных панелей.

Основные направления и задачи участия группы ОИЯИ в модернизации торцевой мюонной системы CMS состоят в следующем:

- Переоборудование CSC, расположенных на внутренних кольцах мюонных станций MEx/1, тестирование, сборка и монтаж CSC в течение периода LS2.
 - Проектирование и создание инфраструктуры для модернизации камер MEx/1.
 - Сборка, установка и ввод в эксплуатацию мюонных камер MEx/1.
 - Модернизация системы охлаждения камер ME1/1.
- Модернизация электроники в период LS2 и подготовка к периоду LS3.

- Проектирование и производство 120-ти новых электронных модулей распределения низкого напряжения (LVDB-5).
- Изготовление 120 кабелей референсного напряжения.
- Проектирование и изготовление испытательного стенда для плат LVDB.
- Модернизация и производство (всего 72 платы) высоковольтных фильтров для ME1/1 CSC – планируется установить на камеры в период LS3.
- Модернизация и производство 36 распределительных-панелей ME1/1 - планируется установить на YE1 диски испытаний
- Продолжение разработки и тестирования алгоритма реконструкции трек-сегмента в CSC.
- Продолжение исследования старения CSC на установке GIF ++, ЦЕРН.
 - Изучение характеристик CSC в пучке мюонов в режиме HL LHC с некоррелированным фоном.
 - Изучение методов устранения эффекта Мальтера в CSC.
- Участие в исследованиях новых газовых смесей для CSC.
- Модернизация CSC мюонных станций MEx/1, тестирование, сборка и установка в течение периода LS3.
 - Создание инфраструктуры для модернизации CSC: зона и стенды для испытаний.
 - Установка и испытание высоковольтных фильтров для камер ME1/1.
 - Замена и испытание оптических кабелей камер ME1/1 - планируется в период LS3.
 - Модернизация системы охлаждения ME1/1 CSC (если она не будет завершена в LS2).
 - Производство и установка новых кабелей и сервисов камер ME1/1.
 - Сборка, монтаж и ввод в эксплуатацию мюонных камер MEx/1.

2.4.3. Модернизация, тестирование, сборка и установка MEx/1 CSC.

Всего 180 камер должны быть демонтированы из CMS, перемещены в “наземную” лабораторию модернизации CSC (Рис. 3.11), оснащены новой электроникой, протестированы и, наконец, повторно установлены в экспериментальном зале CMS.



Рис. 3.11. Лаборатория для модернизации CSC.

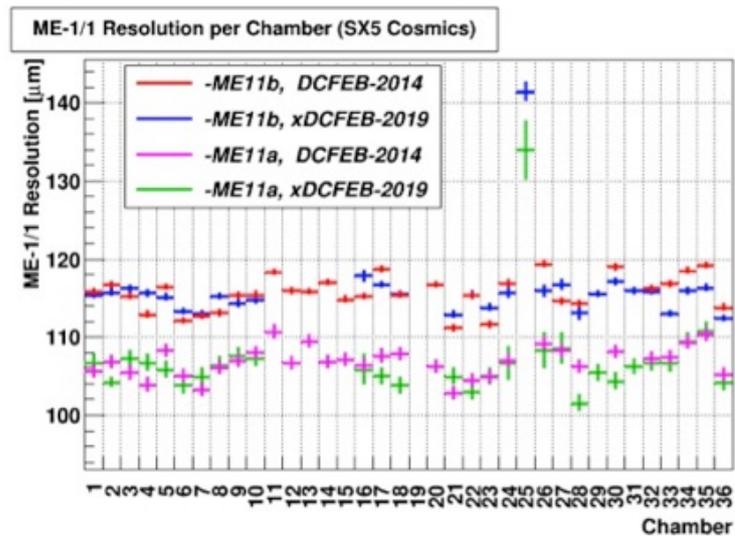


Рис.3.14. Пространственное разрешение CSC ME-1/1, полученное в экспериментах с космическими мюонами в течение 2-х периодов модернизации: LS1 (2014) и LS2 (2019).

На Рис.3.14 показано пространственное разрешение CSC ME-1/1, полученное в экспериментах с космическими мюонами в течение 2-х периодов модернизации: LS1 (2014) и LS2 (2019). Данные ME1/1a и ME1/1b получены с «узкой» и «широкой» части CSC соответственно. Новая плата xDCFEB является улучшенной версией DCFEB. На рисунке видно, что результаты, полученные с разной электроникой, хорошо согласуются. Камера ME-1/1/25, показывающая худшее пространственное разрешение, работала при анодно-катодном напряжении, пониженном на 100 В.

2.4.4. Модернизация электроники CSC в период LS2.

В рамках проекта по модернизации электроники для ME_x/1 CSC в период LS2, сотрудники ОИЯИ приняли участие в проектировании, изготовлении и испытании 120 плат LVDB5 для распределения и контроля параметров низковольтного питания накамерной электроники модернизированных CSC. LVDB5 (Рис.3.15) вырабатывает 22 выходных напряжения для питания пяти плат DCFEB и одной ALCT-288, расположенных на камере. Общий номинальный выходной ток платы LVDB5 составляет ~ 30А.

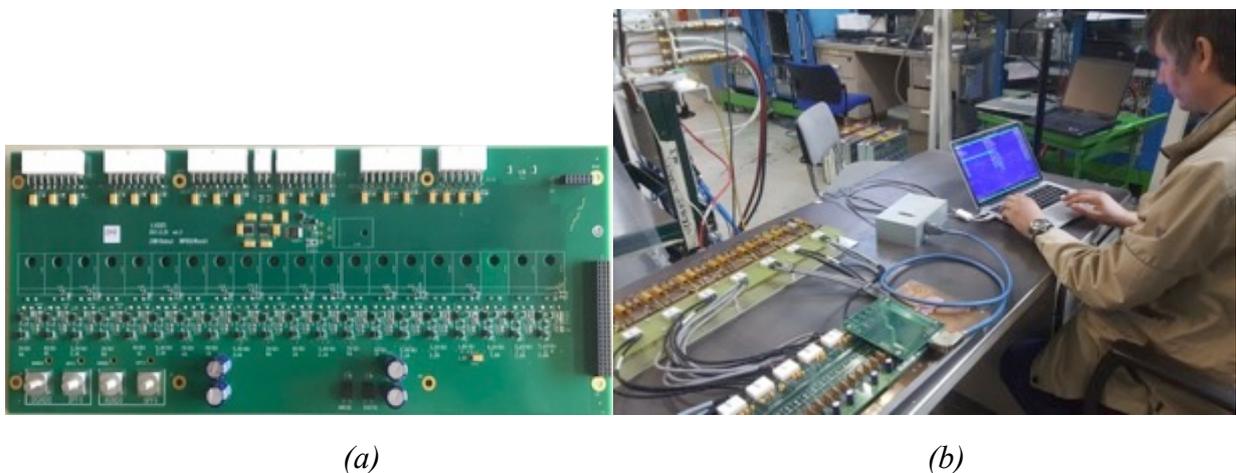


Рис.3.15. Плата распределения низковольтного питания LVDB5 (a). Стенд для тестирования LVDB (b).

Автоматизированный стенд на базе процессорной платы Raspberry Pi3 разработан для функционального контроля и измерения параметров плат LVDB в процессе производства и обслуживания. Конструкция стенда позволяет проводить испытания всех типов распределительных модулей, используемых для различных CSC (LVDB, LVDB5 и LVDB7).

Плата LVDB5 обеспечивает надежную работу при радиационном воздействии с уровнем флюенса нейтронов $N = 7,5 \times 10^{11}$ Гц/см² и интегральной дозой облучения TID = 15 крад. Радиационная стойкость LVDB5 исследована на специальной испытательной установке (стенд CHARМ), расположенной на линии пучка Т8 в экспериментальном зале ускорителя PS в ЦЕРНе (восточный зал), где первичный пучок протонов с энергией 24 ГэВ/с выходит из кольца PS.

Внутри установки CHARМ протоны облучают тестируемый объект, окруженный хорошо рассчитанной конфигурацией мобильно изменяемого экранирования. Различные области для размещения тестируемого образца, в которых симулируются реальные условия БАК, характеризуются разными типами облучения, которые, соответственно, приводят к различным типам радиационных повреждений.

Облучение платы LVDB проводилось в 2 этапа: 1 неделя облучения до TID1 = 15 крад, перерыв 3 месяца и второй шаг до TID2 = 15 крад. Общая интегрированная доза облучения составила TID1 + TID2 = 30 крад. Эквивалентный поток нейтронов с энергией 1 МэВ составил $\sim 1,80 \times 10^{12}$ см⁻², а поток высокоэнергетических адронов $\sim 2,15 \times 10^{12}$ см⁻². За оба периода облучения радиационного повреждения платы LVDB не наблюдалось.

2.5. Выводы

По результатам работ по модернизации мюонной системы, проведенных за период Фазы I, можно заключить:

1. Модернизация мюонных станций ME1/1 и ME4/2 прошла успешно, что подтверждается устойчивой работой всей торцевой мюонной системы установки CMS в ходе набора данных;
2. Модернизация электроники ME1/1 привела к существенному (на 20%) улучшению пространственного разрешения станции и эффективности выработки триггера в области псевдобыстрот $2,1 < |\eta| < 2,4$.

2.6. Публикации

1. V. Perelygin. "Performance of the CMS ME1/1 muon station", Phys.Part. Nucl. **48** №5 (2017) 789-792.
2. CMS Collaboration, CMS, the Compact Muon Solenoid: Technical Proposal, CERN/LHCC 1994-038 (1994).
3. Yu.V.Ershov, et al. Cathode strip chamber for CMS ME1/1 Encap muon station. Письма в ЭЧАЯ. 2006 Т.3 №3 (132) p.73-80.
4. CMS collaboration. Technical Design Proposal for the Upgrade of the CMS Detector through 2020. CERN-LHCC-2011-06. CMS UG-TP-1.
5. CMS Collaboration, "The performance of the CMS muon detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV at the LHC", CMS-MUO-11-001, CERN-PH-EP-2013-072, JINST 8 (2013) P11002
6. CMS Collaboration, "The Phase-2 Upgrade of the CMS Muon Detectors", CERN-LHCC-2017-012; CMS-TDR-016
7. D. Pfeiffer et al. The radiation field in the Gamma Irradiation Facility GIF++ at CERN. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 866 (2017) 91–103.
8. M.R. Jäkel et al. CERN GIF++ : A new irradiation facility to test large-area particle detectors for the high-luminosity LHC program. PoS (TIPP2014) 102.

9. V. Palichik, N. Voytishin. New CSC segment builder algorithm with Monte-Carlo TeV muons in CMS experiment. *Physics of Particles and Nuclei*, v.48, №5 (2017) 786-788;
10. L. Malter “Thin Film Field Emission”, *Phys.Rev.* 59, 48 (1936).

3. МОДЕРНИЗАЦИЯ ТОРЦЕВЫХ АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ HE (ФАЗА I)

3.1. Замена электроники HE

Адронный калориметр CMS [1] (рис. 4.1) состоит из центральной (HB, область псевдо-быстрот $0 < |\eta| < 1,4$), внешней (HO, $0 < |\eta| < 1,2$), торцевой (HE, $1,3 < |\eta| < 3$) и передней (HF, $3 < |\eta| < 5,2$ соответственно) секций. HB и HE-калориметры помещены внутрь сверхпроводящего магнита, создающего магнитное поле величиной 3,8 Т.



Рис. 4.1. Схема организации адронной калориметрии CMS.

Электронная аппаратура регистрации данных (ЭРД) с двух торцевых адронных калориметров HEF и HEM, функционально состоит из двух частей. Первая располагается непосредственно на детекторе (front-end FEE), вторая (back-end BEE) находится на расстоянии ~100 м от детектора и располагается в зале управления. Обмен информацией между этими двумя частями организован по оптоволоконным линиям связи и набору электрических кабелей.

Необходимость модернизации ЭРД в первую очередь вызвана необходимостью замены фотодетектора (ФД), в качестве которого в настоящий момент используется многоканальный гибридный ФД (HPD). Во время первых испытаний (2006 год) работы FEE электроники в магнитном поле (до 3.8 Тесла) был обнаружен эффект появления самопроизвольных разрядов внутри ряда HPD, которые не только являлись источником дополнительного шума, но и могли привести к разрушению ФД. В качестве идеальной замены HPD был выбран кремниевый фотоумножитель (SiPM), который нечувствителен к магнитному полю. Кроме того, SiPM обеспечивает усиление на два – три порядка более высокое, чем HPD, а также обладает более высокой квантовой эффективностью. Эти обстоятельства позволяют значительной степени улучшить регистрацию малых световых сигналов за счет увеличения отношения сигнал/шум в несколько раз и обеспечить увеличение продольной гранулярности HEF и HEM детекторов.

В конструкции ЭРД используется модульный принцип организации. Для FEE это использование крейта, одного для каждого 20-градусного сектора HE, в который устанавливаются 4 модуля считывания RM (по одному на 5-градусный сектор), калибровочный модуль SM и модуль управления CSM (рис. 4.2)

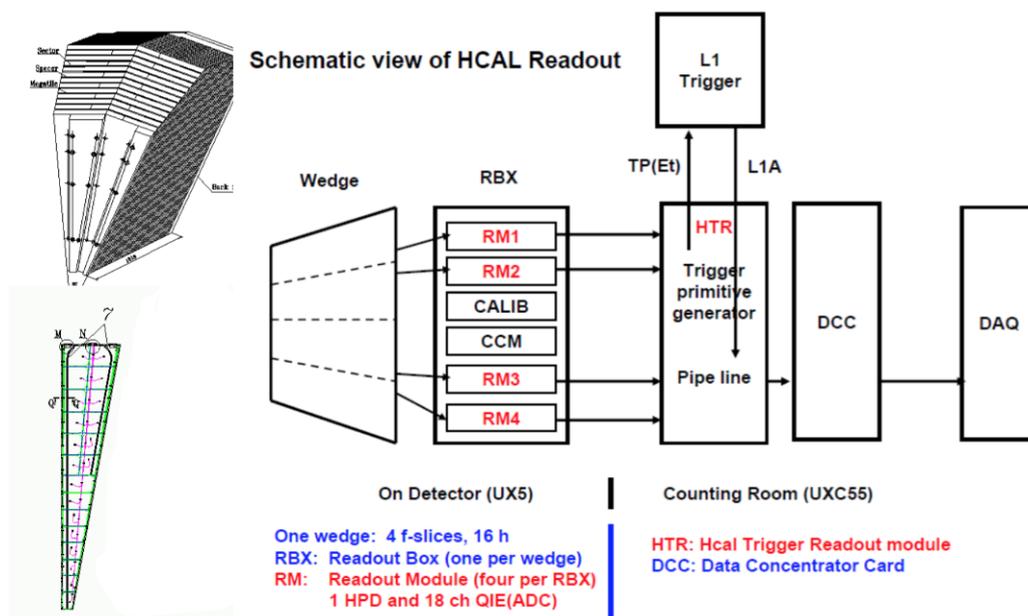


Рис. 4.2. Организация считывающей и регистрирующей электроники HE.

3.2. Модернизация HE в период первой длительной остановки LHC

По результатам первого этапа работы LHC в 2009–2012 гг. (Run 1), остро встал вопрос о модернизации не только типа фотоумножителя HCAL, но и остальных элементов электроники FEE.

Во время набора данных в течение Run 1 одной из основных причин потерь данных стал одиночный радиационно-индуцированный сбой электроники (Single Event Upset, SEU). Было показано, что эффект SEU увеличивается по мере роста светимости ускорителя, что приводит к отказам электроники в одном-двух из 108-х секторов адронного калориметра за каждый зарегистрированный SEU. Вследствие этого, на уровне сертификации данных, дополнительно, были отобраны $\sim 1.6\%$ (~ 350 пбн⁻¹) от набранных данных, как несоответствующие условиям физической задачи. Также был выявлен эффект отказа системы фазовой подстройки частоты (Quartz Phase Locked Loop, QPLL) в 3-х блоках управления (CCM), который приводил к ошибкам в реконструкции физических событий из-за сдвига временного окна регистрации событий.

В соответствии с техническим проектом модернизации системы адронных калориметров CMS [3] первым этапом модернизации элементов считывающей электроники HE в период первой длительной остановки LHC 2013–2014 гг. (Long Stop 1, LS1) [4] стала замена управляющих блоков электроники в корзинах считывания, расположенных непосредственно на детекторе CMS. Для устранения вышеописанных проблем было решено модернизировать блоки управления, по сути являющиеся причиной вышеописанных проблем. Модернизация включила в себя замену 2-х из 4-х печатных плат (управляющих) блока, переработку синхронизационной платы.

В рамках работы по замене управляющего блока были переработаны и заменены все 32 блока в HE. Также была проведена проверка частотных характеристик элементов электроники непосредственно в CMS, которая показала, что параметры модернизированных элементов электроники удовлетворяют техническим условиям CMS и LHC: при частоте регистрации 40,789 МГц, рабочий диапазон электроники находится в интервале значений 40,770–40,811 МГц (рис. 4.3).

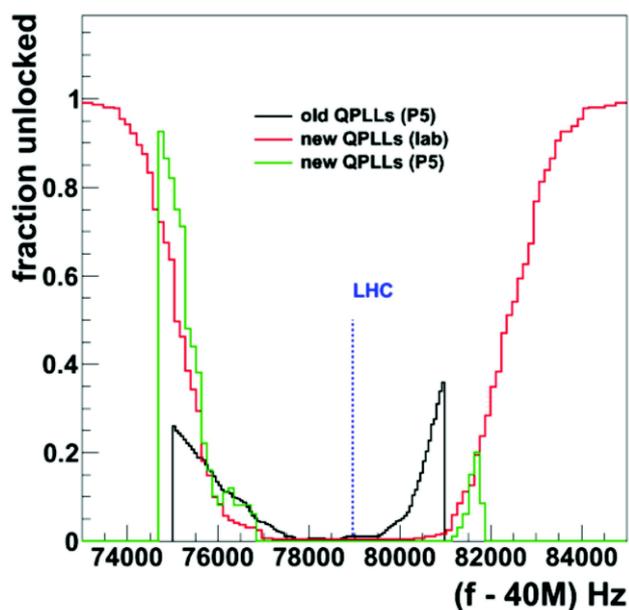


Рис. 4.3. Зависимость частоты отказов элементов электроники от различных частот регистрации: для не модернизированной системы фазовой подстройки частоты электроники на основе кварцевого генератора QPLL (old), модернизированной QPLL для тестовых испытаний (lab) и установленной на HE CMS (P5).

3.3. Тестирование новой электроники HE

3.3.1. Тестирование крейта μ TCA и опытных образцов модулей RM и CCM на прототипе HE детектора в зоне H2 выведенного пучка ускорителя SPS

Первые опытные образцы модулей электроники HE были установлены и исследованы в зоне выведенных пучков ускорителя SPS. В результате соударений пучков в SPS образуется спектр вторичных частиц, содержащий адроны, пионы и мюоны. При помощи использования различных абсорберов, магнитов и коллиматоров в зоне выведенных пучков (H2) можно достичь сфокусированных пучков частиц в диапазоне энергий 30–300 ГэВ. В результате первых тестов было показано, что предложенный вариант замены HPD на SiPM исключительно верен. На рисунке 4.4 показан спектр заряда от HPD и от SiPM, в результате взаимодействия мюонного пучка с калориметром при энергии пучка 150 ГэВ.

Каждый канал в SiPM регистрировал сумму сигналов с четырех слоев калориметра, в то время как каждый канал HPD регистрировал сумму сигналов с двенадцати слоев калориметра, где общий собранный с калориметра свет прямо пропорционален числу взаимодействующих с мюонами слоев. Мюонный сигнал (минимально ионизирующая частица MIP) выделяется в обоих спектрах, но разделение пика пьедестала и мюонного сигнала в SiPM спектре более выражено из-за увеличенной чувствительности SiPM и низкого уровня шума прибора. Было показано, что при использовании SiPM, чья эффективность регистрации минимально ионизирующих частиц почти в 500 раз лучше, чем HPD, можно выделить пьедестал и MIP даже в условиях высоких радиационных нагрузок и при сильном радиационном поражении детектора.

Линейность SiPM как функция от энергии пучка показана на рисунке 4.5 (слева). Энергетическое разрешение после применения необходимых начальных калибровок хорошо согласуется с измерениями на тестовом пучке 2008 года. Показано, что $\sigma/E = A \oplus B/\sqrt{E}$,

где $A = 0.021 \pm 0.012$ и $B = 1.23 \pm 0.03 \sqrt{\text{ГэВ}}$ (рис 4.5, справа), после применения калибровок для MIP.

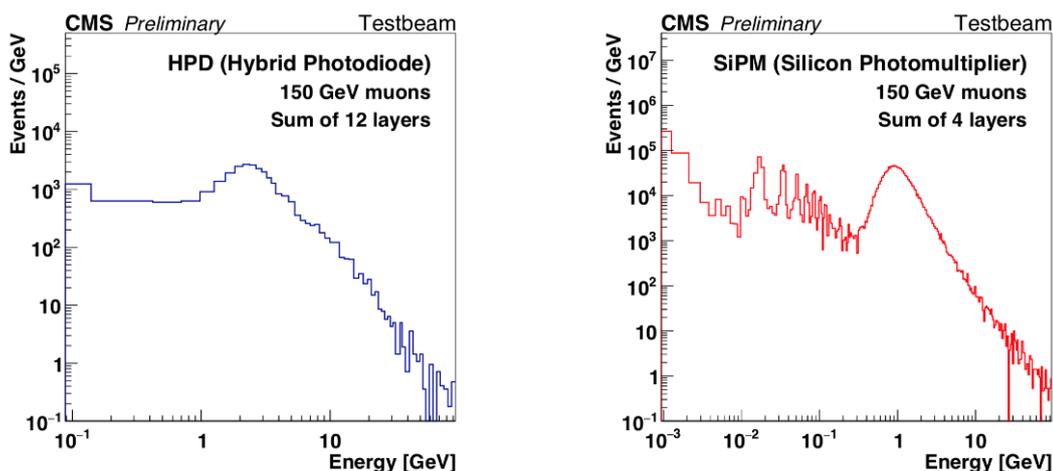


Рис. 4.4. Спектр пьедестала и MIP для HPD (слева) и SiPM (справа). Пики, видимые между пьедесталом и сигналом от MIP – индивидуальные фотоэлектронные пики.

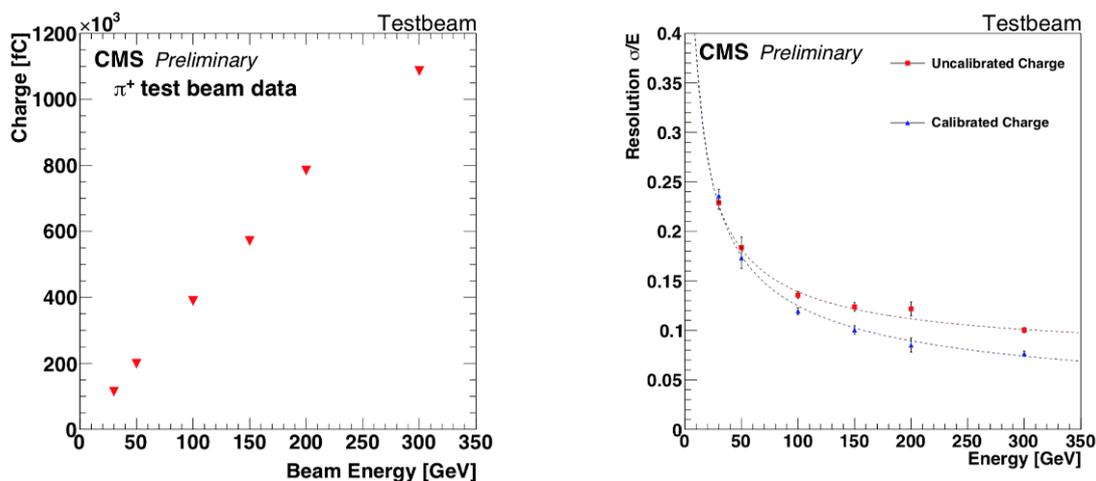


Рис 4.5. (Слева) Распределение величины энергии протонного пучка в зависимости от восстановленного заряда SiPM (Справа) Энергетическое разрешение как функция от величины энергии пучка до и после применения начальных калибровок.

Также впервые была установлена и протестирована система ВЕЕ, на основе использования современной высокотехнологичной высокоскоростной системы стандарта micro-Telecommunications Computing Architecture (μ ТСА) для модернизированного HE с SiPM. Показано, что система ВЕЕ удовлетворяет условиям нагрузок для модернизированной системы HE.

3.3.2. Тестирование на стенде серийных модулей RM и CSM

Для проверки новой электроники в сборе (144 модулей RM и 36 модулей CSM, предназначенных к монтажу на детекторе, плюс некоторое количество запасных модулей) были изготовлены корзины считывания HE RBX – 20 шт., механическая часть для модулей считывания RM – 160 шт. Вся механическая часть была проверена индивидуально на

предмет механической совместимости. Были проведены предварительные тесты охлаждения и питания модулей. Было показано, что при потребляемой мощности ~200 Вт на RBX (4 модуля), температура на поверхности и внутри модулей ~30С. Также была организована система продувки модулей сухим газом. Показано, что при рабочей температуре SiPM 18С относительная влажность на поверхности приборов ниже 5%, а при 5С – ниже 10%.

3.3.3. Тестирование на стенде по проверке долговременной стабильности работы всех модулей RM и ССМ.

В течение 2016–2017 гг. проводилась подготовка элементов модернизированной электроники для установки на детектор. Для этого был организован стенд для долговременного тестирования новой FEE, включающий в себя также организацию считывания с использованием модернизированной ВЕЕ. Были закуплены, установлены и настроены для работы 6 μ ТСА крейтов, а также необходимы для их работы модули питания и контроллеры. За время работы долговременного стенда было выявлено: один отказ работы единичной QIE карты (из 600 штук) и отказ работы 2-х управляющих карт (из 144 штук). В связи с этим было принято решение по переработке управляющих карт, а именно замена низковольтного встроенного преобразователя на внешний источник питания для управляющих карт. Был проведен полный комплекс тестов и калибровок, в частности калибровка новых SiPM, как элементов тестируемой считывающей электроники, по уровню усиления амплитуд однофотозлектронного сигнала равным 40 фКл. Показано, что стабильность величины амплитуд сигналов во времени, при требуемых параметрах работы системы, находится в рамках 1% отклонения от номинальных параметров. Проблем с работой ВЕЕ не выявлено.

3.4. Модернизация торцевых адронных калориметров в период длительной технической остановки БАК в 2017-2018 гг.

Успешная работа ускорителя LHC во время Run 1 (2009–2012 гг.) и Run 2 (2015–2018 гг.), увеличенные радиационные и фоновые нагрузки в HCAL и нестабильная работа HPD показали, что модернизацию FEE необходимо проводить не во время запланированного LS2, а как возможно раньше. Рост радиационных нагрузок играет ключевую роль в необходимости модернизации детекторных систем. Используемые в данный момент гибридные фотодетекторы, являясь, по сути, разработкой двадцатилетней давности, не являются оптимальным компонентом адронной калориметрии в условиях поставленной физической задачи. Нестабильное поведение каналов фотодетекторов (Рис 4.6, *слева*) приводит к раскалибровке всей системы и, как следствие, к неверному отклику калориметра при регистрации физических объектов. Также при замене HPD на SiPM будут обеспечены необходимые, в данных радиационных условиях, усиление сигнала и увеличение отношения сигнал/шум (Рис. 4.6, *справа*) [2].

Рабочее напряжение кремниевых фотоумножителей порядка 70 В, что не вызывает электрических пробоев в блоке электроники, к тому же они нечувствительны к переменному магнитному полю. Поведение регистрирующих элементов SiPM стабильно во времени, что играет решающую роль в выборе данного компонента электроники адронной калориметрии. Кроме того, новые кремниевые фотоумножители обладают высокой радиационной стойкостью, что было подтверждено соответствующими испытаниями. Замена фотоумножителей влечет за собой увеличение каналов передачи данных. В результате увеличения числа каналов появилась возможность увеличить продольную сегментацию центральной и торцевой частей калориметра (рис. 4.7). Улучшенная сегментация, являясь интерфейсом между адронным калориметром и электромагнитным, позволит проводить более точную калибровку системы и эффективно отделять адроны и электроны и идентифицировать другие физические объекты, такие как адронные ливни. В связи с ростом

нагрузки на электронику, модернизация адронного калориметра CMS на LHC предусматривает замену не только считывающей, но и регистрирующей электроники. Так помимо замены гибридных фотоумножителей на кремниевые, предусмотрена замена аналого-цифровых преобразователей QIE на более усовершенствованные по сравнению с предыдущей версией, в частности, с интегрированным время-цифровым преобразователем TDC с новым интерфейсом передачи данных со скоростью 4,8 Гб/с. Также во время длительной технической остановки LHC 2017–2018 гг. будет произведена модернизация всех модулей регистрирующей электроники, а именно модулей, обеспечивающих отбор событий 0-го и 1-го уровней, на их усовершенствованную версию, и крейтов стандарта VME на крейты стандарта μ TCA. Замена регистрирующей электроники направлена как на возможность принимать увеличенный объем данных с детектора, так и на усовершенствование интерфейса с триггерной системой CMS.

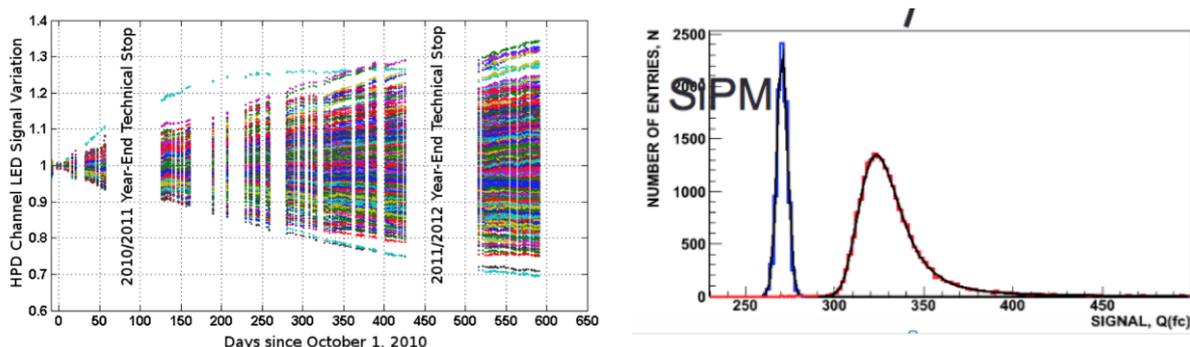


Рис. 4.6. (слева) Зависимость величины отношения амплитуды сигнала к номинальному в каналах HPD во времени. (справа) Шумовой сигнал и сигнал от регистрации пиона при использовании кремниевого ФЭУ.

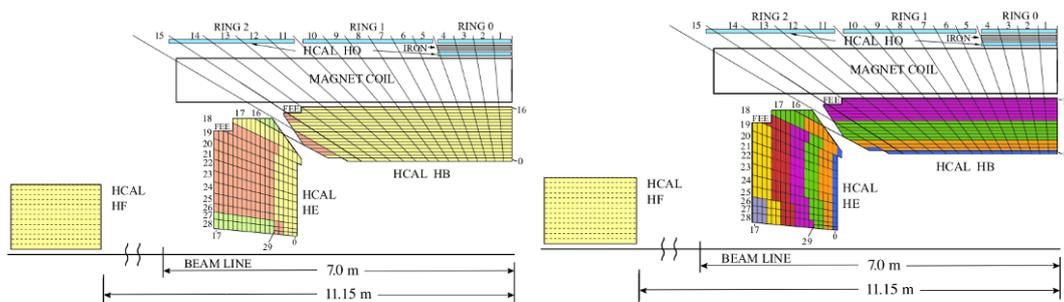


Рис. 4.7. Четыре поддетектора CMS HCAL (HB, HE, HO, и HF показаны в изначальной конфигурации (слева) и в конфигурации после модернизации (справа). Продольная сегментация HE увеличена более чем в 2 раза: с 3 глубин (группы каналов, объединенные в один канал считывания) до 7 глубин. Индивидуальные глубины показаны разным цветом.

3.5. Монтаж, ввод в эксплуатацию и калибровка модернизированной электроники HE

После подготовительных работ, проводимых в 2016–2017 годах, новая система регистрирующей электроники была установлена на детектор CMS. А именно, были заменены 144 считывающих модуля, по 4 для каждого сектора торцевого калориметра, установлена новая система подачи напряжения смещения на SiPM, 36 калибровочных модулей и 36 мо-

дулей контроля и управления регистрирующей электроникой, по одному модулю на каждый сектор торцевых калориметров, соответственно (рис. 4.8).



Рис. 4.8. (слева) Общий вид модулей считывания, установленных в крейте считывания – так называемая система регистрирующей электроники. (справа) Процесс установки системы регистрирующей электроники в торцевые адронные калориметры, вид сверху.

Модернизация включила в себя как замену HPD фото-детекторов на кремниевые фотоумножители (SiPM) для всех оставшихся секторов торцевого адронного калориметра (4 модуля калориметра - HER17, 63–66 по азимутальному углу - были уже заменены в 2017 году), так и увеличение числа считывающих каналов по глубине (или продольная сегментация) до 7 единиц, что наряду с заменой фото-детекторов позволит более точно учитывать и компенсировать деградацию отклика адронного калориметра (HE) вследствие радиационного повреждения.

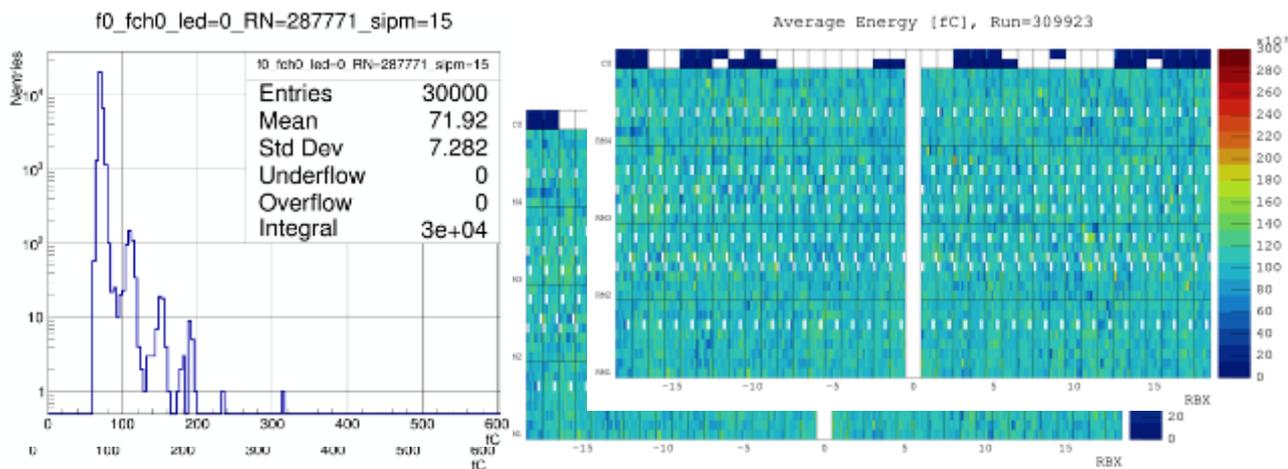


Рисунок 4.9. (слева) Темновой зарядовый спектр для одного фотоумножителя. (справа) Распределение средних амплитуд сигналов со всех фотоумножителей торцевых адронных калориметров при использовании калиброванного источника света.

Также был проведен демонтаж старых компонентов электроники, переработана и установлена новая система низковольтного питания.

В течение первого этапа замены системы регистрирующей электроники проводилось изучение амплитудных и пьедестальных характеристик на новой установленной системе при помощи одно-двух-фотоэлектронных сигналов (темновой счет) и калиброванного источника света (рис. 4.9).

После проведения необходимых калибровок фотоумножителей, применения рассчитанного индивидуального усиления на SiPM (~40 fC) и настройки системы считывающей электроники было показано, что новая система регистрирующей электроники готова к первому набору физических данных.

Во время второго этапа установки новой системы регистрирующей электроники была проведена калибровка каналов электроники, регистрация и измерение уровня световых выходов сцинтилляторов торцевых адронных калориметров при помощи высокоинтенсивного радиоактивного источника Co^{60} (рис. 4.10). По результатам данной работы были обнаружены и заменены “темные” оптические каналы (оптические кабели) считывания сцинтилляторов калориметра, был произведен перенос калибровочных коэффициентов со старой системы регистрации, с HPD, на новую, с SiPM.

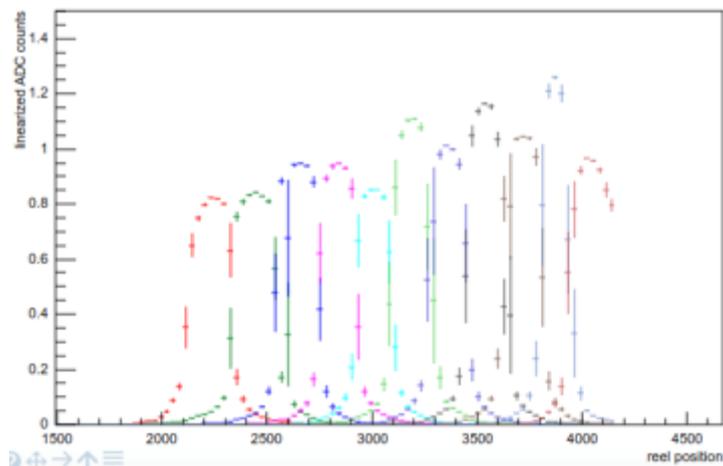


Рис. 4.10. Отклик калориметра при прохождении радиоактивного источника внутри одной из башен калориметра. Разным цветом показаны индивидуальные ячейки башни калориметра (индивидуальное считывание сигнала).

3.6. Модернизация центральных адронных калориметров в период длительной технической остановки БАК в 2019-2020 гг.

Учитывая идентичность организации системы регистрирующей электроники в центральных (НВ) и торцевых адронных калориметрах и, основываясь на опыте полученном в результате работ по модернизации торцевых адронных калориметров, было принято решение о необходимости замены ЭРД в НВ. По аналогии с НЕ, в НВ так же использовался многоканальный гибридный ФД (HPD), рекомендованный к замене на кремниевый фотоумножитель (SiPM) такого же типа как в НЕ. В рамках программы модернизации адронного калориметра, группа из ОИЯИ создала стенд для длительного тестирования системы регистрирующей электроники с использованием SiPM для центральной части адронного калориметра установки CMS. Была полностью подготовлена инфраструктурная база, а именно, система водяного охлаждения модулей, система низкого питания, система подачи напряжения смещения на SiPM, система оптоволоконной коммуникации регистрирующей электроники с крейтами систем отбора данных и триггера, контроля и записи тестовых данных. По аналогии с методикой для тестирования электроники для торцевых калориметров, тестирование модулей для центральной части адронного калориметра проводилось на основе анализа одно-двух-фотоэлектронных зарядовых спектров и анализа спектра от импульса калиброванного источника света. В последствии, в результате определения оптимального напряжения пробоя SiPM и применения индивидуального коэффициента усиления для SiPM, было произведено выравнивание амплитуд сигналов для всех модулей считывания.

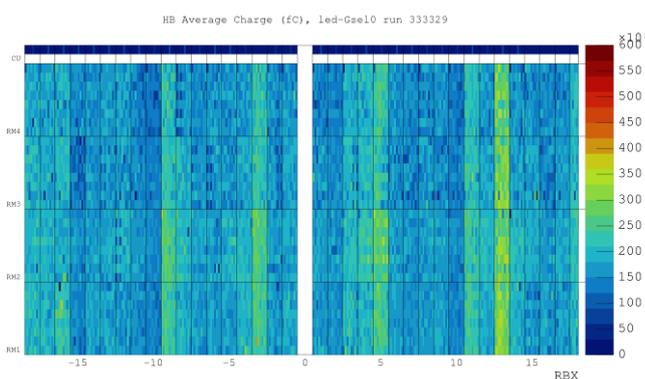
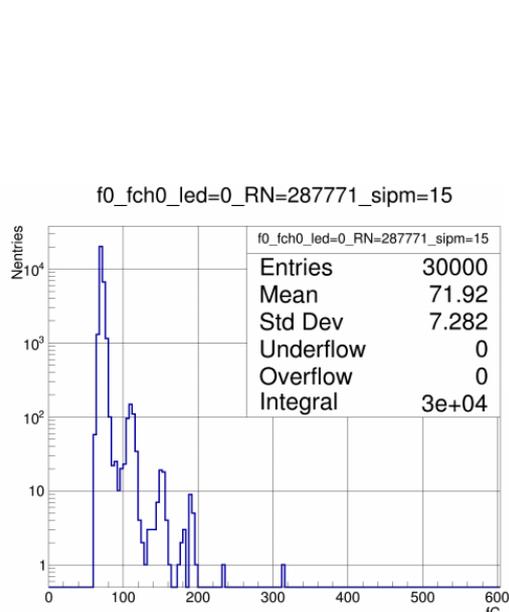
После подготовительных работ, проводимых в 2018–2019 годах, новая система регистрирующей электроники была установлена на детектор CMS. А именно, были заменены 144 считывающих модуля, по 4 для каждого сектора центрального адронного калориметра, установлена новая система подачи напряжения смещения на SiPM, 36 калибровочных модулей и 72 модуля контроля и управления регистрирующей электроникой, по два модуля на каждый сектор центральных калориметров, соответственно (см. Рисунок 4.11).



Рисунок 4.11. Общий вид модулей регистрирующей электроники и модулей контроля, установленных в крейте считывания – так называемая система регистрирующей электроники.

В течение первого этапа работ (январь-март) был проведен демонтаж старых компонентов электроники, переработана и установлена новая система низковольтного питания. Добавлены новые оптические каналы связи между системой регистрирующей и считывающей электроникой.

Второй этап замены системы регистрирующей электроники (апрель-октябрь) включал в себя установку распределительной шины в каркасы считывания, низковольтного и высоковольтного блоков, модулей регистрирующей электроники с кремниевыми фотоумножителями и модулей контроля.



рядовой спектр для одного фотоумножителя. Амплитуд сигналов со всех фотоумножителей групп при использовании калиброванного ис-

В течение текущего третьего этапа работ (октябрь-декабрь) проводилось изучение амплитудных и пьедестальных характеристик на новой установленной системе регистрирующей электроники при помощи одно-двух-фотоэлектронных сигналов (темновой счет) и калиброванного источника света (Рисунок 4.12). Была проведена калибровка каналов электроники, регистрация и измерение уровня световых выходов сцинтилляторов центральных

адронных калориметров при помощи высокоинтенсивного радиоактивного источника Co^{60} (Рисунок 4.13). По результатам данной работы были обнаружены и заменены “темные” оптические каналы (оптические кабели) считывания сцинтилляторов калориметра, был произведен перенос калибровочных коэффициентов со старой системы регистрации, с HPD, на новую, с SiPM.

После проведения необходимых калибровок фотоумножителей, применения рассчитанного индивидуального усиления на SiPM, равного 40 фКл (Рисунок 1.4) и настройки системы считывающей электроники было показано, что новая система регистрирующей электроники готова к первому набору физических данных.

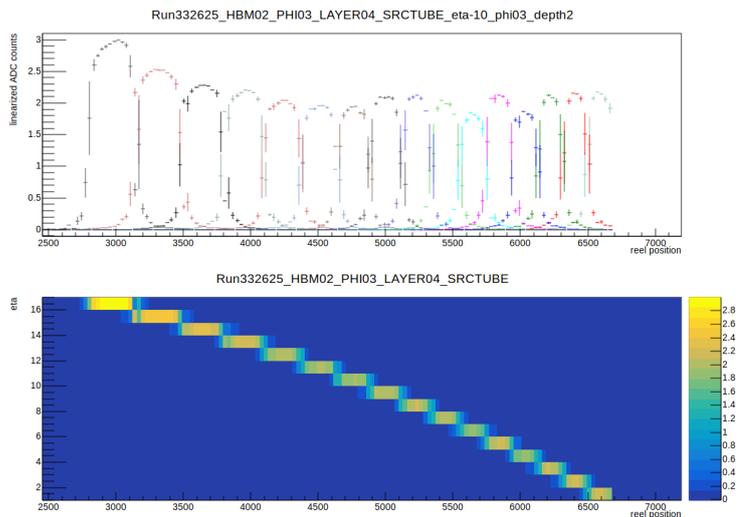


Рисунок 1.3 Отклик калориметра при прохождении радиоактивного источника внутри одной из башен калориметра. Разным цветом показаны индивидуальные ячейки башни калориметра (индивидуальное считывание сигнала).

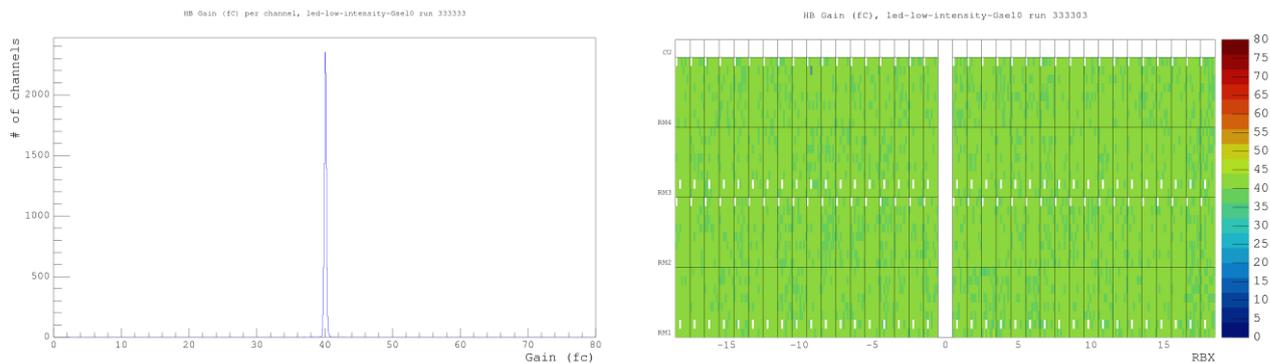


Рисунок 1.4 Среднее распределение амплитуд сигналов после применения индивидуального усиления на SiPM. (слева) Профиль распределения для суммы всех каналов, (справа) распределение средних амплитуд сигналов для всех каналов при регистрации одно-фотоэлектронных импульсов.

В течение 2020-2021 гг. группа CMS ОИЯИ планирует продолжить калибровку и настройку новых фотоумножителей, провести полномасштабный ввод в эксплуатацию новых компонентов регистрирующей электроники, используя систему лазерной калибровки, анализируя данные с космических лучей и данные с первых протон-протонных со-

ударений. В течение набора физических данных, в 2022-2023 гг. планируется предоставить полный экспертный и технический контроль установленной аппаратуры, включая устранение возникших неисправностей и необходимую модернизацию.

3.7. Публикации

1. Бунин П., Зарубин А., Модернизация торцевых адронных калориметров CMS на ЛHC // ЭЧАЯ 2017. Т.48. ВЫП.5. СТР.632-638
2. O.V.Bychkova, E.V.Popova, P.P.Parygin, P.D.Bunin and A.Yu.Kalinin, Preparation for the upgrade of CMS Hadron Endcap Calorimeter front-end, 2017, Journal of Physics: Conference Series, Volume 798, Number 1
3. B.Bilki, P.Bunin, P. De Barbaro, J. Dittmann, A. Gribushin, A. Kalinin, A. Kaminskiy, S. Obratzsov, Y. Onel, J. Pastika, P. Rumerio, I. Schmidt, D. Southwick, D. Tliso, Radioactive Source Calibration Test of the CMS Hadron Endcap Calorimeter Test Wedge with Phase I Upgrade Electronics, CMS DN -2017/017
4. P.Bunin et al, HF and HEP17: phase1 upgrade performances, CMS-DP-2017-042
5. B.Bilki, P.Bunin, P. De Barbaro, J. Dittmann, A. Gribushin, A. Kalinin, A. Kaminskiy, S. Obratzsov, Y. Onel, J. Pastika, P. Rumerio, I. Schmidt, D. Southwick, D. Tliso, Operational Experience with Radioactive Source Calibration of the CMS Hadron Endcap Calorimeter Wedges with Phase I Upgrade Electronics, CMS CR -2017/171
6. S. Afanasiev, P. Bunin, I. Golutvin, A. Malakhov and V. Smirnov, Direct Measurement of Radiation in the HE Calorimeter of CMS using Radiachromic Film, CMS DN - 2018/008
7. V. Khachatryan, ... P.Bunin et. al. (CMS HCAL Collaboration), HF and HEP17: phase1 upgrade performances, CMS-DP-2017-042
8. V. Khachatryan, ... P.Bunin et. al. (CMS HCAL Collaboration), Results related to the Phase1 HE upgrade, CMS-DP-2018-019
9. V. Khachatryan, ... P.Bunin et. al. (CMS HCAL Collaboration), HCAL Calibration in 2016, CMS DP -2017/017
10. V. Khachatryan, ... P.Bunin et. al. (CMS HCAL Collaboration), HCAL Calibration Status in Summer 2017, CMS DP-2017/033

4. НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ НЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ФАЗЫ II МОДЕРНИЗАЦИИ УСТАНОВКИ

Два торцевых калориметра (HE), расположенных на концах CMS, являются сегментированными детекторами. Каждый HE состоит из индивидуальных калориметрических ячеек (сцинтилляционных тайлов). Сегментирование осуществляется по трем координатам: η , ϕ , и Z вдоль линии пучка (рис. 5.1). Каждый HE имеет 18 секторов по 20° . Каждый сектор имеет 18 слоев сцинтилляторов, вставленных в поглотитель. В каждом слое сектора имеются два мегатайла, размеры которых определены слоем.

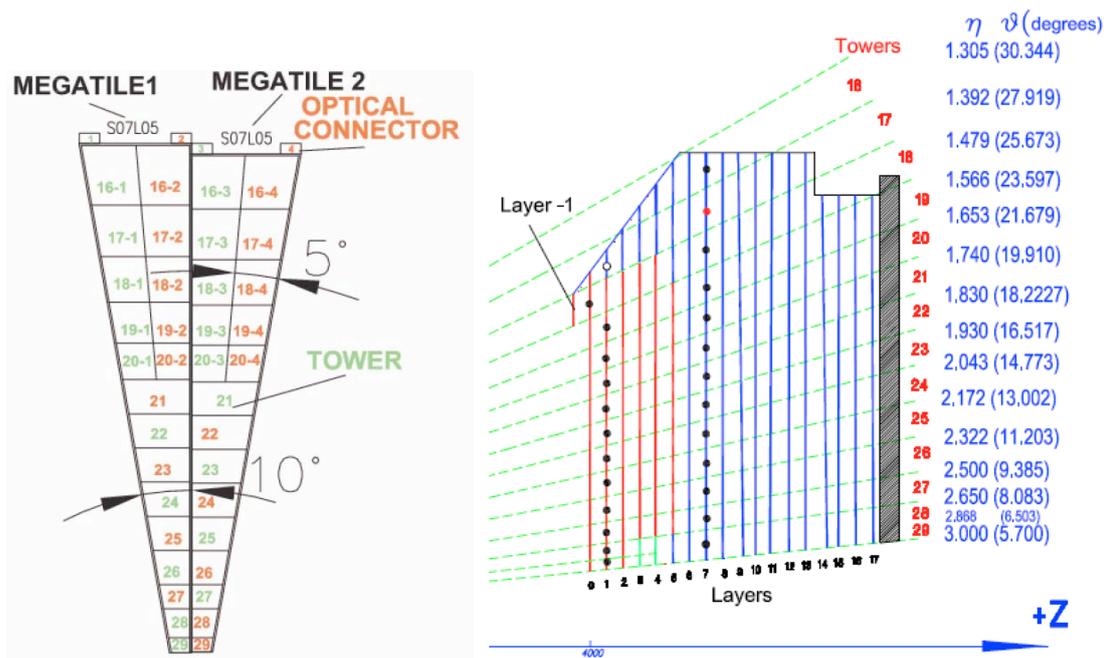


Рис 5.1. HE сегментирование на два мегатайла. Справа показана схема нумерации слоев.

Ячейки HE, расположенные с координатами $\eta = 2,3-3,0$ находятся очень близко от линии пучка и испытывают наибольшее радиационное воздействие. Мегатайлы HE деградируют с получением большого уровня радиации, которая пропорциональна светимости LHC. Уровень деградации детекторов зависит также от скорости набора радиации [1].

Время жизни сцинтиллятора определяется уровнем поглощенной радиации и скоростью ее набора. Первоначальные оценки предсказывали работу HE сцинтилляторов до получения радиационных повреждений при суммарной светимости 500 фбн^{-1} (10 лет работы LHC). Однако анализ данных CMS в 2012 г. Показал, что HE деградирует быстрее.

Наши исследования направлены на нахождение условий работы органических сцинтилляторов до высоких уровней радиации, соответствующих суммарной светимости 3000 фбн^{-1} (10 лет работы HL-LHC). Для торцевого адронного калориметра поглощенная доза может достигать 25 Мрад.

Мы начали проводить следующие работы по поиску способов улучшения калориметра HE с тем, чтобы найти решение для поддержания его функционирования в будущем при более высокой светимости LHC:

1. Разработка варианта сцинтилляционного тайла, разделенного на несколько полосковых сцинтилляторов. Этот вариант тайла позволяет сохранить работу НЕ при высокой светимости.
2. Экспериментальное исследование для определения безопасных условий работы с облученными мегатайлами при проведении модернизации НЕ.
3. Экспериментальное исследование радиационных повреждений пластического сцинтиллятора на установке ИРЕН в ОИЯИ. Исследование зависимости светового выхода от мощности дозы.
4. Измерение световых излучений «пальцевых» или полосковых тайлов после облучения гамма-квантами и нейтронами.
5. Экспериментальное исследование возможности использования SiPM после облучения большими потоками нейтронов.
6. Измерение поглощенной дозы пленочными дозиметрами в двух слоях калориметра НЕ.

4.1. Разработка варианта сцинтилляционного тайла, разделенного на несколько полосковых сцинтилляторов

Улучшение сбора света можно обеспечить уменьшением размеров сцинтилляторов [1, 2]. Этим достигается уменьшение влияния потемнения сцинтиллятора. Средний путь прохождения света до волокна WLS становится короче, и само волокно WLS также становится короче, при этом потеря света, вызванная его потемнением, также уменьшается. Разделение тайлов одной из башен на равное количество сегментов сохраняет существующие геометрические пропорции (рис. 5.2). У каждого сегмента есть свое WLS волокно. WLS волокна всех сегментов тайла объединены. Полный свет с сегментированного тайла поступает на соответствующий оптический контакт мегатайла.

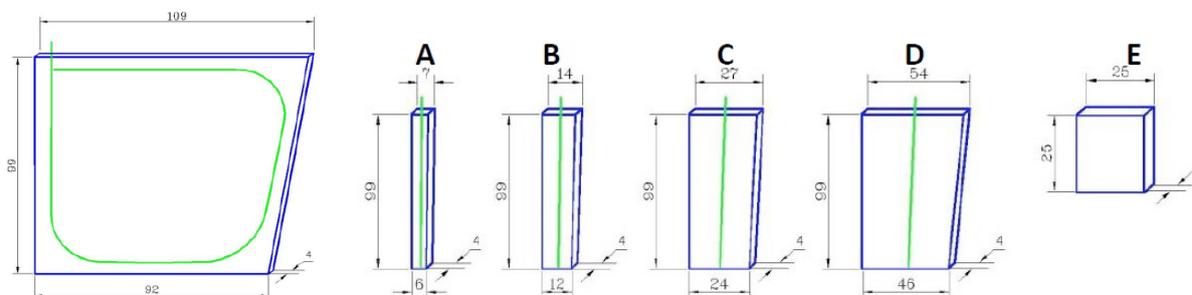


Рис. 5.2. Структура оригинального тайла с WLS волокном и размеры полосок разделения.

Было выполнено облучение опытных образцов 4 МэВ электронами в Центре физики частиц и высоких энергий НИИ ЯП БГУ. Для облучения были приготовлены наборы сцинтилляторов SCSN-81 с WLS Y-11. Образцы облучались до следующих уровней поглощенных доз: 0,5, 1, 5, 10 и 30 Мрад. Световыход с облученных образцов измерялся с использованием радиоактивного источника ^{90}Sr . Измеренные величины были нормализованы на величину сигнала, полученного из оригинального тайла с WLS волокном (рис. 5.2).

За следующий набор данных:

- определена зависимость амплитуды сигнала от ширины сегмента;
- определены потери света в сцинтилляторе и найдена зависимость длины поглощения света от поглощенной дозы;

- определены потери света в WLS волокне найдена зависимость длины поглощения света от поглощенной дозы.

На рис. 5.3 показаны результаты измерений. Измерения света из оригинального тайла и тайла, состоящего из полосок (16 полосок), выполнены для одних и тех же условий. Результаты были вычислены для различных величин оптических потерь при объединении световых сигналов по схеме оптическое «ИЛИ» ($k \approx 0,7$ и $k \approx 0,8$).

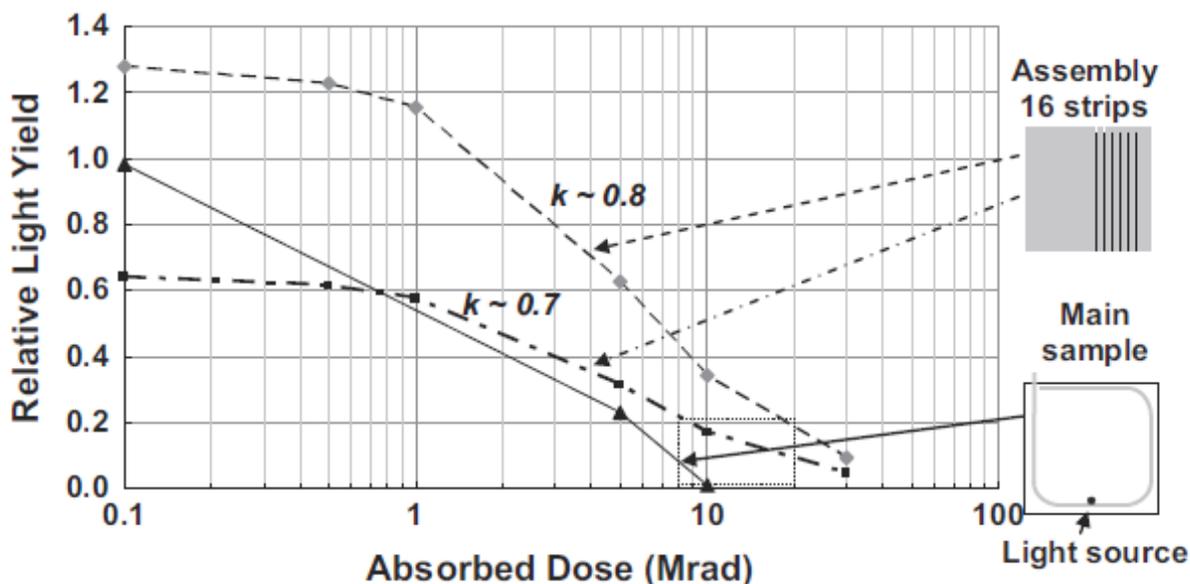


Рис. 5.3. Результаты вычислений, основанные на измерениях, величины световых выходов с различных образцов (источник света расположен ~ 2 мм от шифтера).

Было предложено разделить на полоски тайлы (24–29), которые наиболее близки к пучку на 4 или 8 сегментов (рис. 4). Ширины сегментов определены как $1/4$ или $1/8$ от азимутального размера тайла. Свет со всех сегментов тайла суммируется и измеряется кремниевым фотомножителем SiPM.

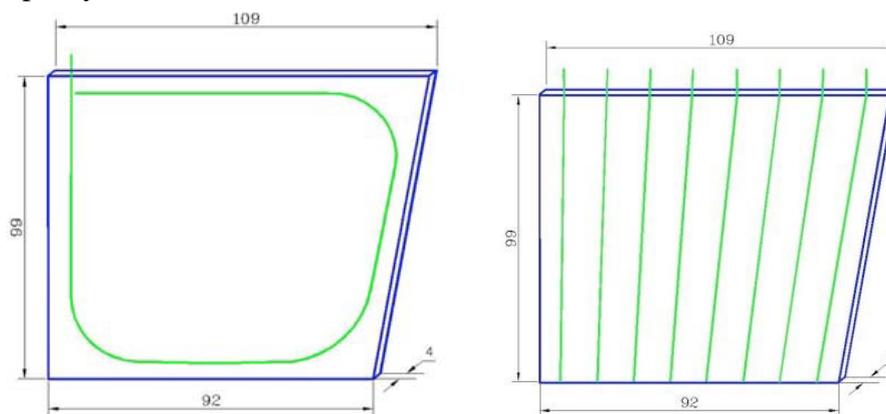


Рис. 5.4. Концепция перехода оригинального тайла к разделенному на полоски (пальцы).

Мы предложили замену 4 тайлов (26, 27, 28, 29) в каждом мегатайле первых 5 слоев на тайлы, состоящие из пальцев. На рис. 5.5 показаны эти изменения.

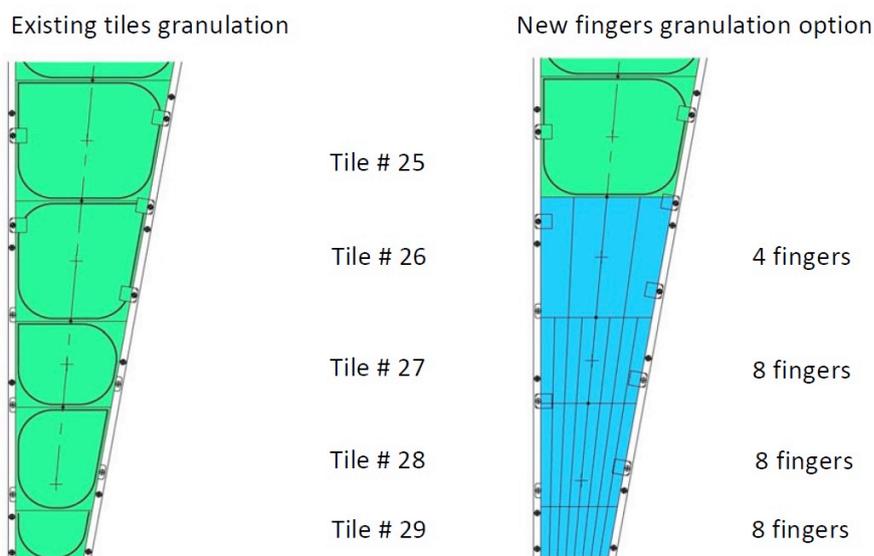


Рис. 5.5. Концепция наборов из пальцев.

Было выполнено экспериментальное исследование, показывающее преимущество полоскового тайла по отношению к оригинальному для облученных образцов. Облучение было проведено нейтронами на реакторе ИБР-2. Оригинальный тайл соответствовал тайлу 27 как на рис. 5.4 (слева). Рис. 5.6 демонстрирует преимущество в выходе света из тайла, состоящего из пальцев, по отношению к оригинальному для одинаковых условий облучения.

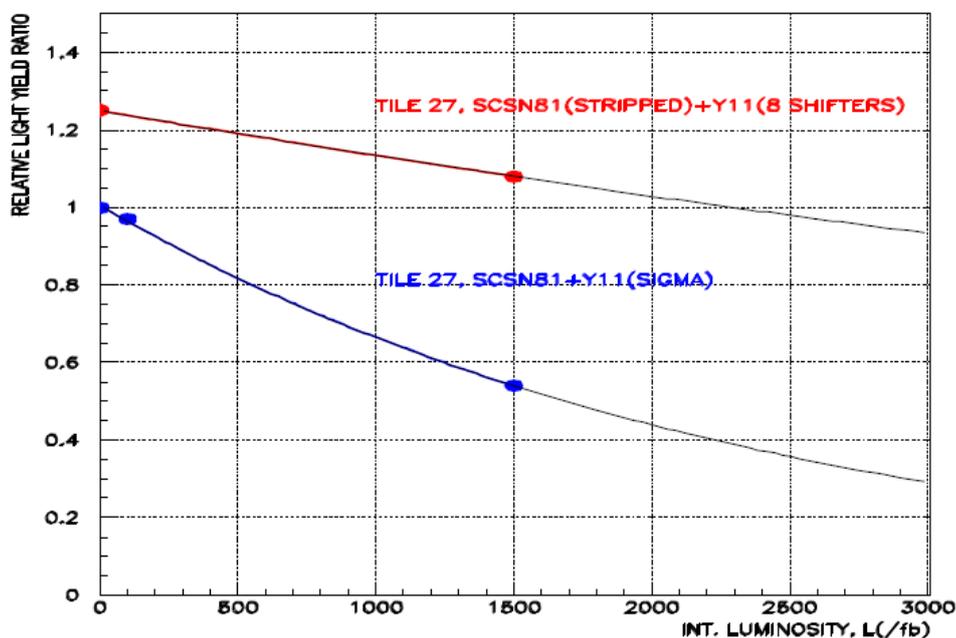


Рис. 5.6. Зависимость относительного световыхода от суммарной светимости для нейтронов. Красная линия для полоскового тайла.

4.2. Экспериментальное определение безопасных условий работы с облученными мегатайлами при проведении модернизации НЕ

Абсорбер и НЕ мегатайлы после облучения на пучке становятся радиоактивными за счет наведенной активности. Облучение нейтронами является основным источником подоб-

ной радиоактивности. Наведенная активность элементов НЕ будет основным источником радиационной опасности для людей во время работ по модернизации торцевых детекторов. Были выполнены ряд исследований по облучению образца, имитирующего сектор, для того, чтобы сделать соответствующие предсказания по уровням наведенной активности в НЕ мегатайлах после набора данных на коллайдере LHC при суммарной светимости вплоть до 500 фбн^{-1} . Измерение наведенной активности в элементах приготовленного образца позволит определить время, когда будет возможно безопасно извлекать мегатайлы из абсорбера при модернизации детектора. Облучение образца было проведено на источнике нейтронов установки ИРЕН [3]. Спектр нейтронов, выходящих из ИРЕН очень близок к спектру, предсказанному для НЕ облучения (рис. 5.7). На рис. 5.8 показан тестовый образец мегатайла, который облучался, и для которого проводились измерения наведенной активности. Длина образца равна 36 см, а его вес равен 681,9 грамм. Набор материалов в образце был следующий: латунь L63 – 295,8 г; дюралюминий D16T – 240,5 г; сцинтиллятор SCSN-81 – 141,6 г; винты и бумага – 4 г. 4 элемента дают основной вклад в вес образца: Al – 216,5–224,2 г; Cu – 183,4–192,3 г; Zn – 102,5–10,9 г; C – 129,4–133,9 г.

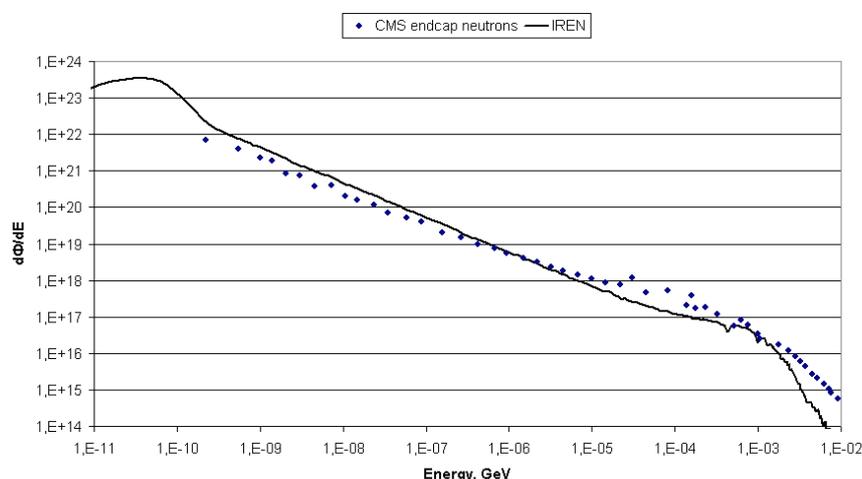


Рис. 5.7. Вычисленные спектры нейтронов для ИРЕН и CMS.

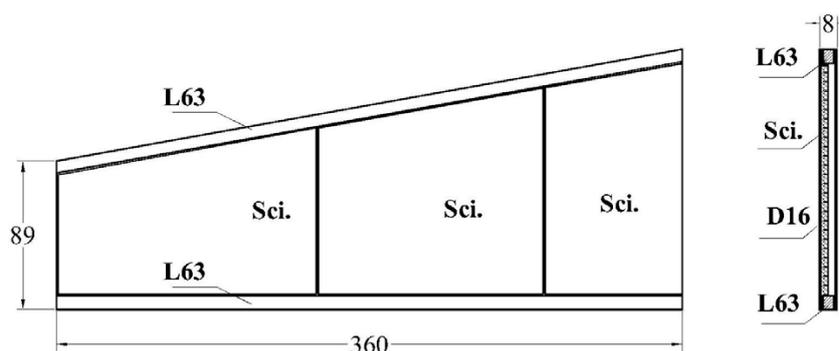


Рис. 5.8. Схематическое изображение исследуемого образца.

После облучения была выполнена серия измерений наведенной активности. На рис. 5.9 показана зависимость интенсивности наведенной активности в точке на поверхности образца, расположенной в 5 см от края образца (эта точка ближе всего находится к пучку), от времени, прошедшего с конца облучения.

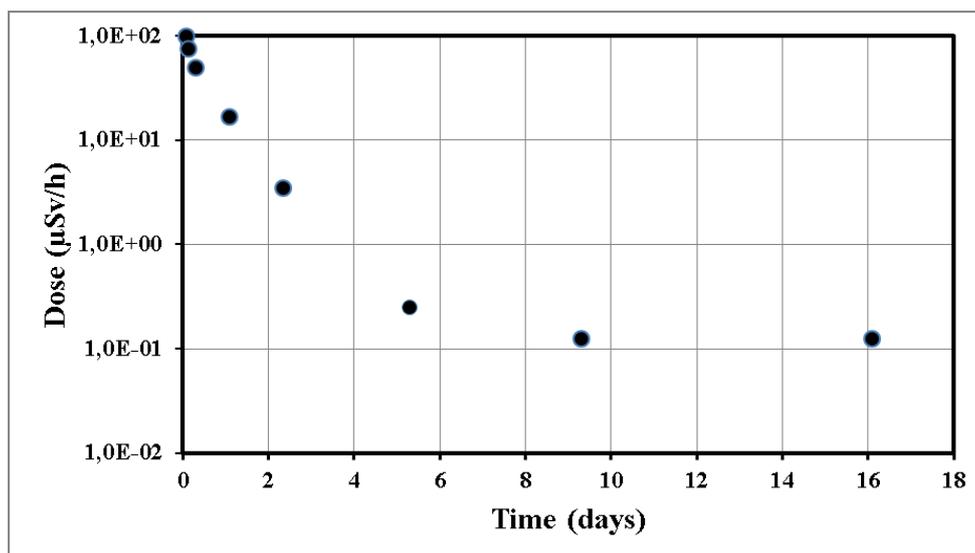


Рис. 5.9. Зависимость интенсивности наведенной активности в точке на поверхности образца, расположенной в 5 см от края образца.

Наша экспериментальная работа [3] показала, что безопасные радиационные условия для работы с элементами мегатайлов (согласно инструкциям ЦЕРНа безопасным для работ уровнем радиации является < 3 мкЗв/ч) будет достигнут через два месяца после начала длительного перерыва в работе CMS (LS2).

4.3. Измерение светового выхода из сцинтилляторов

Был выполнен ряд экспериментальных исследований по определению светового выхода из сцинтилляторов, как с пальцевой структурой, так и оригинальной формы после их облучения гамма-квантами и нейтронами [4, 5, 6].

Были выбраны четыре типа органических сцинтилляторов таких как SCSN-81, UPS-923A (производство КИРТ, Харьков), BC-408, LHE (производство ОИЯИ), которые были облучены на установке ИРЕН [4]. На ИРЕН возможно получение потоков нейтронов 7.3×10^{-6} см⁻² и потоков гамма квантов 1.3×10^{-3} см⁻² на каждый электрон линейного ускорителя. Для облучения были приготовлены образцы трех различных форм. Все образцы для того, чтобы исключить их повреждение, были помещены в бумажные контейнеры. В каждый контейнер помещался также пленочный дозиметр FWT-60-00 (толщиной 42,5 мкм).

Первые экспериментальные результаты по исследованию световых выходов были получены с образцов квадратной формы ($25 \times 25 \times 4$ мм³), которые были облучены до различных значений поглощенной дозы (1–1,4, 3,6–4,8, 7,3–10 Мрад) при различных значениях скорости набора дозы от 2 Крад/ч до ~ 100 Крад/ч. Величина поглощенной дозы образца определялась пленочным дозиметром, размещенным рядом с образцом. На рис. 5.10 показана зависимость амплитуды сигналов с образцов, которая пропорциональна световых выходову, от поглощенной дозы. Амплитуды нормированы на амплитуду сигнала с необлученного образца.

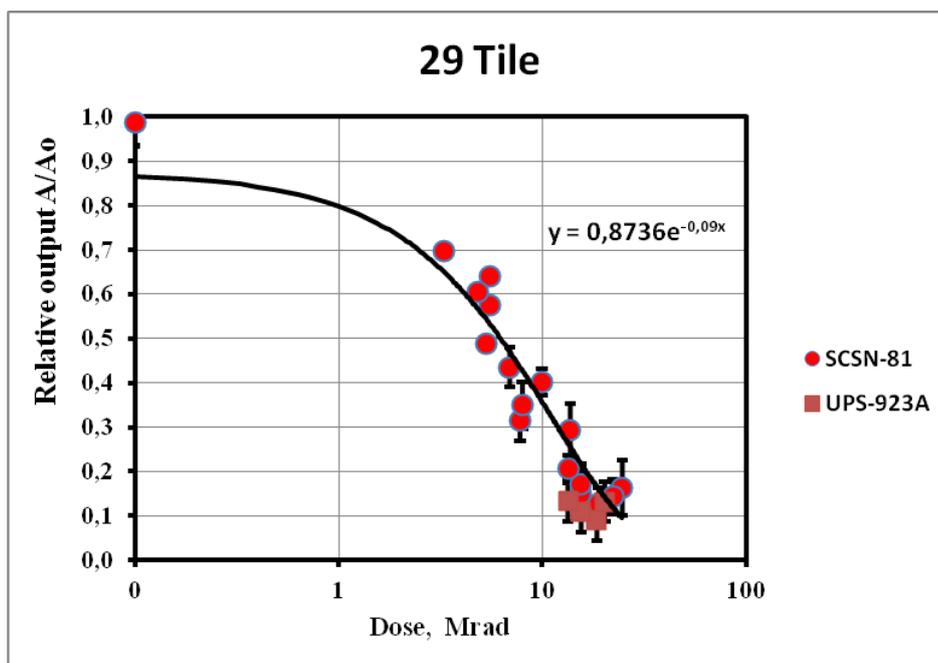


Рис. 5.10. Зависимость амплитуды от поглощенной дозы для двух типов пальчикового сцинтиллятора.

На рис. 5.11 приведены зависимости нормализованной амплитуды от скорости набора дозы для каждого типа сцинтиллятора пальчиковой формы и для групп образцов с близкими значениями поглощенной дозы. Эти результаты не показывают значительных изменений в световых выходы для различных значений набора дозы по всем 4 типам сцинтиллятора.

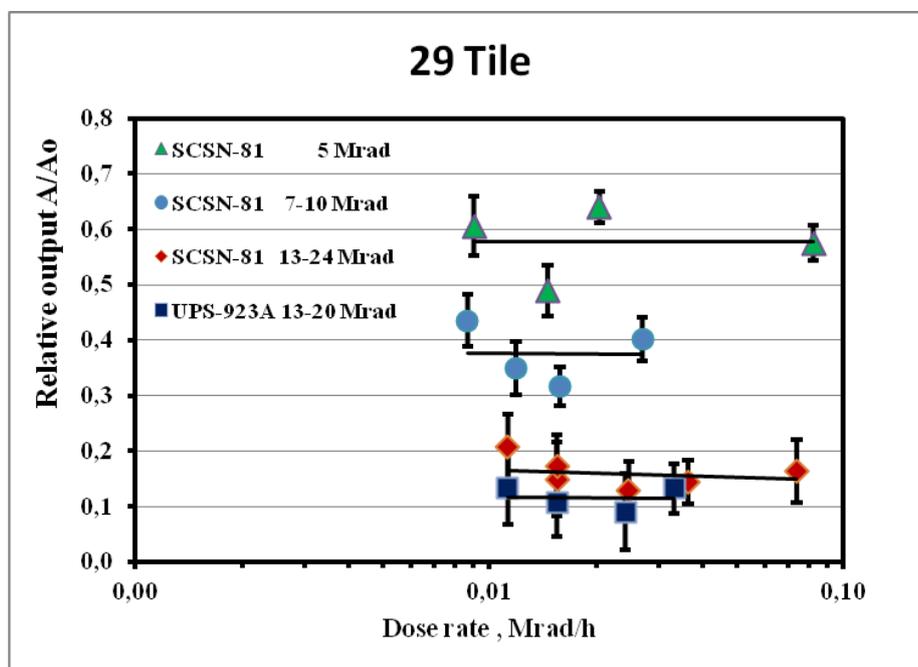


Рис. 5.11. Зависимости нормализованной амплитуды от скорости набора дозы для каждого типа сцинтиллятора пальчиковой формы и для групп образцов с близкими значениями поглощенной дозы.

Было изучено также влияние на световыход образца от источника наведенной радиации из латунного диска, расположенного рядом с образцом. Два одинаковых образца (SCSN-81) были размещены на одинаковом расстоянии от источника нейтронов. Позади одного из образцов располагался латунный диск ($D = 59$ мм, толщина – 9,6 мм). Образцы облучались в течение 7,2 дней, и через них прошло $3,4 \times 10^{13}$ нейтронов. Результаты показали наличие дополнительной радиации, приходящей из латунного диска.

Была проведена вторая серия экспериментальных исследований пальчиковых сцинтилляторов [5, 6] по определению зависимости световыхода от поглощенной дозы и скорости набора дозы. Облучение образцов проводилось гамма квантами из радиоактивных источников ^{60}Co (ИЯФ/Ташкент, НИИ ЯП БГУ/Минск) и нейтронами ИБР-2.

Исследования были направлены на изучение влияния гамма и нейтронного излучения, а также скорости набора дозы на сцинтилляторы следующих типов: полистирол SCSN-81 с WLS волокном Y-11, поливинилтолуол BC-408 с WLS Y-11M, поливинилтолуол EJ-260 с WLS волокном O-2M. WLS Y-11M шифтер с голубого света (430 нм) в зеленый (476 нм), а шифтер O-2M с зеленого света (535 нм) в оранжевый (550 нм).

Облучение одного из наборов образцов было проведено в НИИ ЯП БГУ. На рис. 5.12a приведены фотографии образцов целикового 29 тайла, выполненного из пластика SCSN-81. Один из образцов содержит WLS волокно. На рис. 5.12b показан образец без WLS. Этот образец и пленочный дозиметр помещены в пластиковый контейнер, приготовленный для облучения на источнике ^{60}Co . Толщина тайла равна 4 мм, а его размеры равны 60×48 мм.

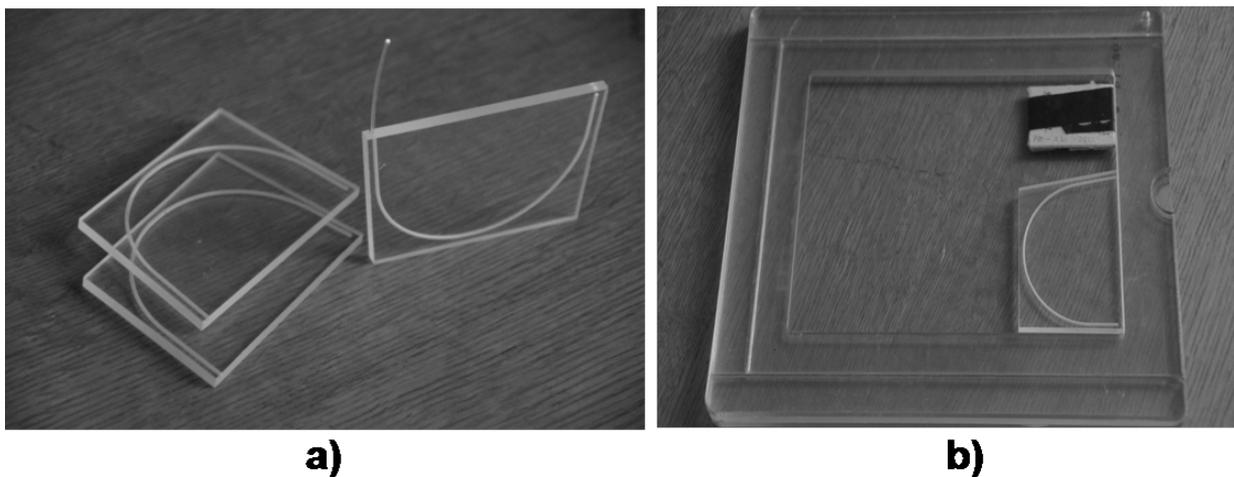


Рис. 5.12. а) Целиковый тайл с WLS волокном. б) Целиковый тайл из SCSN-81 размещен внутри пластикового контейнера вместе с пленочным дозиметром.

Часть образцов без WLS была облучена до доз в несколько Мрад при скорости набора дозы ~ 100 Крад/ч. На основании измерений были определены зависимости световыхода от величины поглощенной дозы. Облучаемые образцы находились в воздушной среде. Измерения световыхода проводились через неделю после конца облучения. На рис. 5.13 показаны две измеренные точки, по которым при помощи экстраполяции были сделаны оценки по световыходу при дозе в 10 Мрад. Для точек 5 Мрад световыход равен $\sim 40\%$, что соответствует значению, приведенному в техническом задании адронного калориметра CMS.

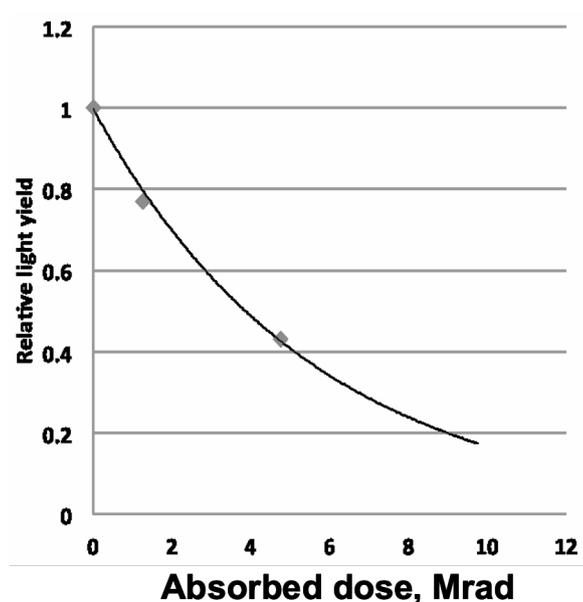


Рис. 5.13. Зависимость световыхода от поглощенной дозы и оценка световыхода при 10 Мрад.

В ходе второго измерения проводилось изучение эффекта набора скорости дозы. Один набор образцов был облучен до дозы 250 Крад, а второй до 600 Крад. Скорость набора дозы менялась от образца к образцу. На рис. 5.14 показана зависимость относительного световыхода от скорости набора дозы для целикового тайла. Прямые линии экстраполируют полученные результаты в область малых скоростей набора доз, который существует в реальном детекторе, практически недостижимый во время тестовых исследований.

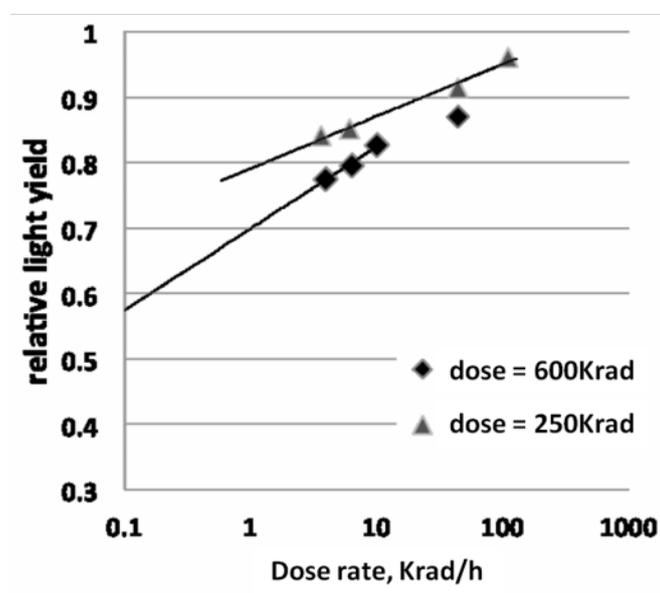


Рис. 5.14. Зависимость относительного световыхода от скорости набора дозы для целикового тайла.

Часть образцов сцинтилляторов типа BC408 и EJ-260, выполненных в виде пальцев (рис. 5.15), была облучена в ИЯФ (г. Ташкент) на наборе источников гамма излучения ^{60}Co в области дозовых величин от 5 to 30 Мрад для различных скоростей набора дозы

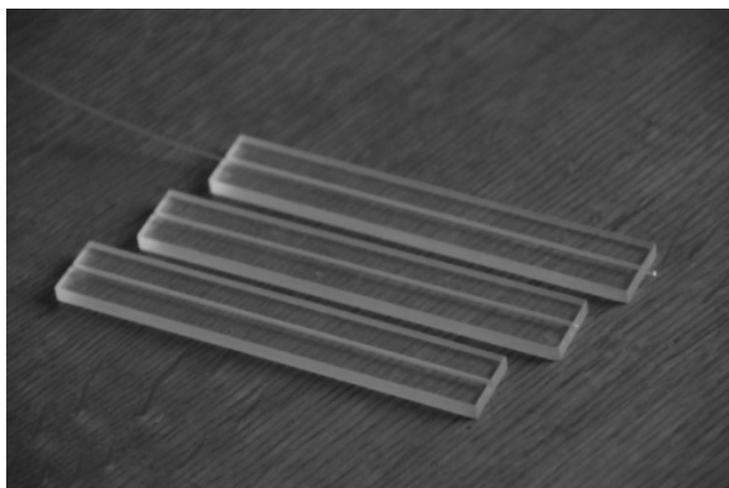


Рис. 5.15. Изображение образцов, выполненных в виде пальцев, в один из образцов установлено волокно WLS.

Набор источников гамма излучения ^{60}Co , полная активность которого равна 85,000 Кюри, создает равномерно распределенное поле радиации в выделенных зонах радиации, находящихся на глубине 5 м под землей и охлаждаемых водой. Был обеспечено облучение с изменением скорости набора доз от 0,022 to 0,600 Мрад/ч.

Измерение световыхода с облученных образцов проводилось в ОИЯИ источником бета-частиц ^{90}Sr . На рис. 5.16 приведено схематичное изображение измерительной установки.

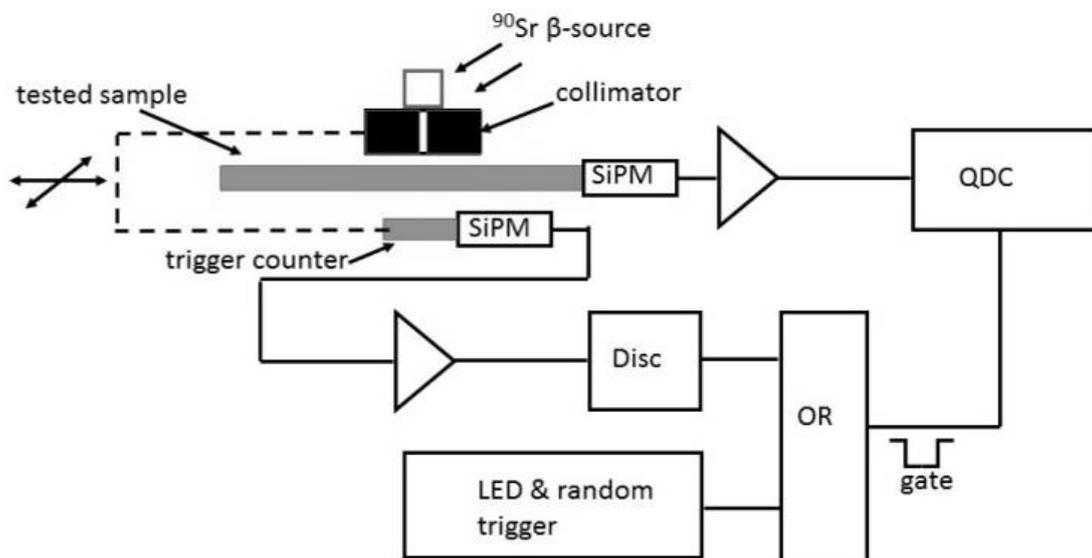


Рис. 5.16. Схема установки для измерения световыхода с пальчиковых образцов.

Световыход с каждого образца измерялся по крайней мере 5 раз. Время между концом облучения и началом измерений менялось от образца к образцу и составляло до 120 дней. На рис. 5.17 приведен пример амплитудных распределений из полосок BC-408, облученных до 25 Мрад с различными скоростями набора дозы. Светоотклик с полосок уменьшается с уменьшением скорости набора дозы.

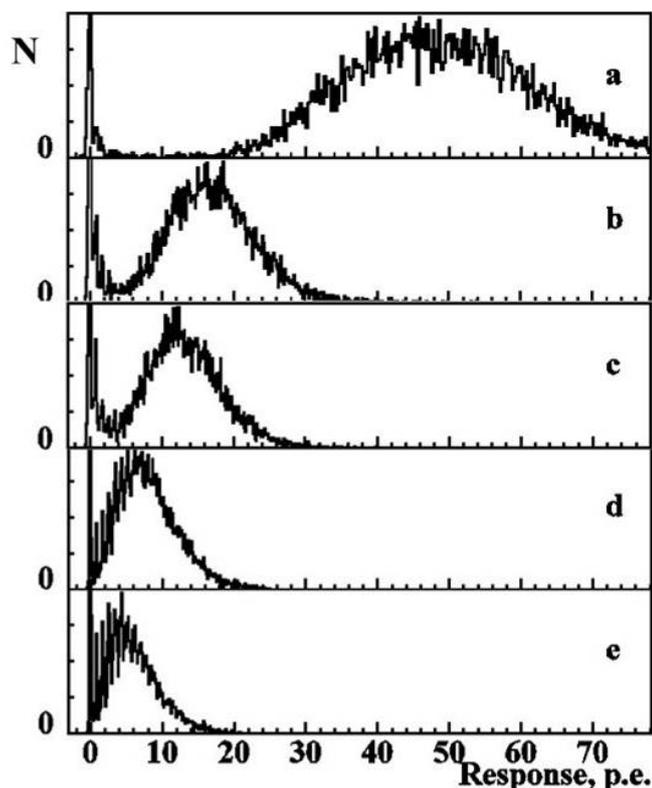


Рис. 5.17. Примеры амплитудных спектров, полученных с пальчикового образца (BC-408), облученного до 25 Мрад для различных значений скорости набора дозы: 0,6 Мрад/ч (b), 0,2 Мрад/ч (c), 0,04 Мрад/ч (d), 0,02 Мрад/ч €. Для сравнения показан отклик с необлученного образца (a). Первый пик на всех спектрах является пьедестальным.

Дополнительные экспериментальные результаты были получены при облучении образцов нейтронами на ИБР-2М (ОИЯИ). В виде образцов были взяты две полоски Viscon-408 и одна полоска EJ-260 “finger”.

Результаты измерений сравнивались с результатами, полученными при облучении в Ташкенте, и показаны на рис. 5.18. Относительный световыход после облучения гамма показан для скорости набора дозы 20 Крад/ч. Пленочный дозиметр при облучении нейтронами зарегистрировал величину поглощенной дозы 6,5 Мрад. Анализ данных с дозиметра, основанного на кремниевом детекторе, показывает, что облучение было выполнено при потоке нейтронов $2,34 \times 10^{15}$ н/см².

Проведена экстраполяция данных Ташкента экспонентой для того, чтобы оценить световыход при величине поглощенной дозы 6,5 Мрад, зафиксированной для облучения нейтронами. Разница в световыходе указывает на то, что при одной и той же величине поглощенной дозы нейтронное облучение ведет к значительному уменьшению световыхода.

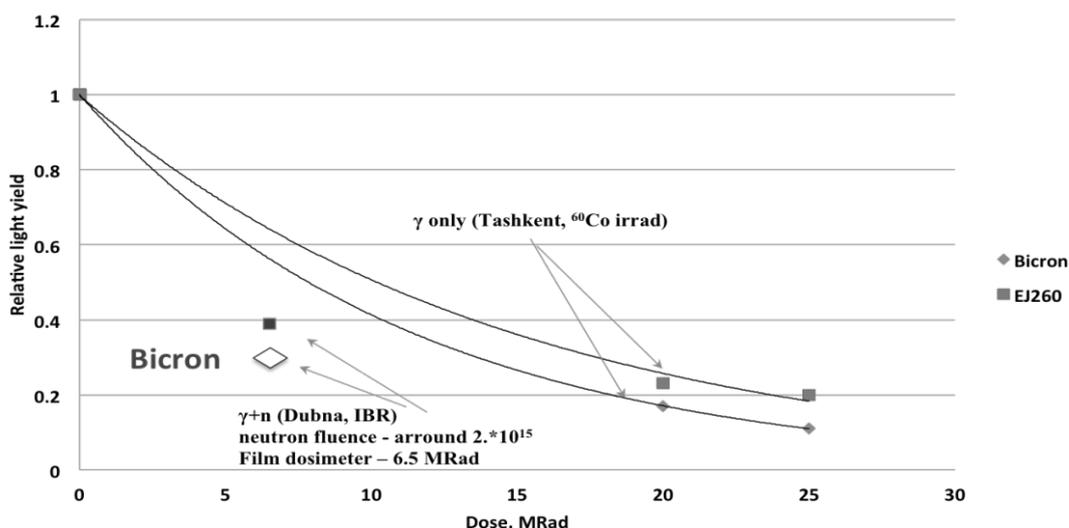


Рис. 5.18. Сравнение экспериментальных данных гамма облучения с экспериментальными данными облучения смесью гамма и нейтронов.

Органические сцинтилляторы обычно недостаточно радиационно-стойкие детекторы. Как правило, пластики подвержены облучению электронами, заряженными адронами, гамма-частицами и нейтронами. Детектор, состоящий из полосок-пальцев, обеспечивает лучший светосбор и позволяет продлить время использования сцинтилляционных детекторов современных установок ФВЭ в условиях высокой радиации. Была проведена серия экспериментальных исследований с использованием различных источников излучения, которая показала преимущество использования сцинтилляционных детекторов, состоящих из полосок, по сравнению с неразделенными на полоски детекторами до дозовых величин 25 Мрад. Эксперименты также выявили уменьшение световыхода для малых величин скорости набора дозы. Скорости набора дозы варьировались в пределах от 0,6 до 0,02 Мрад/ч.

Были достигнуты следующие результаты:

- пальчиковая опция обеспечивает более долговременную работу органических сцинтилляторов в полях высокой радиации;
- деградация световыхода, вызванная радиационным облучением, становится существенно большей при малых скоростях набора дозы для одной и той же величины поглощенной дозы;
- получен экспериментальный результат о том, что при поглощенной дозе в 6,5 Мрад отклик детектора снижается при облучении нейтронами по сравнению с облучением гамма излучением.

4.4. Экспериментальное исследование возможности использования SiPM после облучения большими потоками нейтронов.

Предполагаемая замена торцевого адронного калориметра HE на сцинтилляционную секцию в составе нового торцевого калориметра в установке CMS для коллайдера высокой светимости HL-LHC в ходе периода модернизации LS3 предполагает установку SiPM фотодетекторов непосредственно на сцинтилляторы. Были проведены оценки радиационного облучения калориметра, которые показали, что активные детекторные элементы должны быть работоспособными вплоть до достижения на HL-LHC величины интегральной светимости 3000 фбн^{-1} . SiPM фотодетекторы, расположенные на сцинтилляторах торцевых калориметров, будут подвержены различным уровням радиационного облучения. Устройства, находящиеся ближе к линии пучка, будут облучаться сильнее заряженными адронами, гамма-квантами и нейтронами чем расположенные на периферии.

В ОИЯИ проводятся исследования по изучению свойств некоторых SiPM фотодетекторов после их облучения нейтронами на реакторе ИБР-2. Основная цель проводимой работы заключается в определении верхнего предела нейтронного облучения, после которого становится невозможным использование SiPM в центральной области сцинтилляционной секции CMS калориметров, охлажденных до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Основным критерием работоспособности SiPM является их способность выделять сигналы от частиц с минимальной ионизирующей способностью над уровнем шумов.

На реакторе ИБР-2 [8] было проведено облучение 21 фотодетектора SiPM быстрыми нейтронами. Облучались три типа фотодетекторов SiPM, изготовленных фирмой Hamamatsu. Эти устройства имели различные размеры элементарных пикселей 10, 15 and 25 мкм: MPPC S12571-010C, MPPC S12571-015C, MPPC S13360-1325CS. Из трех фотодетекторов, по одному каждого типа, формировался набор для облучения. Семь таких наборов было сформировано. Фотодетекторы SiPM в наборе находились в одинаковых условиях облучения нейтронами. Разные наборы получали разное облучение, которое находилось в диапазоне величин флуенса $1,7 \times 10^{12} - 2,1 \times 10^{14}$ нейтронов/см².

Значение величины флуенса нейтронов измерялось двумя способами. В первом способе использовалась стандартная для ИБР-2 методика. Второй способ был основан на подсчете количества дефектов, возникающих в двух кремниевых полупроводниковых детекторах, которые размещались рядом с фотодетекторами каждого из наборов.

После облучения все фотодетекторы прошли тест по измерению основных параметров, которые сравнивались с параметрами этих устройств, определенных заводскими спецификациями. В таблице 5.1 приведены основные параметры исследуемых устройств.

Табл. 5.1. Основные параметры фотодетекторов SiPM до и после облучения.

S12571-010C, область- 1 мм^2, 10 000 of 10 мкм пикселей								
Φ , н·см ⁻²	SiPM ИИ	До облучения (специф. НРК), Измерение при +25°			После облучения, Измерение при -22°			
		V _{op} ,В	M	F _{dark} , кГц, (0,5пикс)	V _{br} ,В (шум)	V _{br} ,В (dI/dU/I)	σ_{noise} , пиксели V _{ov} =3В	F _{dark} , кГц V _{ov} =3В
$1,7 \times 10^{12}$	412	69,86	$1,35 \times 10^5$	111	63.265	63.205	3.74	6530
$5,3 \times 10^{12}$	413	69,88	$1,36 \times 10^5$	110	63.31	63.46	7.56	9080
$5,4 \times 10^{12}$	403	69,81	$1,34 \times 10^5$	124	63.25	63.4	7.0	9040
$1,7 \times 10^{13}$	414	69,9	$1,35 \times 10^5$	115	63.41	63.46	9.6	9985
$5,18 \times 10^{13}$	415	69,87	$1,35 \times 10^5$	113	63.78	64.13	11.8	10530
$8,14 \times 10^{13}$	416	69,89	$1,35 \times 10^5$	108	63.91	64.06	12.8	10610
$2,1 \times 10^{14}$	404	69,82	$1,34 \times 10^5$	119	65.71	66.28	15.5	10710

S12571-015C, область – 1 мм^2, 4 489 of 15 мкм пикселей								
Φ , н·см ⁻²	SiPM ИИ	До облучения (специф. НРК), Измерение при +25°			После облучения, Измерение при -22°			
		V _{op} ,В	M	F _{dark} , кГц, (0,5пикс)	V _{br} ,В (шум)	V _{br} ,В (dI/dU/I)	σ_{noise} , пиксели V _{ov} =3В	F _{dark} , кГц V _{ov} =3В
$1,7 \times 10^{12}$	188	67,96	$2,3 \times 10^5$	98,7	62.11	62.06	5.63	8040
$5,3 \times 10^{12}$	189	68,05	$2,29 \times 10^5$	118	62.05	62.3	8.92	8640
$5,4 \times 10^{12}$	184	67,99	$2,30 \times 10^5$	109	62.11	62.13	8.78	8517
$1,7 \times 10^{13}$	190	68,08	$2,32 \times 10^5$	111	62.31	62.5	12.3	8749
$5,18 \times 10^{13}$	191	68,07	$2,29 \times 10^5$	107	62.51	62.86	12.5	8840
$8,14 \times 10^{13}$	192	68,11	$2,29 \times 10^5$	125	62.96	63.3	13.1	8798
$2,1 \times 10^{14}$	185	68,02	$2,31 \times 10^5$	111	64.51	64.89	12.3	8989

S13360-1325CS, область - 1,69 мм ² , 2 668 of 25 мкм пикселей						
Φ, н·см ⁻²	SiPM ИН	До облучения, +25°C and V _{op} = V _{br} + 5В,		После облучения, Измерение при -22°C		
		I _d , мкА,	V _{br} , В	V _{br} ,В (шум)	V _{br} ,В (dI/dU/I)	σ _{noise} , пиксе- лей V _{ov} =3В
1,7×10 ¹²	10355	0,029	53,72	49.41	49.35	5.85
5,3×10 ¹²	10356	0,018	52,95	49.48	49.51	7.41
5,4×10 ¹²	10328	0,019	52,53	49.2	49.13	8.87
1,7×10 ¹³	10357	0,028	53,13	49.61	49.8	8.84
5,18×10 ¹³	10358	0,017	51,87	49.85	50.25	8.85
8,14×10 ¹³	10359	0,016	51,94	49.85	50.0	8.8
2,1×10 ¹⁴	10327	0,016	51,83	49.91	50.0	8.64

Параметры необлученных устройств были взяты из спецификаций компании Hamamatsu. Параметры были определены при +25 °С. Для S12571-010С и S12571-015С приведены усиление (M), рабочее напряжение (V_{op}) и частота темнового шума (F_{dark}) при пороге 0,5 пикселей. Значение напряжения пробоя (V_{br}) не было приведено. Спецификация устройства S13360-1325SS определяет типовой темновой ток 70 кГц и типовое усиление 7,0×10⁵. По каждому конкретному устройству даны значения напряжения пробоя (V_{br}) ток детектора (I_d).

В процессе измерений облученных устройств найдено, что шум возрастает до значений (4–7) пикселей (r.m.s.) после облучения 5,4×10¹² см⁻² и до (10–12) пикселей (r.m.s.) после облучения 2,1×10¹⁴ см⁻². Измерения проводились при: V_{ov} = 3В, t_s = 25 нс, t = -28°C. Было показано, что напряжение пробоя SiPM возрастает при облучениями возрастающими потоками нейтронов. Величина наклона кривой возрастания составляет k(φ)=12–14 мВ/10¹²см⁻².

4.5. Измерение поглощенной дозы пленочными дозиметрами в двух слоях калориметра HE.

Измерение направлено на определение распределения поглощенных доз в мегатайлах двух первых слоев адронного калориметра HE [7]. Были приготовлены 4 полоски из нержавеющей стали, на поверхности каждой из которых размещалось 24 пленочных дозиметра FWT-60 (рис. 5.19). Все четыре набора были установлены на детекторе в апреле 2014 г. Два набора в апреле 2017 г. были сняты с детектора и были проведены измерения доз, зарегистрированных пленочными дозиметрами.

Суммарная светимость, поступившая на HE, равна 45 фбн⁻¹. Распределение поглощенных доз по радиусу мегатайлов в слоях 1 и 2, а также данные, полученные с помощью программы FLUKA, приведены на рис. 5.20. Используя программное обеспечение FLUKA v3.7.2.0 были рассчитаны поглощенные дозы для активных слоев L1b и L2b сцинтилляторов торцевого адронного калориметра HE установки CMS аккумулированные в течении сеансов 2015–2016 годов (светимость 45 фбн⁻¹ при энергии сталкивающихся пучков протонов 13 ТэВ). Было выполнено сравнение поглощенных доз, зафиксированными пленочными дозиметрами, размещенными в этих слоях с расчетами. Из распределения видно, что измеренные значения поглощенных доз не полностью совпадают с результатами моделирования программой.

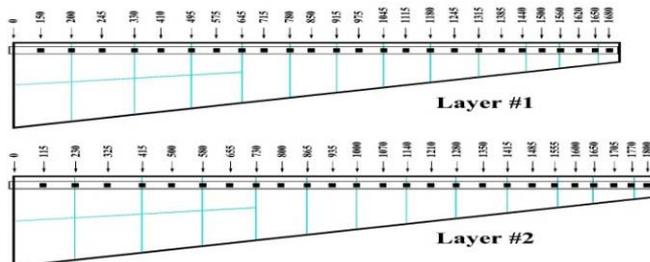
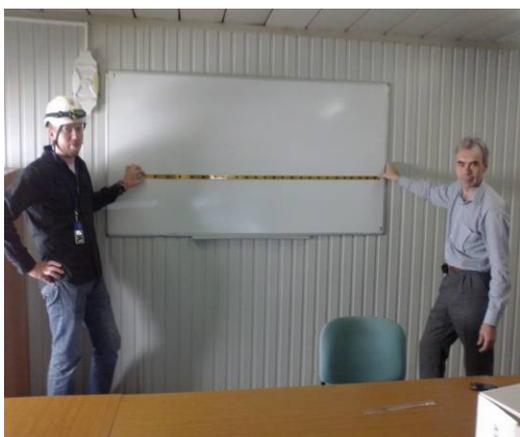


Рис. 5.19. Полоска с установленными на ней пленочными дозиметрами.

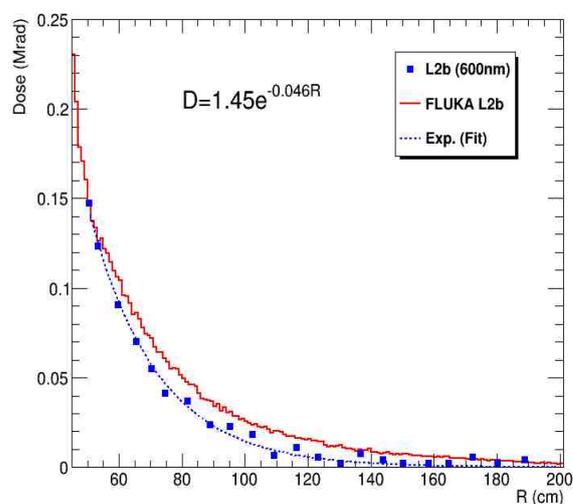
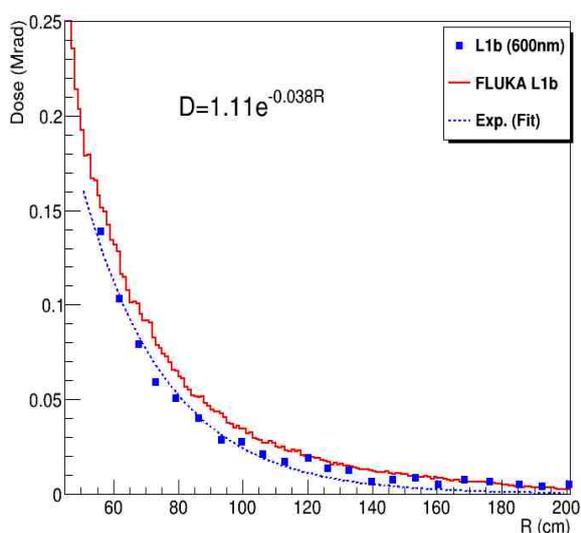


Рис. 5.20. Распределение поглощенных доз по радиусу мегатайлов в слоях 1 и 2, а также данные моделирования, полученные с помощью программы FLUKA.

4.6. Исследования радиационной стойкости сцинтилляторов для Фазы II

Для изучения радиационной стойкости сцинтилляторов и спектросмещающих волокон в условиях CMS в сеансе 2015 г. (светимость 4 фбн^{-1} при энергии сталкивающихся пучков протонов 13 ТэВ) было проведено облучение образцов, которые размещались в конце детектора на так называемом столе CASTOR. Было выполнено сравнение поглощенных доз, зафиксированными пленочными дозиметрами с расчетами FLUKA. Отношение измеренных пленочными дозиметрами и предсказанных FLUKA доз находится в пределах 1.0–1.4 (рис. 5.21), что говорит об удовлетворительном уровне описания моделью FLUKA установки CMS в области стола CASTOR. Предсказания FLUKA могут использоваться для оптимизации расположения образцов и оценки дозы.

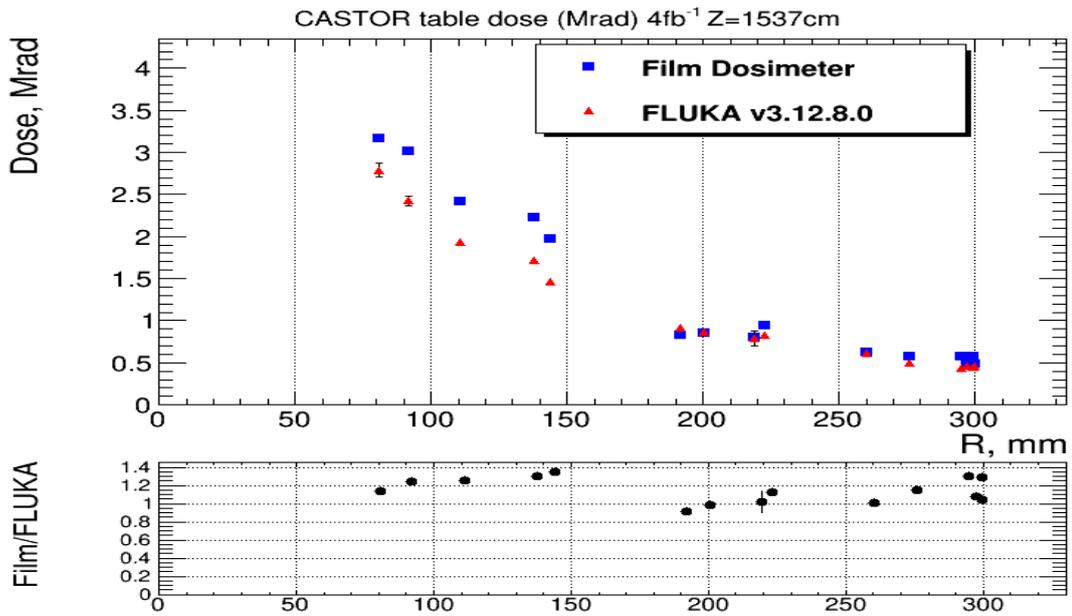


Рис. 5.21. Распределение поглощенных доз в зависимости от расстояния до пучка зафиксированными пленочными дозиметрами в области стола CASTOR и сравнение с данными моделирования, полученными с помощью программы FLUKA.

4.7. Оптимизации поперечной сегментации адронного калориметра для Фазы II

Проведена оценка возможности оптимизации поперечной сегментации торцевого адронного калориметра с помощью детектирования «меченных» струй из процесса рождения бозона Хиггса в процессе слияния векторных бозонов (VBF), при последующем распаде бозона Хиггса на тау-лептоны [9].

В приведенном процессе в конечном состоянии образуются, так называемые, «меченные» адронные струи, инициированные рассеянными кварками, которые в основном наблюдаются в области торцевого адронного калориметра CMS ($1,5 < |\eta| < 3,0$).

Были исследованы три различные поперечные сегментации сцинтилляционных элементов ВН – ячейки квадратной формы с размером $2 \times 2 \text{ см}^2$, $4 \times 4 \text{ см}^2$ и $8 \times 8 \text{ см}^2$. Для каждой поперечной сегментации адронного калориметра было смоделировано и проанализировано ~ 85000 событий рождения бозона Хиггса.

Результаты использования предлагаемого метода оптимизации поперечной сегментации показывают преимущества подробной $2 \times 2 \text{ см}^2$ (или $4 \times 4 \text{ см}^2$) сегментации торцевого адронного калориметра перед более грубой $8 \times 8 \text{ см}^2$ в области $2,25 < |\eta| < 3,0$. В области $1,5 < |\eta| < 2,25$ имеет место обратная ситуация.

Этот результат дал направление для дальнейших исследований, в частности пробовались другие варианты геометрии с зависящим от расстояния от пучка размером ячейки, а также вариант проекционной геометрии (размер ячейки постоянен по η). В дальнейшем с нашим участием велось создание программы моделирования модернизированной геометрии детектора CMS фаза II с HGCal (торцевой калориметр с высокой гранулярностью) и задним адронным калориметром (ВН), в которой использовались активные слои смешанного состава. В настоящий момент в калориметре HGCal предполагается использование кремниевых детекторов в близких (по радиусу) к пучку области и сцинтилляторы в дальней от пучка зоне.

Для такой геометрии оценивались эффективность и чистота отбора VBF струй для различных поперечных сегментаций сцинтилляционной части HGAL. Минимальная сегментация соответствует шагу по псевдобыстроте 0.03 и 1 градусу по азимутальному углу. Получены результаты моделирования для случая когда обе VBF струи имеют значения псевдобыстроты больше 2.25 для конфигураций с объединением ячеек по 1x1, 2x2, 4x4, 6x6 и 8x8 минимальных. Для таких струй произведение чистоты струи на эффективность реконструкции имеет слабую зависимость от сегментации, оптимальными являются промежуточные сегментации от 2x2 до 6x6. Для каждой поперечной сегментации адронного калориметра было смоделировано и проанализировано ~85000 событий рождения бозона Хиггса.

Для случая когда обе VBF струи имеют значения псевдобыстроты меньше 2.25, для конфигураций с объединением ячеек по 1x1, 2x2, 4x4, 6x6 и 8x8, произведение чистоты на эффективность также имеет слабую зависимость от сегментации, оптимальной является минимальная сегментация 1x1.

Оптимальное выделение VBF – процесса с двумя «мечеными» струями в конечном состоянии и в присутствии большого количества фоновых событий рассматривалось как один из основных критериев, используемых для оптимизации поперечной сегментации адронной части калориметра HGAL.

Дальнейший выбор поперечной сегментации был основан на обеспечении технологичности изготовления сцинтилляторов с высокой гранулярностью и обеспечения выделения сигнала от минимально ионизирующей частицы при условии наличия фона электроники считывания (кремниевых фотоумножителей) с учетом радиационных повреждений как сцинтилляторов, так и кремниевых фотоумножителей для интегральной светимости 3000 фбн^{-1} . Сцинтилляторы будут иметь размеры 1 или 1.25 градус по азимутальному углу, радиальные размеры подобраны так, чтобы ячейка имела форму, близкую к квадрату. Такой выбор дает площади отдельных элементов сцинтилляторов от 4 до 30 см^2 и обеспечивает отношение сигнал/шум по количеству зарегистрированных фотоэлектронов для минимально ионизирующей частицы выше 5 для всего срока службы калориметра. Данный выбор поперечной сегментации находится в согласии с приведенным выше результатам исследований при помощи моделирования выделения VBF струй.

4.8. Публикации

1. S.V. Afanasiev, P. de Barbaro, I.A. Golutvin, I.F. Emeliantchik, A.I. Malakhov, P.V. Moisenz, V.A. Smirnov, N.M. Shumeiko. "Improvement of radiation hardness of the sampling calorimeters based on plastic scintillators", Nucl. Instr. Meth. A **717** (2013) 11–13.
2. S.V. Afanasiev, P. de Barbaro, A.Yu. Boyarintsev, I.F. Emeliantchik, I.A. Golutvin, B.V. Grinyov, Yu.V. Ershov, L.G. Levchuk, A.V. Litomin, A.I. Malakhov, P.V. Moisenz, V.F. Popov, N.M. Shumeiko, V.A. Smirnov, P.V. Sorokin, P.N. Zhmurin. "HE upgrade beyond phase Finger scintillator option", CMS NOTE -2014/001, 16 p.
3. S.V. Afanasiev, P. de Barbaro, S.B. Borzakov, I.A. Golutvin, Z.A. Igamkulov, A.I. Malakhov, P.V. Moisenz, G.N. Pogodaev, V.G. Pyataev, P.V. Sedyshev, V.N. Shvetsov, V.A. Smirnov. "Measuring of induced radioactivity of the HE megatile on IREN at JINR", CMS NOTE -2014/002, 13 p.
4. S.V. Afanasiev, S.B. Borzakov, V.A. Egorov, I.A. Golutvin, Z.A. Igamkulov, A.I. Malakhov, P.V. Moisenz, V.G. Pyataev, P.V. Sedyshev, V.N. Shvetsov, V.A. Smirnov, A.O. Zontikov. "Experimental study of the plastic scintillator damage caused by radiation on IREN at JINR", CMS NOTE -2014/003, 17 p.

5. S.V. Afanasiev, A.Yu. Boyarintsev, M.V. Danilov, I.F. Emeliantchik, Yu.V. Ershov, I.A. Golutvin, B.V. Grinyov, E. Ibragimova, L.G. Levchuk, A.V. Litomin, A.M. Makankin, A.I. Malakhov, P.V. Moisenz, I. Nuritdinov, V.F. Popov, V.Yu. Rusinov, N.M. Shumeiko, V.A. Smirnov, P.V. Sorokin, E.I. Tarkovskii, A. Tashmetov, S.E. Vasiliev, B. Yuldashev, N.I. Zamiatin, P.N. Zhmurin. "Finger" structure of tiles in CMS Endcap Hadron Calorimeters", CMS NOTE -2015/001, 15 p.
6. S.V. Afanasiev, A.Yu. Boyarintsev, M.V. Danilov, I.F. Emeliantchik, Yu.V. Ershov, I.A. Golutvin, B.V. Grinyov, E. Ibragimova, L.G. Levchuk, A.V. Litomin, A.M. Makankin, A.I. Malakhov, P.V. Moisenz, I. Nuritdinov, V.F. Popov, V.Yu. Rusinov, N.M. Shumeiko, V.A. Smirnov, P.V. Sorokin, E.I. Tarkovskii, A. Tashmetov, S.E. Vasiliev, B. Yuldashev, N.I. Zamiatin, P.N. Zhmurin. "Light yield measurements of "finger" structured and unstructured scintillators after gamma and neutron irradiation", Nucl. Instr. Meth. A **818** (2016) 26–31.
7. S. Afanasiev, P. Bunin, I. Golutvin, A. Malakhov, V. Smirnov. "Usage of film dosimeters in HE calorimeter for measurement of absorbed dose", 2nd CMS Workshop "Perspectives on Physics and on CMS at HL-LHC", Varna, Bulgaria, 2017, 22 p. <https://indico.cern.ch/event/660957/contributions/2702328/>
8. N. Zamyatin, A. Sheremetevskaya. "Radiation hardness of SiPM in fast neutron fields", 2nd CMS Workshop "Perspectives on Physics and on CMS at HL-LHC", Varna, Bulgaria, 2017, 14 p. <https://indico.cern.ch/event/660957/contributions/2702325/>
9. Использование процесса рождения бозона Хиггса для оптимизации сегментации адронного калориметра. В.Ю. Алексахин, В.Ф. Андреев, В.Б. Гаврилов, И.А. Голутвин, А.Тумасян, Краткие сообщения по физике ФИАН, 12, 2016
10. V. Alexakhin, V. Andreev, I. Golutvin, A. Zarubin, Simulations for CMS hadron endcap calorimeter upgrade at HL-LHC, Phys. Part. Nucl. **49** (2018) No.1.

5. НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТОРЦЕВОЙ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ CMS В РАМКАХ ФАЗЫ II

Основная задача Фазы II модернизации CMS нацелена на развитие детектора CMS, необходимое для эффективной работы в установке в режиме высокой светимости до $L=5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при значении интегральной светимости до 3 абн^{-1} [1].

В таблице 6.1 приведены сравнительные параметров коллайдера и мюонной системы при работе в условиях максимальной проектной светимости LHC и в условиях повышенной светимости HL-LHC. Очевидно, что повышение светимости и наложения событий в 5 раз, повышение интегральной светимости в 10 раз, повышение частоты триггирования в 7,5 раз и возрастание задержки триггера первого уровня в 4 раза накладывают дополнительные требования к эффективной работе детекторов и электроники и определяют необходимость модернизации ряда электронных модулей для надежной работы в условиях HL-LHC.

Табл. 5.1. Параметры коллайдера и мюонной системы для опций LHC и HL-LHC.

		LHC	HL-LHC	Increases by factor:
Collider	instantaneous luminosity ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	10^{34}	5×10^{34}	5
	pileup collisions	30	150	5
	integrated luminosity (fb^{-1})	300	3000	10
CMS	L1 trigger (kHz)	100	750	7.5
	L1 trigger latency (μs)	3.2	12.5	3.9
	Muon System DAQ Bandwidth		$\times 10$	10

В условиях высокой светимости коллайдера существенно возрастает воздействие радиации на детекторы и электронику, приводящее к эффектам «старения» элементов детекторов и к радиационным повреждениям электронных компонентов. В 6 раз возрастет интегральная доза облучения (необходим фактор безопасности 3) и в 5 раз увеличится частота сигналов и уровня фоновых загрузок. Необходимо сертифицировать сами детекторы и электронику для работы в радиационных условиях HL-LHC.

Всестороннее исследование старения детекторов поводится на установке GIF ++ (CERN). Старение электроники исследуется на различных объектах, где проводится облучение электронных компонентов и модулей в условиях, приближенных к условиям работы при HL-LHC: в CERN (CHARM), UC Davis (циклотрон) и TAMU (реактор).

5.1. Изучение эффектов «старения» на установке GIF++

Повышение светимости в результате будущей модернизации LHC в HL-LHC приведет к значительному росту фоновых событий в детекторах частиц. В связи с этим представляется очень важным исследование эффектов «старения» в материалах и газах координатных детекторов. Такое исследование для CSC проводится, начиная с февраля 2016 г. на установке GIF++ (CERN), имеющей источник гамма-квантов Cs-137 активностью 14 ТБк (рис. 5.1). Мощность поглощенной дозы на расстоянии 0,5 м от источника составляет 1 Гр/час. Система фильтров позволяет пошагово ослаблять поток гамма-квантов вплоть до 46 тыс. раз. По территории GIF++ проходит выведенный канал пучков SPS CERN, что делает возможным проводить сеансы по тестированию детекторов, расположенных в зоне

пучка на мюонах. Установка имеет 2 конуса облучения – вдоль пучка и навстречу пучку с общей зоной экспозиции 100 м².

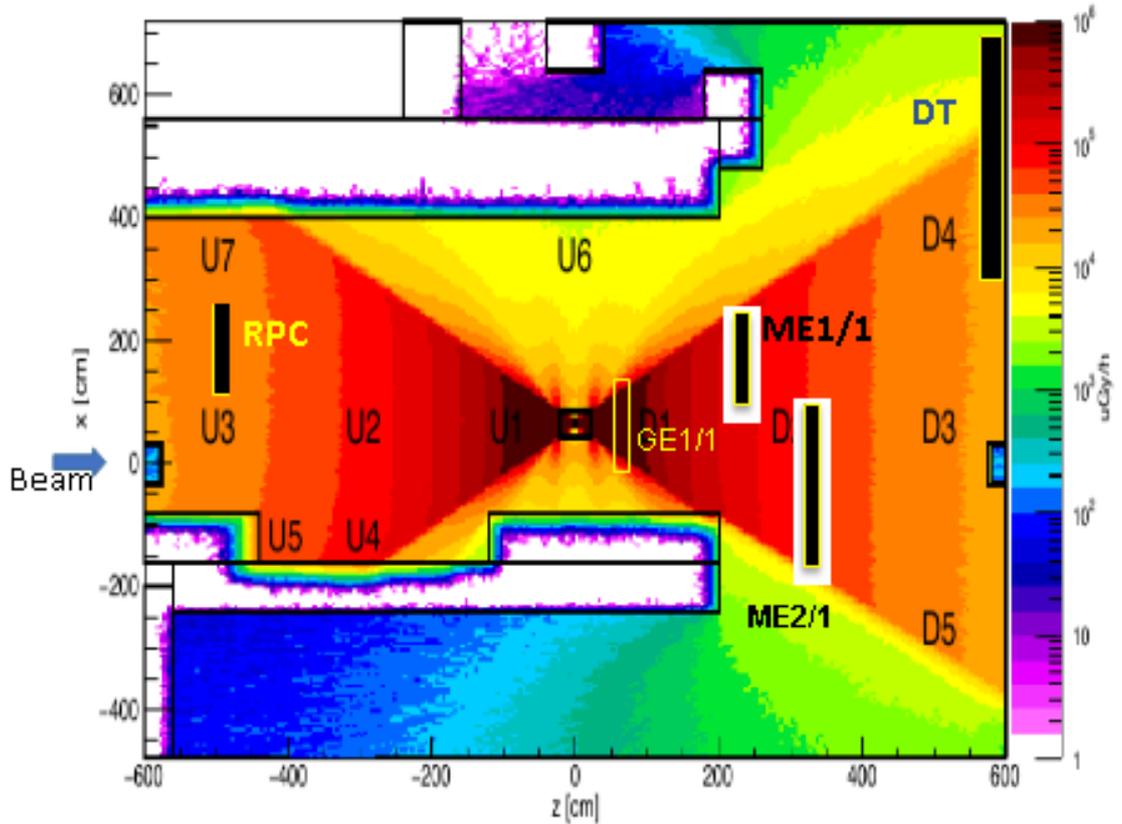


Рис. 5.1. Радиационное поле источника установки GIF++.

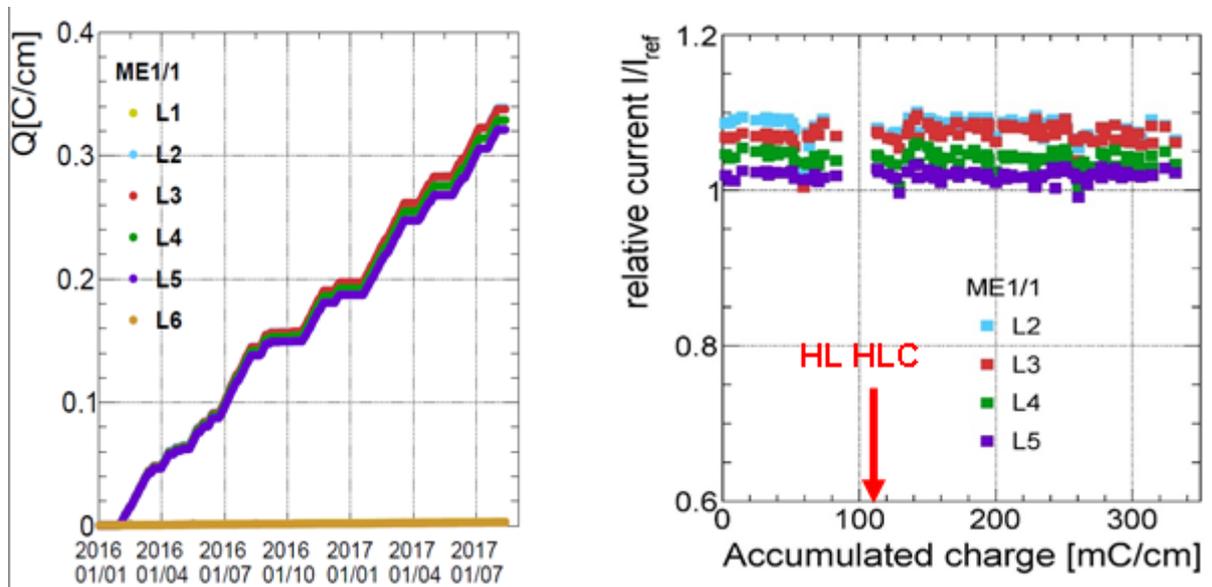


Рис. 5.2. (слева) накопленный заряд на единицу длины проволоки ME1/1 во времени; (справа) относительный ток I/I_{ref} в 4х облученных субкамерах ME1/1 в зависимости от накопленного заряда.

В качестве тестовых были выбраны камеры станций ME1/1 и ME2/1, как имеющие наибольший поток фоновых событий в CMS. Расчеты показывают, что при работе HL-

ЛНС в течение 10 лет заряд, выделившийся на единицу длины анодной проволоки ME1/1, составит приблизительно 0,11 Кл/см. Доза, набранная на этих двух камерах в 2016–2017 гг., превысила величину в 330 мКл на см анодной проволоочки (см. рис. 5.2, слева). В соответствии с оценками, набранная в 2016–17 гг. доза соответствует дозе, которая могла быть получена за 3 периода 10-летней работы ускорителя HL-LHC. Рис. 5.2 (справа) показывает величины относительного тока в субкамере ME1/1 за вычетом величины I/I_{ref} в зависимости от накопленного заряда для 4х облучаемых субкамер. I_{ref} – это средняя величина токов в двух мониторинговых субкамерах в момент кратковременного теста с включенным гамма-источником. Деградации относительного тока в зависимости от дозы облучения не наблюдается. Таким образом можно заключить, что газовое усиление в субкамерах стабильно и КСК могут работать без ухудшения их параметров весь период HL-LHC. Эти данные являются предварительными и тесты продолжаются.

5.1.1. Изучение характеристик CSC в пучках HL-LHC при наличии некоррелированного фона

Как было отмечено выше, нейтронный фон в условиях HL-LHC приведет к росту ложных событий в мюонных камерах, что в свою очередь приведет к ухудшению пространственного разрешения мюонных станций CMS. В отличие от фоновых событий, связанных с регистрацией камерой дельта-электронов, сопровождающих мюоны высоких энергий, нейтронный фон считается некоррелированным с мюоном. По имеющимся экспериментальным данным были сделаны оценки средней величины тока в субкамере при достижении мгновенной светимости $L=5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Для субкамер станции ME1/1 величина тока составила 10 мкА. На протяжении 2016–17 гг. на установке GIF++ периодически проводились тестовые сеансы с набором данных на пучках мюонов без и в присутствии источника гамма-квантов с набором фильтров. На рис.5.3 представлены результаты этих тестов, демонстрирующие пространственное разрешение камеры ME1/1 в зависимости от тока в субкамере, вызванного гамма-квантами, при различных величинах заряда, накопленного на единицу длины анодной проволоочки $Q = 83\text{--}331 \text{ мКл/см}$. Для условий HL-LHC можно ожидать, что пространственное разрешение станции ME1/1 ухудшится на 8%. Кроме того, ухудшения пространственного разрешения в зависимости от накопленной дозы не наблюдается.

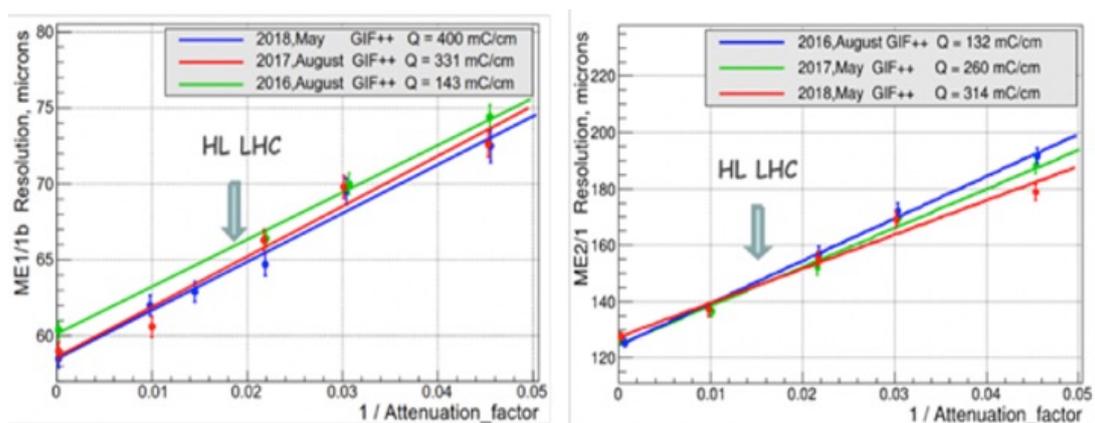


Рис. 5.3. Пространственное разрешение камер ME1/1 (слева) и ME2/1 (справа) в зависимости от интенсивности облучения (по оси x отложена величина, обратная коэффициенту ослабления пучка гамма-квантов) при различных величинах заряда, накопленного на единицу длины анодной проволоочки Q.

3.4.3. Изучение методов устранения токов Мальтера в катодно-стриповой камере.

Эффект Мальтера был описан Л. Мальтером в 1936г. [9]. Данный эффект наблюдается в проволочных координатных детекторах, работающих в полях ионизирующих излучений. Проблема возникает при наличии на катоде камеры пятна – к примеру изолирующего окисла, препятствующего рекомбинации ионов, образующихся при развитии лавины Таунсенда. При определенных условиях суммарный заряд данных ионов может создать поле, достаточное для электронной эмиссии из катода в газовый объем камеры. Возникает так называемый ток Мальтера, который существует в самоподдерживающемся режиме и значительно превосходит номинальный ток в зазоре анод-катод камеры.

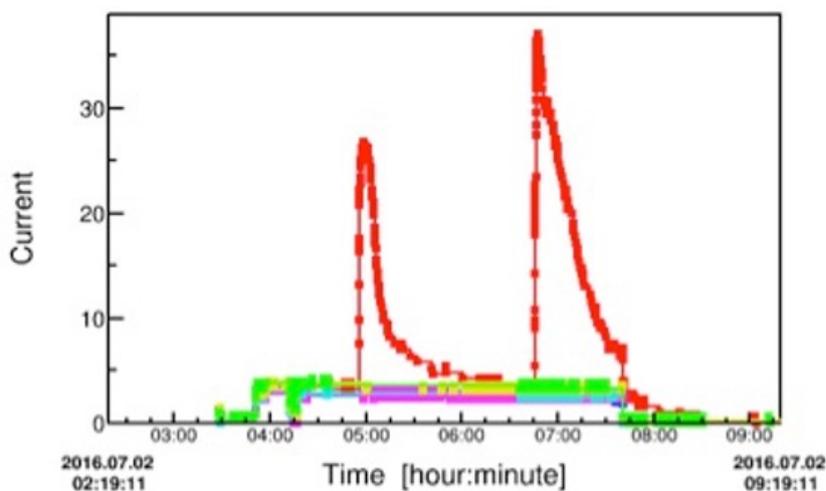


Рис. 5.4. Мальтер–ток (красным) в одной из 6 субкамер камеры ME1/1.

На Рис. 5.4 красным показан Мальтер–ток в одной из 6 субкамер катодно–стриповой камеры ME1/1. Данные получены на сеансе в протон–протонных столкновениях на установке CMS. Остальные 5 субкамер имеют ток на уровне 3–4 мкА. Очевидно, что подобные токи являются разрушительными для поверхности анодных проволочек и могут приводить к их обрыву.

Установка GIF++ является уникальным инструментом для изучения Мальтер–эффекта, так как позволяет облучать всю рабочую область камеры и менять ток в зазоре анод-катод при помощи поглощающих фильтров. В 2017–2018гг. группой сотрудников ОИЯИ проводились тестовые сеансы с целью разработать методику устранения Мальтер–токов в камерах ME1/1. Пример успешного «лечения» Мальтер–эффекта приведен на Рис. 5.5. Для субкамеры L2 (синим) рабочее напряжение постепенно повышалось с шагом ~5–10 В по мере того, как ток в субкамере уменьшался. В результате даже при напряжении 3000В (на 100В выше рабочего) Мальтер–токов не наблюдалось.

spareME11

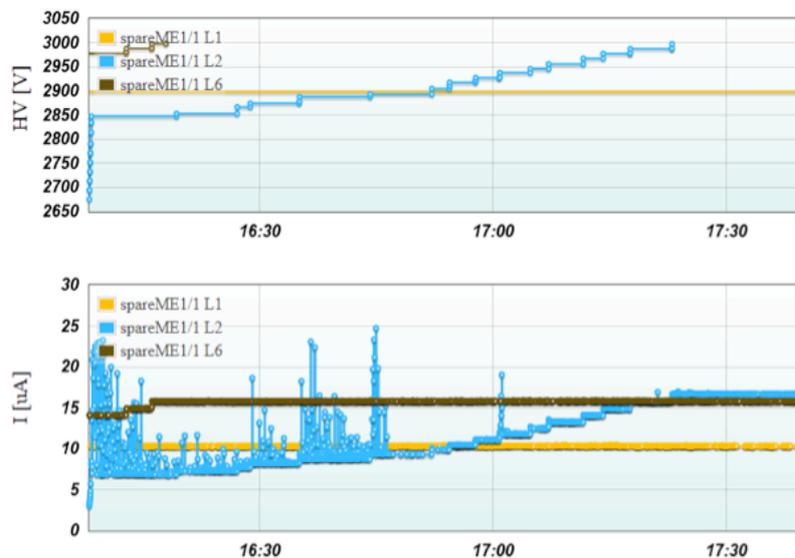


Рис. 5.5. Высоковольтная тренировка субкамеры L2 (синим), имеющей Мальтер-ток.

В качестве развития методики «лечения» камер предполагается автоматизация процесса тренировки напряжением и использование добавки 1–2% кислорода в газовую смесь.

5.2. Публикации

1. CMS Collaboration, “Technical Proposal for the Phase-II Upgrade of the Compact Muon solenoid”, CERN-LHCC-2015-10, LHCC-P-008, CMS-TDR-15-02, ISBN 978-92-9083-417-5, 1 June 2015.

6. РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ РАЗВИТИЕ АЛГОРИТМОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В 2013–2020 гг. осуществлялась разработка и оптимизация и алгоритмов для реконструкции физических объектов в условиях большой загрузки детекторных систем. Тестирование проводилось как на данных моделирования, так и на экспериментальных данных, набранных при энергии сталкивающихся пучков протонов 13 ТэВ в с.д.м. и светимости до $2,14 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Также в рамках создания высоко-гранулярного торцевого калориметра (HGCal) для Фазы II CMS велись работы по развитию программного обеспечения для моделирования энергетического, импульсного и пространственного разрешения, реконструкции струй и критериев идентификации мюонов.

6.1.1. Реконструкция трек-сегментов

Для улучшения качества реконструкции в CSC был разработан и протестирован алгоритм для реконструкции трек-сегментов в катодно-стриповых камерах [1,2]. Эффективность реконструкции трек-сегментов была улучшена по сравнению со стандартным алгоритмом на 4–7% во всех областях псевдобыстроты.

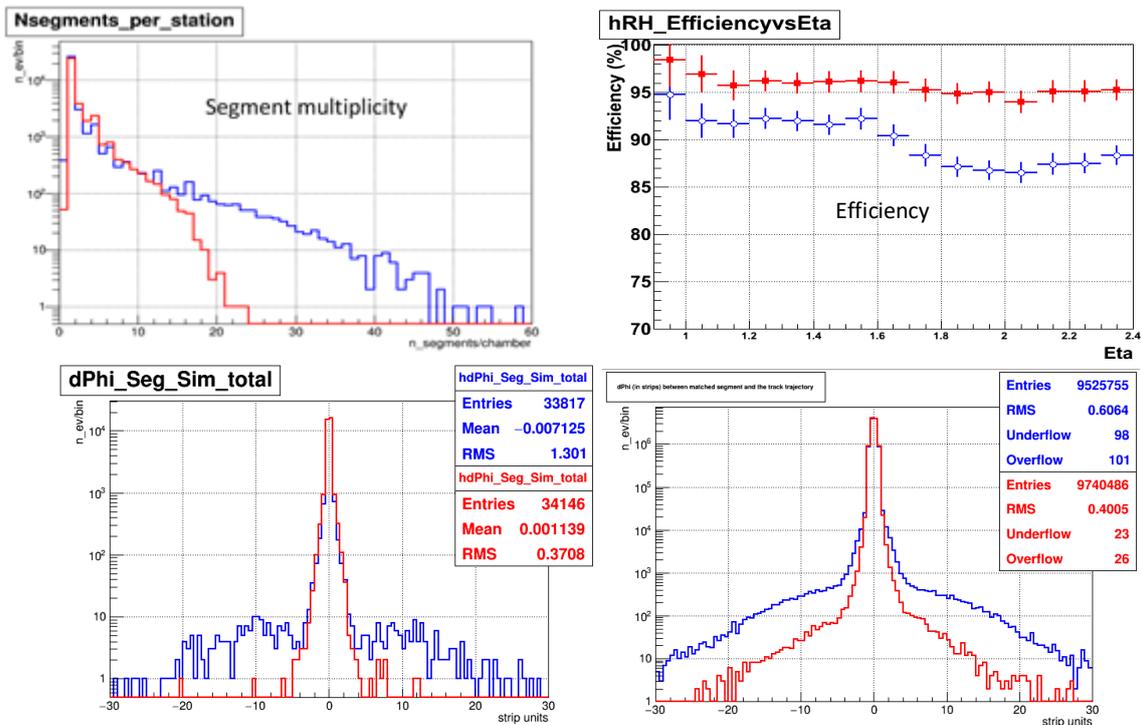


Рис. 7.1 Сравнение стандартного ST (синий) и нового RU (красный) алгоритмов реконструкции трек-сегментов. (верхний левый) Число реконструированных трек-сегментов в камере для моделированных мюонов с $p_T = 1 \text{ TeV}$; (верхний правый) Зависимость эффективности реконструкции от псевдобыстроты для моделированных мюонов с $p_T = 1 \text{ TeV}$; (нижний левый) Разница азимутальных координат (в единицах ширины стрипа) трек-сегмента ассоциированного с реконструированным мюоном и моделированного мюона с $p_T = 1 \text{ TeV}$; (нижний правый) Разница азимутальных координат трек-сегмента ассоциированного с мюоном и реконструированного мюона на экспериментальных данных 2016 года.

Детальный сравнительный анализ был проведен с целью подтверждения необходимости использования нового алгоритма в качестве базового алгоритма реконструкции в CSC на Монте-Карло [2] и экспериментальных данных. В сравнении со стандартным алгоритмом существенно уменьшается множественность трек-сегментов (рис.7.1, верхний левый). Это повышает точность и уменьшает время выполнения реконструкции на последующих этапах, где требуется перебор по всем построенным трек-сегментам. Эффективность стандартного алгоритма падает с увеличением псевдобыстроты, в то время как для нового алгоритма эффективность остаётся на высоком (~95%) уровне для всего диапазона псевдобыстрот, перекрываемых CSC (рис.7.1, верхний правый). Точность реконструкции азимутальной координаты, обеспечивающей точность восстановления поперечного импульса мюонов, значительно улучшена рис.7.1 (снизу), что хорошо видно на примере мюонов с высокой энергией (рис.7.1, нижний левый), где среднеквадратичное отклонение отображаемого распределения более чем в три раза меньше для нового алгоритма по сравнению со старым.

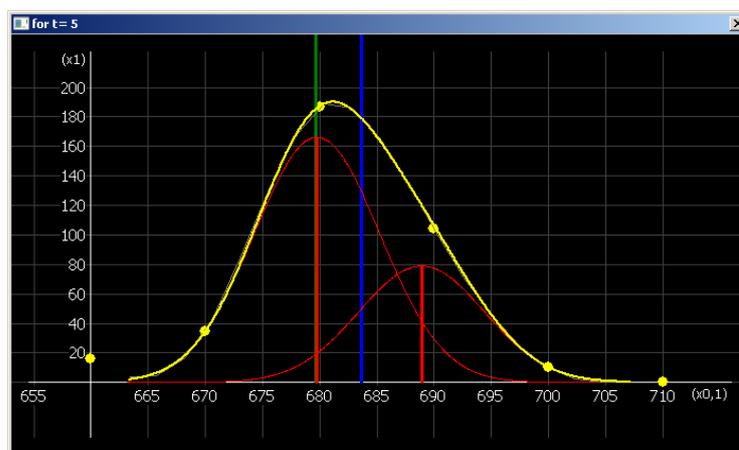


Рис. 7.2. Пример реконструкции перекрывающихся сигналов на отдельно взятом слое CSC. Зеленая линия – моделированная координата мюона; Желтый – исходное распределение сигнала; Синяя линия – координата восстановленная стандартным алгоритмом; Красный – перекрывающиеся сигналы распознанные предложенным алгоритмом.

Новый алгоритм реконструкции трек-сегментов был имплементирован в официальный пакет программ CMS в июле 2016-го года и, начиная с 2017-го года, он используется по умолчанию при реконструкции моделированных и экспериментальных данных.

В условиях большой множественности срабатываний (загруженности) на отдельно взятой плоскости детекторов CSC, стриповая координата восстанавливается с плохой точностью (30-60% от ширины стрипа). Это связано с тем, что для кластера, состоящего из перекрывающихся сигналов, для вычисления координаты используется обычный алгоритм центра масс. Для улучшения точности реконструкции стриповой координаты была начата разработка нового алгоритма локальной реконструкции в CSC с использованием вэйвлет-анализа. На рис. 7.2 представлен пример реконструкции стриповых координат двух перекрывающихся сигналов. Зеленая линия, соответствующая моделированной координате мюона, полностью совпадает с координатой одного из распознанных предложенным алгоритмом сигналов (красная линия), в то время как в стандартном подходе реконструированная координата (синяя линия) сдвинута почти на половину ширины стрипа от координаты мюона.

6.1.2. Реконструкция мюонов и пар мюонов

В рамках подготовки программы физических исследований на модернизированном после RUN1 детекторе с помощью данных Монте-Карло были получены результаты по возможности установки CMS для отбора и реконструкции пар мюонов в диапазоне инвариантных масс пар мюонов до 6 ТэВ/c² [3]. Эффективность офлайн-реконструкции в акцептансе установки событий Дрелла-Яна не хуже 90 % во всем диапазоне исследуемых масс (рис. 7.3, левый). Полная эффективность процедуры реконструкции с учетом акцептанса и неэффективности отбора событий от 45 до 82 %. Разрешение по инвариантной массе двух мюонов было исследовано с помощью различных алгоритмов реконструкции для двух сценариев выравнивания детекторных системы (начальной и оптимистичной). В наиболее оптимальном случае разрешение не хуже 6% даже в области инвариантных масс ~ 6 ТэВ/c² (рис.7.3, правый).

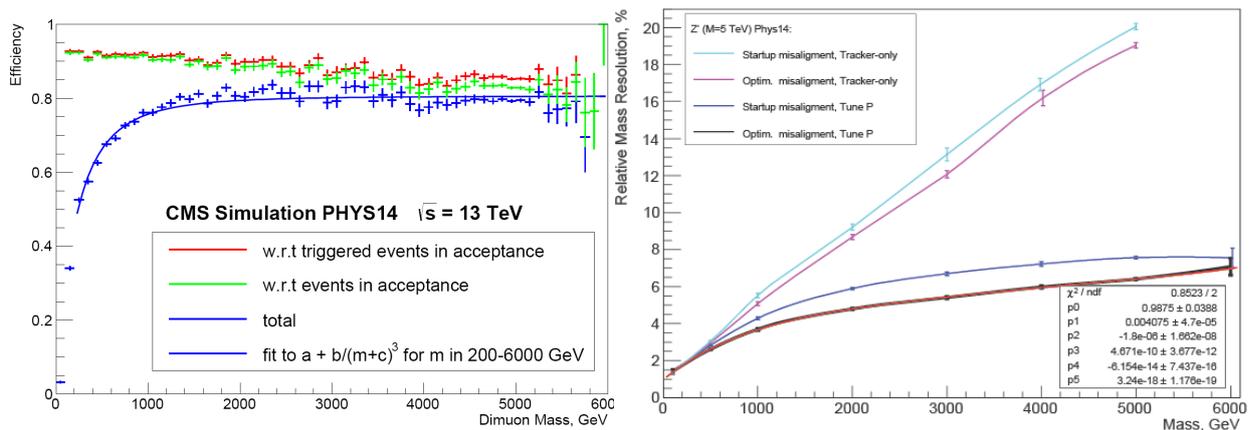


Рис. 7.3. (слева) Эффективность реконструкции пар мюонов для всех событий в акцептансе (зеленые точки) и событий, прошедших условия отбора триггера (красные точки), а также полная эффективность с учетом акцептанса установки (синие точки). (справа) Разрешение по инвариантной массе двух мюонов для различных сценариев реконструкции и выравнивания детекторных систем [3].

Было проведено детальное моделирование с помощью программного комплекса Geant с включением и выключением механизмов радиационных потерь мюонов в веществе установки: тормозного излучения и рождения e^+e^- пар. Было показано, что без радиационных потерь эффективности мюонного триггера практически не меняется с ростом поперечного импульса мюона, следовательно, слабое падение эффективности происходит из-за физических эффектов радиационных потерь мюонов в веществе, и главный вклад вносит тормозное излучение мюонов.

С середины 2015 г. в рамках реализации программы ОИЯИ в CMS по физическому анализу физики ОИЯИ активно участвовали в обработке и анализе данных нового сеанса LHC при энергии сталкивающихся пучков 13 ТэВ в с.д.м. как при нулевом магнитном поле, так и при его номинальном значении. В июне 2015 года начался набор данных при 13 ТэВ, в первый месяц установка CMS работала без магнитного поля, что привело к отсутствию возможности измерения импульсов треков заряженных частиц по углу отклонения в магнитном поле. Тем не менее такой набор данных был полезен для отладки работы мюонной системы: несмотря на то, что все мюонные камеры были исправлены во время длинной остановки коллайдера 2013–2014 годов, были найдены проблемы в программном обеспечении, которые проводили к появлению неэффективностей в отдельных камерах. В результате проведенного исследования проблемы были исправлены до начала набора физических данных.

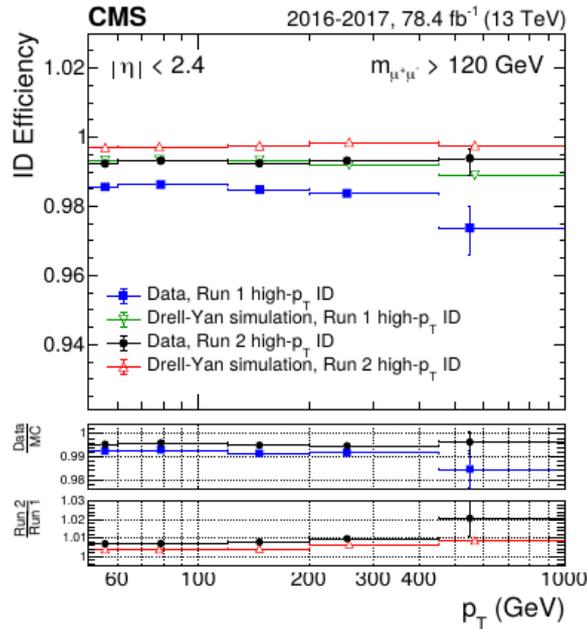


Рис. 7.5. Сравнение зависимости эффективностей реконструкции мюонов в Run 2 и Run 1 от поперечного импульса мюонов p_T .

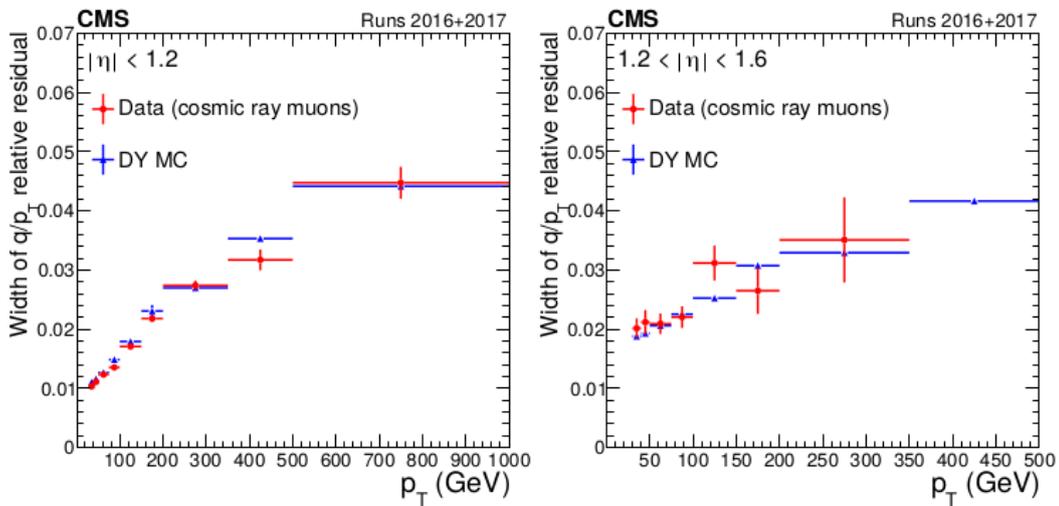


Рис. 7.6. Импульсное разрешение для TuneP космических мюонов из данных 2016-2017 гг. в области цилиндрических камер ($|\eta| < 1.2$) (слева) и в области торцевых камер ($|\eta| > 1.2$) (справа) в сравнении с разрешением, полученным в моделировании процессов Дрелла-Яна методом Монте-Карло.

Далее настройка обновленных алгоритмов реконструкции мюонов и пар мюонов была продолжена на данных сеанса 2016 года на статистике, соответствующей интегральной светимости около 36 фбн^{-1} в условия наложения событий со средним числом взаимодействий (pile-up) до $\langle \mu \rangle \approx 35$ (максимальное значение $\langle \mu \rangle \approx 56$).

Большой набор данных в Run 2 при энергии $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$ позволил провести детальное исследование характеристик мюонов больших поперечных импульсов, которые обеспечивают прямой доступ к новым физическим режимам за пределами стандартной модели. Поскольку физика и реконструкция этих мюонов отличается от их аналогов с меньшим

импульсом, впервые были представлены специальные исследования эффективности и импульсного разрешения, полученных на CMS мюонов с высокими импульсами [4]. В ходе нового физического сеанса Run 2 было проведено дальнейшее улучшение работы алгоритмов реконструкции мюонов. Рис.7.4 показывает эффективности реконструкции мюонов в Run 2 как функции поперечного импульса мюонов p_T в сравнении с эффективностью в Run 1. Они получены из моделирования событий Дрелла-Яна и димюонных событий в данных после объединения данных 2016-2017 гг. Видно существенно улучшение эффективности в Run 2 [4]. Кроме того, нами были получены данные по зависимости импульсного разрешения мюонов от импульса с использованием двух мюонных треков, образованных космическими мюонами. Для анализа использовались как специальные сеансы облучения детектора CMS космическими мюонами, так и сеансы протон-протонных столкновений. Применение последних имеет те преимущества, что используются те же условия набора данных, триггеры и реконструкция, что и в физических сеансах, в результате чего впервые в CMS была набрана значительная статистика космических мюонов, проходящих через торцевую часть мюонного детектора $|\eta| > 1.2$ (Рис. 7.5). Наблюдается хорошее согласие измеренных на данных импульсных разрешений с предсказаниями Монте-Карло для процесса Дрелла-Яна [4].

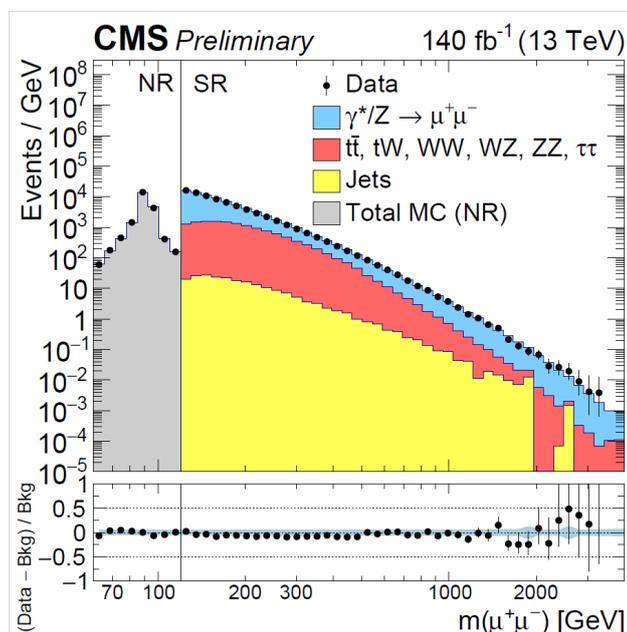


Рис. 7.7. Спектр инвариантных масс событий с парами мюонов, полученный на данных сеанса LHC при 13 ТэВ в 2016-2018 гг. [4]. Гистограммами показаны вклады различных фоновых процессов стандартной модели. События в сигнальной области (SR), соответствующей массам выше 120 ГэВ, собирались с помощью одиночного мюонного триггера, в области нормализации (NR, показанной серым цветом) для $m_{\mu\mu} < 120$ ГэВ использовался предварительно масштабированный триггер с порогом $p_T = 27$ ГэВ.

Используя всю статистику данных за 2016-2018 гг. были проведены измерения спектра инвариантных масс событий с парой мюонов (рис.7.6) [5]. При этом эффективности как идентификации мюонов, так и требований изолированности, полученных в моделировании по методу Монте-Карло, корректировались по данным. Были получены отношения эффективностей (scale factors) идентификации и изоляции мюонов в данных и Монте-Карло с помощью метода Tag-and-Probe, использующим число Z-бозонов в фите спектров инвариантных масс пар мюонов в данных и Монте-Карло [6].

6.1.3. Реконструкция физических объектов в торцевом калориметре Фаза II и характеристики детектора

На HL-LHC будет достигнута светимость, в десять раз превышающая светимость на LHC, и это создаст большие трудности в плане радиационной стойкости детектора и его работы при большой множественности первичных частиц (PU). Эти проблемы будут особенно актуальны для передних калориметров, расположенных в области больших псевдобыстрот. В рамках программы модернизации детектора CMS для работы на HL-LHC, коллаборация предлагает построить калориметр высокой гранулярности (HGAL[7]), чтобы заменить, существующие передние калориметры.

Для модернизированного переднего калориметра нами были разработаны алгоритмы реконструкции электромагнитных и адронных ливней и изучены их характеристики, включая пространственное, энергетическое и импульсное разрешения. Также, нами был разработан критерий идентификации мюонов, использующий информации HGAL.

Калориметры, формирующие изображение, такие как HGAL, с высокой гранулярностью, производят большое количество информации и позволяют улучшить распознавание структуры ливней. На рис. 7.8 показаны энерговыделения в калориметре ассоциированные с ливнями пар фотонов, находящимися на расстоянии примерно 3 см друг от друга. Более того HGAL предоставляет точную информацию по времени срабатывания детектирующих ячеек, позволяющую отделить сигнальные события от PU событий. Пятимерная информация (энергия, x, y, z и время) идеально подходит для реконструкции particle-flow (PF). Разработка полной PF реконструкции для HGAL потребует много времени и сил. На данный момент были разработаны основные подходы и техники реконструкции и продемонстрирован потенциал детектора.

На рис. 7.9 показаны энергетические разрешения в зависимости от поперечного импульса фотона полученные в исследовании, использовавшем полную симулированную информацию. На левом графике приведены разрешения, полученные при суммировании энергии сенсоров в радиусе 2,6 см от центра для оценки энергии ливня, без PU (штрихованные линии) и со средним PU 200 (сплошные линии). На правом рисунке при приведены разрешения при радиусе суммирования 5,3 см. Во втором случае разрешения значительно деградирует с PU, что иллюстрирует преимущество большой гранулярности HGAL.

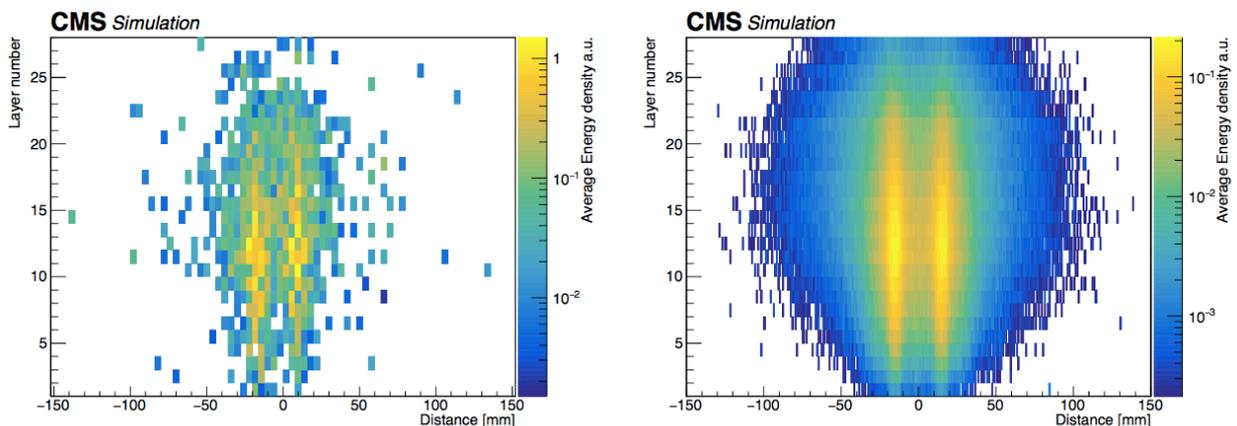


Рис. 7.8. Энерговыделение в сенсорах HGAL пар фотонов, не распавшихся в трекаре; (левый) для одного события с двумя фотонами; (правый) несколько тысяч таких событий. Энергия фотонов 80 ГэВ ($p_T=14,4$ ГэВ) с псевдобыстротой 2,4 в HGAL. Расстояние между фотонами порядка 30 мм. Реконструированные хиты спроектированы на плоскость, образованную осями ливней. Цветом показана плотность энергии.

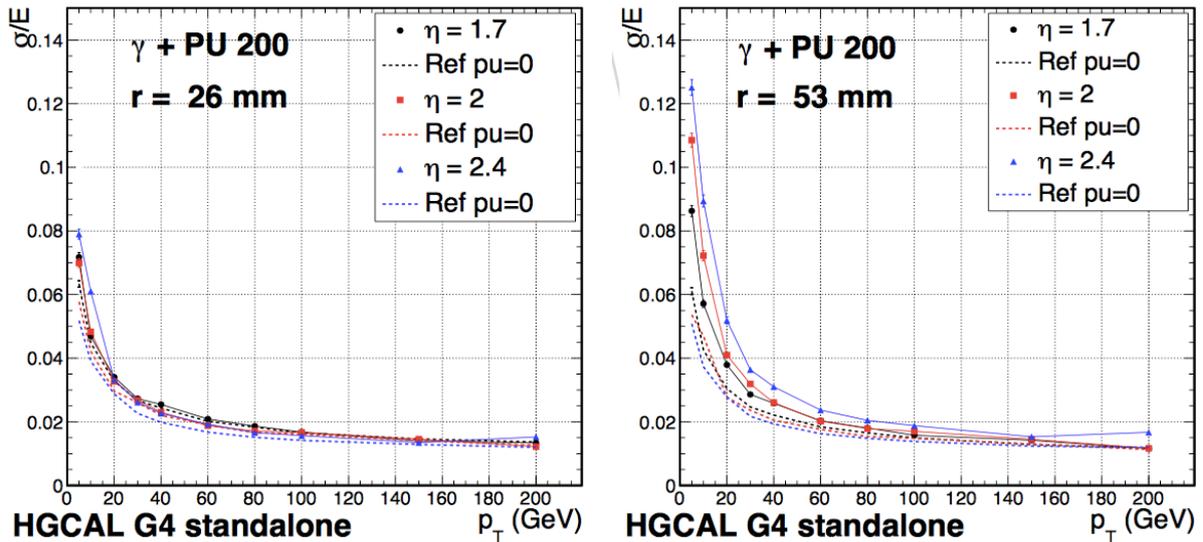


Рис. 7.9. Относительное энергетическое разрешение фотонов в зависимости от их поперечного импульса; (левый) используя радиус 2,6 см и (правый) используя радиус в 5,3 см при суммировании энергии.

Нами был разработан алгоритм реконструкции адронных ливней с большим поперечным импульсом ($p_T > 15$ ГэВ/с) в PU. Этот алгоритм не является окончательным и, очевидно, существуют более сложные варианты реконструкции, способные улучшить разрешения при меньших p_T . Алгоритм строит двумерные кластеры в слоях HGICAL из которых мы впоследствии получаем 3d мультикластеры, которые в дальнейшем используются алгоритмом.

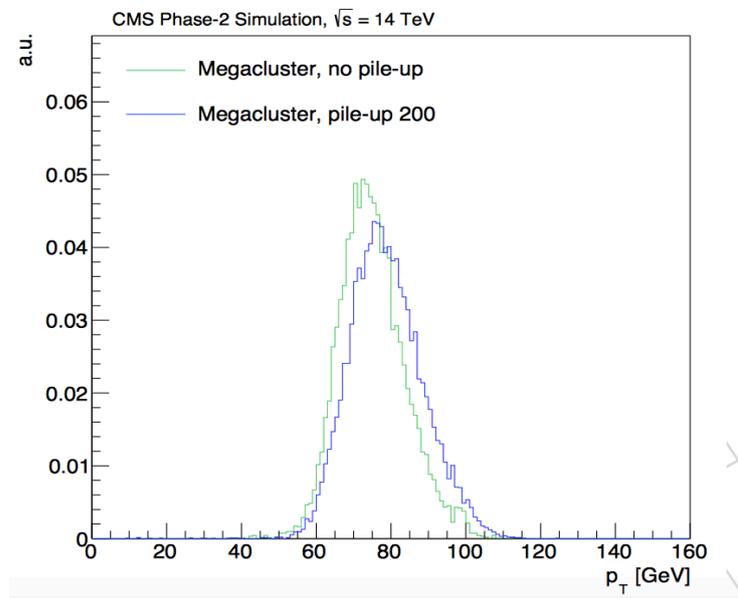


Рис. 7.10. Реконструированное распределение по энергии заряженных пионов с $p_T=100$ ГэВ с PU и без PU, до вычета энергии PU и калибровки энергии.

На рис. 7.10 показано реконструированное распределение по энергии заряженных пионов с $p_T=100$ ГэВ/с с PU и без PU, до вычета энергии PU и калибровки энергии.

Мы планируем изменить реконструкцию в частности включив в нее информацию о времени срабатывания ячеек, протестировать подходы использующие нейронные сети и обновить геометрию детектора. Более того мы планируем разработать алгоритмы быстрой симуляции событий используя, как традиционные методы, так и методы, основанные на применении алгоритмов машинного обучения.

6.1.4. Реконструкция событий с кварковыми и глюонными струями

На адронном коллайдере практически невозможно получить чисто кварковую (q) или глюонную (g) выборку струй. Для получения выборки q/g -струй заданной чистоты разрабатываются дискриминаторы (D) q/g -струй. Дискриминатор эксплуатирует несколько чувствительных к аромату струи физических параметров струи. Задавая рабочую точку D_0 можно достичь требуемой чистоты в выборке струй, подчиняющихся условиям $D > D_0$ или $D < D_0$. Условия отбора по дискриминатору с заданной высокой степенью чистоты сильно ограничивают количество струй выборки, что нивелирует одно из главных преимуществ адронного коллайдера – большое количество рожденных струй. Большое количество струй в выборке позволяет с высокой точностью измерить характеристики струй (распределения струй по физическим параметрам струи и моменты этих распределений). Знание характеристик в заданной выборке струй само по себе малоинформативно, поскольку получить аналогичную выборку на основе Монте Карло (МК) моделирования практически невозможно ввиду систематических неопределенностей, которые влияют на определение долей q/g -струй в данных и МК. Устойчивое и надежное сравнение характеристик струй возможно только для струй с заданным ароматом. Для того чтобы получить характеристики q/g -струй из измеренных с хорошей точностью характеристик произвольных выборок струй необходимо измерить с хорошей точностью доли q/g -струй в выборках. В работе [8] показано, что измерение долей q/g -струй может быть выполнено с хорошей точностью, определяемой количеством струй в выборке, если использовать модельно-зависимые D -распределения реконструированных с учетом отклика детектора q/g -струй.

Метод измерения долей q/g -струй, предложенный в работе [8], применен для ряда выборок струй, отобранных в полулептонном $t\bar{t}$ -канале и в канале “dijet” [9]. В полулептонном $t\bar{t}$ -канале отобраны две выборки струй с существенно разными дялями g -струй: выборка струй от распадов W , у которых согласно условиям отбора преобладают q -струи (условно именуемые как W -струи), и обогащенная g -струями выборка дополнительных струй, сопровождающих пару W -струй (условно именуемые как “5-струи”). В канале “dijet” отобраны три выборки струй: струи из пары “dijets” без дополнительного струйного сопровождения, струи из пары “dijets” с одной или двумя дополнительными струями в событии, и струи из пары “dijets” с тремя и более дополнительными струями в событии. Указанные пять выборок струй используются для измерения долей g -струй на данных CMS Run-I(2012). Измерение долей g -струй также выполнено для трех выборок струй из канала “dijet” для данных CMS Run-II (2016).

Результаты измерений доли глюонных струй в зависимости от поперечного импульса струй показаны на Рис. 7.11-7.12. Из этих рисунков можно заметить, что глюонные струи сильно подавлены в данных относительно аналогичных выборок струй в МК для “ W -струй” и “5-струй” в первых двух P_T^{jet} -бинах ($P_T^{jet} \in [30, 90]$ ГэВ). Подавление глюонных струй в данных относительно выборок МК наблюдается также в выборках канала “dijet” как для Run-I, так и для Run-II в области малых и средних P_T^{jet} . Различие в поведении глюонной фракции как функции P_T^{jet} для Run-I и Run-II может быть связано с зависимостью доли глюонных струй от углового радиуса алгоритма сборки струй: $R=0.5$ (Run-I) и $R=0.4$ (Run-II) [8].

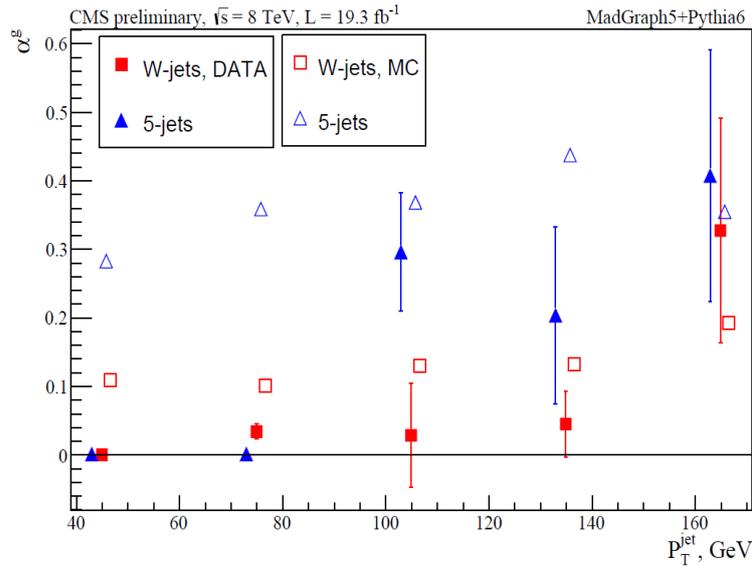


Рис. 7.11. Измеренные доли g -струй в выборках “ W -струй” и “5-струй”, отобранных в полуплептонном $t\bar{t}$ -канале в данных CMS Run-I(2012). Измерения выполнены с использованием кварк-глюонного “likelihood” (QGL) дискриминатора и для QGL-распределений q/g -струй, полученных в модели MADGRAPH5+PYTHIA6.

Измеренные доли глюонных струй позволяют измерить характеристики q/g -струй в описанных выше выборках. Это будет выполнено в ближайшей перспективе. Заметим, что измерения характеристик q/g -струй на адронных коллайдерах до настоящего времени выполнялись с использованием глюонных фракций, полученных с помощью генераторов (CDF-2005 и ATLAS-2015). Сильное отклонение для глюонных фракций в данных относительно генераторных значений, показанное в [8], указывает на некорректность использования генераторных глюонных фракций для извлечения характеристик q/g -струй.

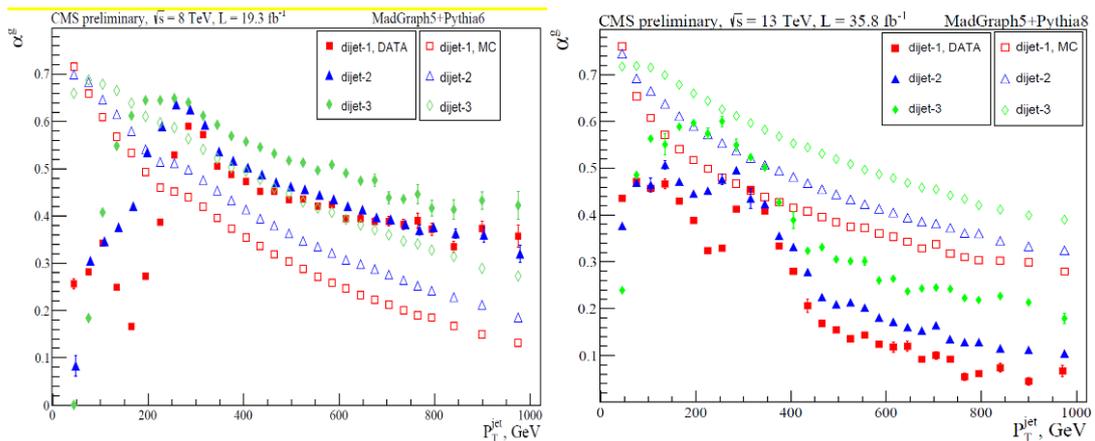


Рис. 7.12. Измеренные доли g -струй в выборках, отобранных в канале “dijet”: слева - для данных CMS Run-I (2012), справа - для данных CMS Run-II(2016). Измерения выполнены с использованием кварк-глюонного “likelihood” (QGL) дискриминатора и для QGL-распределений q/g -струй, полученных в модели MADGRAPH5+PYTHIA6 (Run-I) и MADGRAPH5+PYTHIA8 (Run-II).

6.2. Развитие сценария обработки и анализа экспериментальных данных на основе Grid-технологий

Обработка, анализ и хранение данных в эксперименте CMS возлагаются на распределенные вычислительные центры, объединенные в многоуровневую грид-инфраструктуру [10-14]. В настоящее время модель компьютеринга CMS включает в себя центр уровня Tier-0 в ЦЕРН, семь центров уровня Tier-1, расположенных в крупнейших мировых компьютерных центрах и связанных высокоскоростной сетью, и множество центров уровня Tier-2 и Tier-3, созданных в различных научных организациях.

Один из центров уровня Tier-1 был спроектирован и создан в ОИЯИ, что диктуется активной позицией ОИЯИ, ряда ведущих научных центров России, бывших советских республик и некоторых других стран-участниц ОИЯИ в этом эксперименте.

В отчетный период активно продолжалась разработка и использование компьютерной инфраструктуры, соответствующей физическим задачам ОИЯИ в CMS и основанной на грид-технологиях. Сотрудники ОИЯИ принимали активное участие в поддержке, эксплуатации и создании программного обеспечения для мониторинга ресурсов центров уровня Tier-2, а также в разработке, создании и запуске вычислительного центра CMS уровня Tier-1 в ОИЯИ.

Были проведены ряд глобальных тестов узлов вычислительной системы CMS, включая все этапы обработки и анализа данных в цепочке вычислительных узлов CMS: Tier-0/Tier-1/Tier-2. Их целью являлась проверка готовности CMS к приему, обработке и анализу экспериментальных данных. ОИЯИ приняла участие в этом тесте согласно своей ответственности за поддержание двух групповых пространств CMS для физического анализа и реконструкции – физического анализа CMS Exotica и реконструкции физических объектов CMS Muon.

В 2013–2020 гг. компьютерные фермы ОИЯИ уровня Tier-1 и Tier-2 были активно вовлечены в обработку и анализ данных. ОИЯИ связан линиями передачи данных со всеми Tier-0/Tier-1/Tier-2 в ЦЕРН, Германия, Франция и т.д. Эксплуатация Tier-2 ОИЯИ в режиме набора данных CMS по набору данных показала его высокую надежность и работоспособность..

Кроме того, в модель компьютеринга входят центры CMS по набору, контролю и быстрой обработке данных, размещенных как непосредственно в ЦЕРН, так и в некоторых удаленных региональных центрах, один из которых расположен в ОИЯИ.

6.3. Подготовка к проведению физических исследований для работы в условиях высокой светимости HL-LHC

Участие группы ОИЯИ в развитии физической программы CMS [15] было сосредоточено на подготовке разработке программы физических исследований различных процессов рождения пар мюонов для проверки предсказаний стандартной модели (СМ) и поиска новой физики за ее пределами на статистике, соответствующей интегральной светимости до 3000 фбн⁻¹.

Изучение закономерностей рождения лептонных пар в процессе Дрелл-Яна имеет исключительную важность для физики адронных коллайдеров. Измерение сечения процесса Дрелла-Яна на LHC представляет собой важнейший тест стандартной модели взаимодействия элементарных частиц (СМ) в новой области энергий. Процесс Дрелла-Яна также является основным источником фона при проведении поисков «новой» физики за пределами стандартной модели, которые возможны при условии надежного определения экспериментальных и теоретических погрешностей.

Основные теоретических погрешности в вычислениях процесса Дрелла-Яна, особенно в области больших инвариантных масс, связаны с неопределенностями в кварковых и глюонных функциях распределения (т.е. с использованием различных набор структурных функций), неопределенностями выбора шкалы факторизации КХД и бегущей константы связи КХД α_s . В 2014–2016 гг. были выполнены [16,17] соответствующие оценки этих погрешностей в области инвариантных масс пар мюонов вплоть до 5 ТэВ/с².

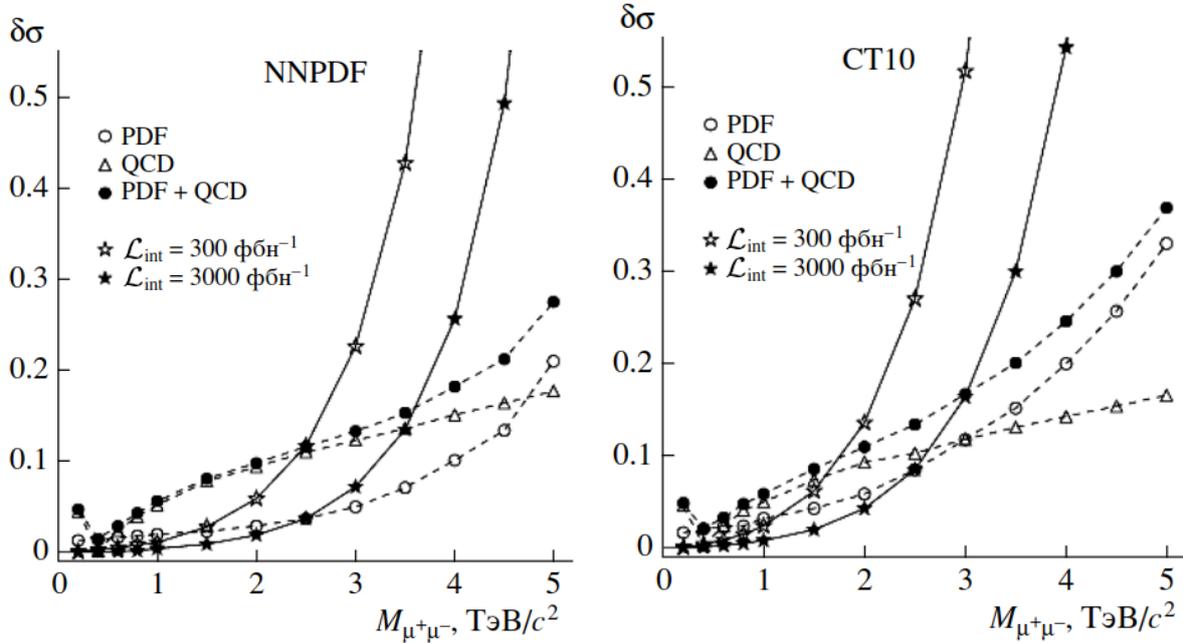


Рис. 7.13. Значения неопределенностей (PDF, QCD, комбинированная) как функция $M_{\mu^+\mu^-}$ для набора PDF (слева) NNPDF2.3 и (справа) CT10nlo. Приведены статистические погрешности, соответствующие значениям интегральной светимости 300 фбн⁻¹ и 3000 фбн⁻¹ [16, 17].

Теоретические погрешности вычисления сечений процесса Дрелла-Яна в области инвариантных масс 0,2–6 ТэВ систематизированы на рис.7.13. На этом рисунке представлены неопределенности вычисления сечений процесса Дрелла-Яна, связанные с PDF, шкалой КХД и их комбинированные значения с учетом неопределенности α_s . Кроме того приведены статистические погрешности, ожидаемые при значениях интегральной светимости (\mathcal{L}_{int}) 300 фбн⁻¹ и 3000 фбн⁻¹, соответствующие началу и концу набора данных после модернизации Фазы 2. Учитывались вклады NLO теории возмущений (множитель $K=1.15$), эффективность пространственного обрезания установки (аксептанса) в диапазоне значений псевдобыстрот $|\eta| \leq 2,4$ и обрезание по поперечному импульсу мюонов $p_T \geq 20$ ГэВ/с. В области инвариантных масс $\sim 2,5$ ТэВ/с² для всех наборов PDF доминируют погрешности PDF, свыше — неопределенности шкалы факторизации и ренормировки КХД. При $\mathcal{L}_{int} = 300$ фбн⁻¹ погрешности расчетов сечений в рамках стандартной модели превышают потенциальную точность измерения этих сечений в областях значений инвариантных масс до 1,8 ТэВ/с² и 2,5 ТэВ/с² для наборов CT10nlo и NNPDF2.3 (MSTW2008nlo), соответственно. В области больших значений инвариантных масс ситуация меняется — точная проверка предсказаний СМ становится невозможной. С увеличением значения интегральной светимости \mathcal{L}_{int} до 3000 фбн⁻¹ эта область соответственно расширяется до 3,0 ТэВ/с² и 3,5 ТэВ/с².

Другие существенные теоретические погрешности вытекают из недоучета вкладов от диаграмм высших порядков теории возмущений. Для подготовки программы физических исследований при высокой светимости был разработан новый метод (т.н. W-метод, от

"whole" - цельный, без разделения) учета радиационных событий в экспериментах с инклюзивной постановкой, который принципиально не использует разделения на области мягких и жестких фотонов (глюонов) [18,19,20]. С помощью W-метода рассчитаны однопетлевые электрослабые и КХД радиационные поправки в процессе Дрелла-Яна при сверхвысоких энергиях и инвариантных массах лептонной пары. Произведен рефакторинг программы READY, оптимизированы процедура интегрирования и реализация кинематических условий и ограничений. С помощью READY сделан подробный численный анализ эффектов радиационных поправок к наблюдаемым сечениям и асимметрии вперед-назад для эксперимента CMS в режиме Run3/HL Большого адронного коллайдера.

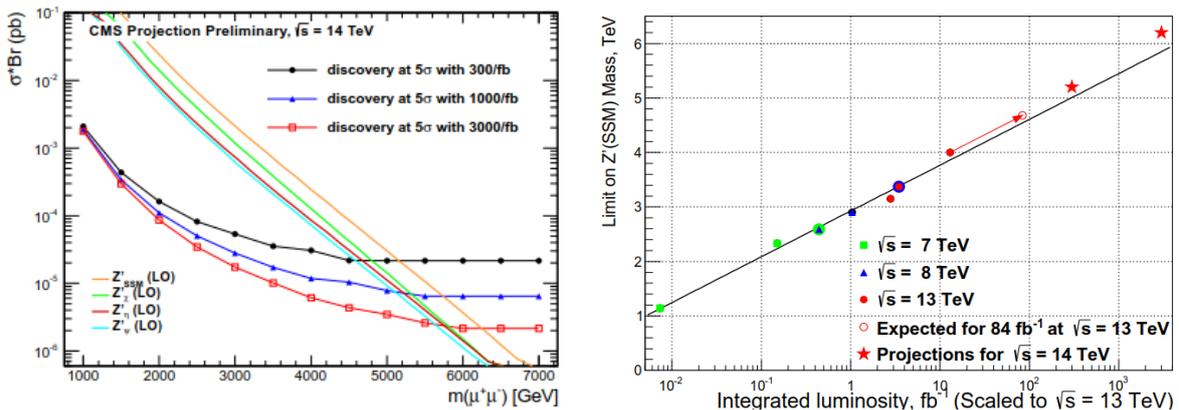


Рис. 7.14. (слева) Ожидаемые верхние пределы на сечения рождения новых резонансов с учетом вероятности их распада пару мюонов для различных значений интегральной светимости. Также приведены предсказываемые различными расширенными калибровочными моделями с учетом вероятности распада на два мюона [21]. (справа) Массовый предел для нового калибровочного бозона Z' как функция интегральной светимости.

Обновленные алгоритмы реконструкции мюонов и вычисленные систематические погрешности были использованы для предсказаний наблюдаемости новых физических явлений во время планируемых сеансов LHC при высокой светимости. Так, например, для нового нейтрального бозона Z' расширенного калибровочного сектора были установлены ожидаемые массовые пределы (рис. 7.14, левый), которые для 300 фбн $^{-1}$ составили от 4,6 ТэВ/ c^2 до 5,2 ТэВ/ c^2 , для 3000 фбн $^{-1}$ – от 5,6 ТэВ/ c^2 до 6,2 ТэВ/ c^2 в зависимости от модели Z' [21]. Интересно отметить, что эти предсказания совпадают с оценками, полученными путем экстраполяции зависимости уже полученных в 2010–2017 гг. экспериментальных пределов от интегральной светимости в область больших значений L_{int} (рис. 7.14, правый) [22].

6.4. Публикации

1. I.Golutvin, V.Karjavin, V.Palichik, N.Voytishin, A.Zarubin, "The new segment building algorithm for the cathode strip chambers in the CMS experiment", CMS CR-2015/146, in the Proceedings of the Mathematical Modeling and Computational Physics, 2015 (MMCP2015), EPJ Web Conf. **108**, 02023 (2016).
2. V. Palichik, N. Voytishin, "New CSC segment builder algorithm with Monte-Carlo TeV muons in CMS experiment", ЭЧАЯ **48** №5 (2017) 786-788.
3. G. Abbiendi et al. (CMS Z' Working Group), "Search Strategy for High-Mass Resonances Decaying to Muon Pairs at 13 TeV in Preparation of the Run2", CMS AN-2015/061.

4. V. Khachatryan et al. (CMS Collaboration), "Search for high-mass resonances in dilepton final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV", JHEP 1806 (2018) 120, arXiv:1803.06292; CMS Collaboration, "Search for a narrow resonance in high-mass dilepton final states in proton-proton collisions using 140 fb⁻¹ of data at $\sqrt{s}=13$ TeV", CMS-PAS-EXO-19-019, 2019. V. Khachatryan et al. (CMS Collab.), "Search for high-mass resonances in dilepton final states (full 2016 dataset)", CMS-EXO-16-047; G. Abbiendi et al. (CMS Z' Working Group), "Search for High-Mass Resonances Decaying to Muon Pairs in pp Collisions at 13 TeV with the full 2016 data set of 37 fb and combination with 2015 result", AN-2016/391.
5. V. Khachatryan et al. (CMS Collaboration), "Performance of the reconstruction and identification of high-momentum muons in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV", CMS-MUO-17-001, CERN-EP-2019-238, arXiv:1912.03516, JINST 15 (2020) 02, P02027.
6. CMS Collaboration, "Muon Tracking Efficiency for 2018 dataset using Tag and Probe method", CMS-DP-2020-013; CERN-CMS-DP-2020-013. - Geneva : CERN, 2019.
7. CMS Collaboration, "The Phase-2 Upgrade of the CMS endcap calorimeter", CMS-TDR-17-007, ISBN 978-92-9083-459-5.
8. S. Shulha, D. Budkouski, "Methodology for measuring gluon jet fraction and characteristics of quark and gluon jets for hadron-hadron collisions", arXiv:2008.02054 (submitted to PEPAN).
9. CMS Collaboration, "Measurement of gluon jet fraction and data-driven correction of quark and gluon jets likelihood discriminator distributions for jets selected in pp-collisions at 8 TeV and 13 TeV with the CMS detector", CMS AN-2020/143; (CMS SMP-HAD Working Group); August 2020.
10. А.О. Голунов, Н.В. Горбунов, А.В. Зарубин, В.В. Кореньков, С.В. Шматов, "Удаленные центры мониторинга эксперимента CMS", Ядерная физика и инжиниринг, **5** №11, 939-943 (2014).
11. Н.С. Астахов и др., "Статус и перспективы вычислительного центра ОИЯИ 1-го уровня (TIER-1) для эксперимента CMS на большом адронном коллайдере", Компьютерные исследование и моделирование, **7** №3, 455-462 (2015).
12. A. Berezhnaya et al., "LHC Grid Computing in Russia: present and future", J. Phys.: Conf. Ser. **513**, 062041 (2014).
13. N.S. Astakhov et al., "JINR TIER-1 Centre for the CMS Experiment at LHC", Письма в ЭЧАЯ **13** №5, 1103-1107 (2016).
14. V. Gavrilov et al., "Status of RDMS CMS Computing", Письма в ЭЧАЯ **13** №5, 1108-1111 (2016).
15. И.А. Голутвин, С.В. Шматов, "Эксперимент CMS: результаты и перспективы", ЭЧАЯ **48** №5 (2017) 604-616.
16. В.Ф. Конопляников, М.В. Савина, С.В. Шматов, С.Г. Шульга, "Неопределенности сечения рождения процессов Дрелла-Яна при столкновении протонов на LHC", Письма в ЭЧАЯ **11** №6, 1122-1133 (2014).
17. М.Г. Гавриленко, В.Ф. Конопляников, М.В. Савина, С.Г. Шульга, "Сечения процесса Дрелла-Яна в столкновении протонов на LHC", ЯФ **79** №1, 50-54 (2016).
18. В.А. Зыкунов, "Эффекты радиационных поправок в современных экспериментах физики высоких энергий", 2-2016-27, Дубна (2016).

19. V.A. Zykunov, "New method for taking into account radiative events in the MOLLER inclusive experiment", *ЯФ* **80** №4 (2017) 388-395.
20. В.А. Зыкунов, Пертурбативные расчёты в физике высоких энергий, Гомель: ГГУ им. Ф.Скорины, 2020. - 277 с. ISBN 978-985-577-625-4
21. V. Khachatryan et al. (CMS Collab.), "Projected Performance of an Upgraded CMS Detector at the LHC and HL-LHC: Contribution to the Snowmass Process", CMS-NOTE-13-002, arXiv:1307.7135.
22. A. Lanyov, "CMS Results on Dimuon Physics", CMS CR-2016/278.

7. ПУБЛИКАЦИИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Всего по проекту модернизации физики ОИЯИ внесли определяющий вклад в подготовку 46 работ, опубликованных в 26 рецензируемых журналах, 16 нот и 3 технических проектов (TDR) коллаборации CMS и 1 монографии.

В течение отчетного периода сотрудниками ОИЯИ было сделано более 50 выступлений на международных научных форумах.

8. ПЛАН-ГРАФИК РАБОТ

Задачи	2012	2013	2014	2015	2016-2017	2018-2020	2021-2022
1 Техническое обслуживание детектора CMS							
2 Проведение модернизации установки							
остановка LHC (20 месяцев)							
остановка LHC (36 месяцев)							
3 Запуск установки и проведение первого сеанса по набору данных после модернизации							
4 Обеспечение набора данных и участие в сменах							
При энергии пучков в сц.м. 4 ТэВ (ожидаемая статистика 20 фбн ⁻¹)							
При энергии пучков в сц.м. 13 ТэВ (ожидаемая статистика 100 фбн ⁻¹)							
При энергии пучков в сц.м. 13 ТэВ (ожидаемая статистика 300 фбн ⁻¹)							
5 Обработка данных, калибровка HE физическими процессами, изучение характеристик триггера для регистрации и идентификации мюонов и мюонных пар, пространственное выравнивание трековых систем, изучение характеристик HE и ME1/1 на данных							
6 Развитие алгоритмов реконструкции мюонов, коррекция и развитие методов реконструкции струй и калибровки калориметрии физическими процессами, обработка и анализ данных							
7 Участие в развитии программного обеспечения распределенной системы на основе GRID-технологий для обработки и анализа. Управление потоками передачи данных ЦЕРН - ОИЯИ.							
8 Подготовка к модернизации установки и проведению физических исследований для работы в условиях высокой светимости (ожидаемая интегральная светимость до 3000 фбн ⁻¹)							