

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Б.П.
КОНСТАНТИНОВА»

(ФГБУ «ПИАФ»)

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

Международное научно-техническое сотрудничество
по программе эксперимент БАК-би
на Большом адронном коллайдере ЦЕРН

ПЕРИОД С 01.01.2021 ПО 31.12.2021

Руководитель работ:
Член корр. РАН,
доктор физ.-мат. наук

А.А. Воробьев



подпись, дата

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работ:
Член корр. РАН,
доктор физ.-мат. наук



А.А. Воробьёв

подпись, дата

Основные исполнители работ:

Старший научный сотрудник



О.Е. Маев

подпись, дата

Старший научный сотрудник



Н.Ф. Бондарь

подпись, дата

Ведущий инженер



Н.Р. Сагидова

подпись, дата

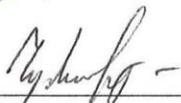
Старший научный сотрудник
канд. физ.-мат. наук.



А.А. Дзюба

подпись, дата

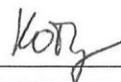
Старший лаборант,
Аспирант



А.Д. Чубыкин

подпись, дата

Стажёр-исследователь



С.Н. Котряхова

подпись, дата

Старший научный сотрудник
канд. физ.-мат. наук.



Д.С. Ильин

подпись, дата

Старший лаборант,
Аспирант



В. В. Чуликов

подпись, дата

РЕФЕРАТ

Тема отчета: Международное научно-техническое сотрудничество по программе «Эксперимент БАК-би на большом адронном коллайдере ЦЕРН».

Отчёт: 36 страниц, 32 рисунка и 1 таблицу

Ключевые слова: СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, ЛЕПТОН, АДРОН, МАССА, МЮОН, ПРОТОН, ГИПЕРОН, КВАРК, УСКОРИТЕЛЬ, МЮОННАЯ СИСТЕМА, МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО, АНАЛИЗ, КОЛЛАЙДЕР.

Группа ПИЯФ, вместе с итальянскими институтами, несёт ответственность за функционирование Мюонной Системы детектора LHCb, в разработку и создание которой ПИЯФ внес определяющий вклад. В декабре 2018 года все ускорительные установки коллайдера и эксперименты LHC вошли в режим запланированной длительной остановки LS2, предназначенной для масштабной модернизации, как систем ускорителя, так и экспериментов, с целью выйти на новый уровень светимости L . Для детектора LHCb, задачей данной модернизации является увеличение загрузки детектора в 5 раз, то есть выход на средний показатель видимых столкновений, μ с 1.1 до ~ 5 или в терминах мгновенной светимости с $\sim 4 \cdot 10^{32} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ до $\sim 2 \cdot 10^{33} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Для достижения этих параметров коллаборация осуществляет полную замену большинства субдетекторов, триггерных систем и систем сбора данных, за исключением Мюонного трекера и калориметров, где заменяется полностью или частично только считывающая электроника и системы сбора данных эксперимента новыми, с целью увеличения скорости сбора данных с 1.1 МГц до 30-40 МГц.

ПИЯФ активно участвует в этой программе, которая включает изготовление запасных мюонных камер для нескольких регионов Мюонной Системы, установка и ввод в эксплуатацию новой электроники, а также, разработку и изготовление новых мюонных камер высокой гранулярности для внутренних регионов станций M2 и M3 Мюонной Системы.

В рамках данной программы в ПИЯФ уже были произведены и доставлены в ЦЕРН запасные камеры для регионов M2R3, M2R4, M3R3 и M4R2, а также изготовлены и успешно прошли испытания прототипы новых камер высокой гранулярности для регионов M2R1 и M2R2.

В 2021 году группа ПИЯФ продолжала работу по анализу экспериментальных данных. Полученные результаты уже опубликованы или готовятся к публикации.

Содержание

Реферат.....	3
Определения.....	5
Обозначения и сокращения	6
Введение.....	7
1. Работы, выполненные в Мюонном детекторе в 2021 году	7
1.1. <i>Общее состояние детектора и основные задачи</i>	7
1.1.1. <i>Основные параметры Мюонного детектора до и после модернизации.</i>	7
1.2. <i>Обеспечение стабильности газового усиления в пропорциональных камерах.</i>	9
1.2.1. <i>Контроль над газовым усилением в системе. Устранение темновых токов в камерах, вызванных Мальтер эффектом.</i>	9
1.2.2. <i>Работы над системой подачи высокого напряжения, произведённой в ПИЯФ.....</i>	11
1.2.3. <i>Работы над системой контроля качества газовой смеси.</i>	12
1.3. <i>Устранение неполадок в прикамерной электроники.....</i>	14
1.4. <i>Ревизия и производство запасных мюонных камер.....</i>	14
2. Модернизация мюонной системы Эксперимента LHCb	15
2.1 <i>Замена и ввод в эксплуатацию новой электроники детектора.....</i>	15
2.1.1 <i>Модернизация контрольной системы.....</i>	15
2.1.2 <i>Установка и ввод в эксплуатацию новых модулей в детектор.</i>	18
2.1.3 <i>Модернизация системы управления экспериментом для контрольной электроники.....</i>	19
2.2 <i>Модернизация камер внутренних регионов станций M2 и M3.....</i>	20
2.2.1 <i>Испытания прототипов M2R1 и M2R2.....</i>	20
2.2.2 <i>Работы по подготовке инфраструктуры для новых камер в детекторе.</i>	22
2.3 <i>Экранировка мюонных станций M2 и M3.</i>	25
2.3.1. <i>Изучение возможностей подавления фона от тепловых нейтронов.....</i>	26
2.4 <i>Модернизация программного обеспечения Мюонного детектора.</i>	30
3. Участие группы ПИЯФ в обработке и анализе данных в 2021 году.	31
Заключение	33
Коллаборационные доклады группы ПИЯФ в 2020 году	33
Ссылки	35

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Стандартная модель – теория в физике элементарных частиц, описывающая электромагнитные, слабые и сильные взаимодействия элементарных частиц

Адрон – элементарная частица, состоящая из кварков, которая может участвовать в сильных взаимодействиях.

Кварк – фундаментальная частица стандартной модели, входящая в состав адронов

Коллайдер (collider) – ускоритель с использованием встречных пучков.

Лептон - элементарная частица, участвующая в электрослабых взаимодействиях.

Мюон – элементарная частица, один из видов лептонов

Мезон - элементарная частица, состоящая из кварка и антикварка

Барион - элементарная частица, состоящая из трёх кварков

Гиперон – барион, содержащий как минимум один s-кварк, но не содержащий с- и b-кварков

Сечение процесса – величина, характеризующая вероятность прохождения того или иного процесса (взаимодействия, реакции, рассеяния и т.п.) в физике элементарных частиц

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- БАК – Большой адронный коллайдер (Large hadron collider - LHC)
- ПНПФ – Петербургский Институт Ядерной Физики (PNPI – Petersburg Nuclear Physics Institute)
- ЦЕРН – Европейский центр ядерных исследований (CERN), Швейцария
- LHC (Large Hadron Collider) – Большой Адронный Коллайдер (БАК)
- СМ – Стандартная модель элементарных частиц и их взаимодействий
- LHCb - Large Hadron Collider beauty (bottom) (Большой Адронный Коллайдер би)
- LHCb UPGRADE – Программа модернизации LHCb детектора
- HV system – High Voltage system (система высоковольтного питания)
- LV system – Low Voltage system (система низковольтного питания)
- МС – Monte-Carlo method (метод Монте-Карло)
- RUN1 – период работы LHC в 2010-2012 годах
- RUN2 – период работы LHC в 2015-2018 годах
- RUN3 – период работы LHC в 2022-2024 годах
- ТэВ – Тера-электронвольт
- M1, M2 ... M5 – мюонные станции детектора LHCb
- MWPC – Multi Wire Proportional Chamber (многопроволочная пропорциональная камера)
- GEM – Gas Electron Multiplier (газовый электронный умножитель)
- WINCC OA – пакет программного обеспечения для контроля и управления детектором
- ECS - experiment control system (система управления детектором)
- DAQ – Data Acquisition (система сбора данных)
- LS1 – Long Shutdown 1 (длительная остановка коллайдера LHC в период 2013-2014 годов)
- LS2 – Long Shutdown 2 (длительная остановка коллайдера LHC в период 2019-2022 годов)
- WS – Winter Stop (длинная остановка на зимний перерыв, начинающаяся перед Рождественскими каникулами)

ВВЕДЕНИЕ

В 2021 году, несмотря на серьёзные карантинные меры и ограничения, обусловленные эпидемией, вызванной вирусом COVID-19, LHCb продолжал работы по модернизации экспериментальной установки и систем сбора данных, с целью выхода на новый уровень скорости набора статистики с 1.1 МГц до 30-40 МГц и увеличения рабочей загрузки детектора примерно в 5 раз.

Продолжалась интенсивная работа по анализу экспериментальных данных набранных за весь период эксплуатации детектора (RUN1+RUN2) превышающих объём в 9.2 fb^{-1} данных. По имеющимся результатам уже опубликовано (или направлено в печать) 600 статей в ведущих научных журналах.

Началась активная работа по разработке нового Мюонного трекера для следующей модернизации, планируемой после 2030 года, где светимость будет увеличена ещё в 10 раз или в 50 раз от той, что была в период RUN1 и RUN2.

1. РАБОТЫ, ВЫПОЛНЕННЫЕ В МЮОННОМ ДЕТЕКТОРЕ В 2021 ГОДУ

1.1. Общее состояние детектора и основные задачи

Для того чтобы удерживать высокую (~99%) эффективность регистрации детектора, мюонной группе приходится систематически работать над несколькими проблемами и задачами, связанными как с пропорциональными камерами, так и со считывающей электроникой. Для сохранения столь же высокого показателя с началом работы детектора в 2022-м году мюонная группа выполнила огромный объём работ по установке в детектор и вводу в эксплуатацию новой электроники в системе контроля и сбора данных, а также по подготовке к замене части пропорциональных камер новыми, более высокой гранулярности, и устранению выявленных неполадок в существующей системе. Фактически, модернизировались все системы контроля и управления детектором. Ограничения, связанные с эпидемией, вынудили большинство сотрудников эвакуироваться из ЦЕРНа в начале 2020-года, что сильно затормозило выполнение большинства планируемых работ. Тем не менее, удалось не останавливать большинство работ полностью, организовав удалённую работу экспертов при технической поддержке сотрудников, имеющих непосредственный доступ к детектору и лабораториям в ЦЕРНе. В текущем году, большинство экспертов вернулись к активной работе детектором, что, учитывая продление LS2, позволило выполнить почти все намеченные задачи.

1.1.1. Основные параметры Мюонного детектора до и после модернизации.

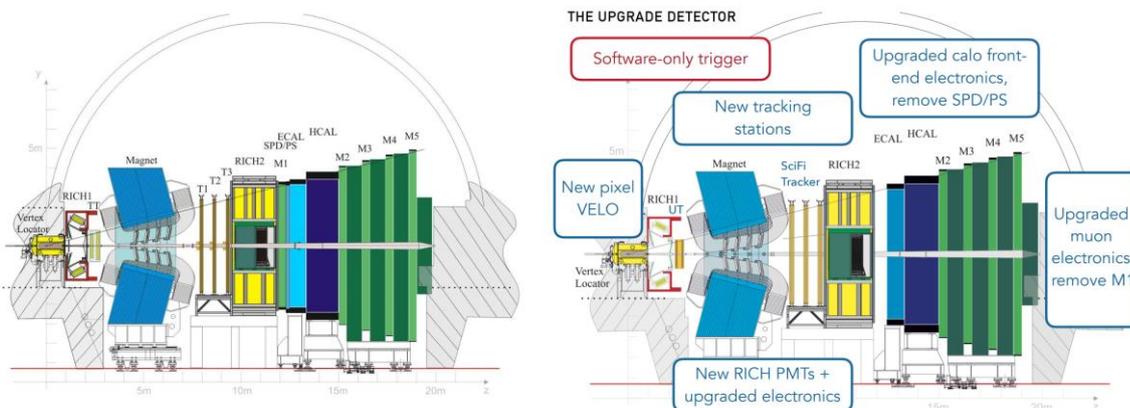


Рисунок 1. Детектор LHCb. Упрощённая схема. Слева в период RUN1 и RUN2. Справа после модернизации. В обоих случаях показан вид сбоку, в разрезе в плоскости оси пучка, проходящий сквозь детектор посередине. Светло-зелёным цветом обозначены мюонные станции.

Мюонный детектор [1, 2] состоял из пяти станций. Первая - M1 была расположена перед системой калориметров, остальные - M2-M5 после них, см. Рисунок 1. Станция M1 уже удалена из детектора, поскольку с увеличением светимости она была бы перегружена событиями и её использование теряло практический смысл. Каждая станция в M2-M5 разделена фильтрами из железа. Станции M2-M5 состоят из 1104 MWPCs с четырьмя газовыми промежутками в каждой.

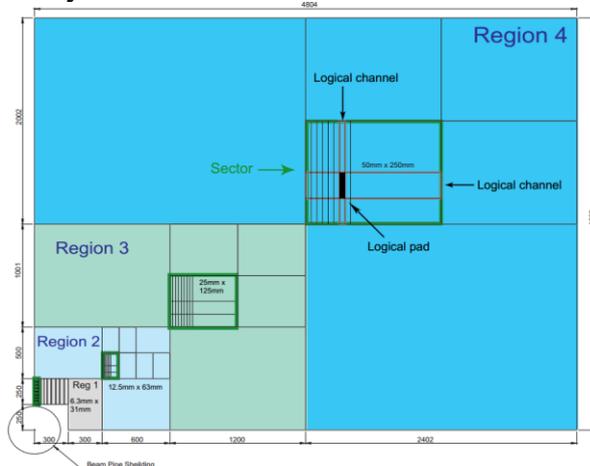


Рисунок 2. Квадрант Мюонной станции, на данном рисунке станция M2. Пучковая труба проходит в левом нижнем углу. Показаны четыре региона, а также логические каналы и пады. Зелёными прямоугольниками выделены триггерные сектора.

Каждая станция разделена на 4 региона (R1-R4), в порядке удалённости от оси пучка, см. Рисунок 2. В каждом регионе каждой станции, установлены различные типы камер, отличающиеся структурой падов и типом съёма сигнала. В то же время, все пропорциональные камеры детектора устроены по принципу, где проволочная (золочёный вольфрам, 30 мкм) анодная плоскость расположена по центру между двумя катодными плоскостями, разделёнными 5мм газовым промежутком. Расстояние между анодными проволочками - 2мм. Всего, в Мюонном детекторе осталось 4416 газовых промежутка в 1104 MWPC. Камеры постоянно продуваются смесью $Ar(40\%)/CO_2(55\%)/CF_4(5\%)$, (с 2016 года - $Ar(38\%)/CO_2(57\%)/CF_4(5\%)$ для того чтобы немного понизить газовое усиление, которое выросло из-за проблем с газовой смесью). Диапазон высокого напряжения в различных типах камер от 2530 до 2630 вольт, что обеспечивает газовое усиление $46-86 \cdot 10^3$, см Рис.3.

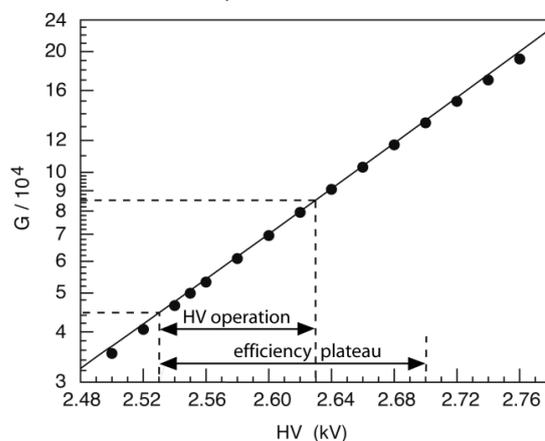


Рисунок 3. Газовое усиление в Мюонных камерах в зависимости от высокого напряжения. Пунктирными линиями обозначен диапазон напряжений, приложенных к камерам в период RUN1 и RUN2, а также плато эффективности.

1.2. Обеспечение стабильности газового усиления в пропорциональных камерах.

1.2.1. Контроль над газовым усилением в системе. Устранение темновых токов в камерах, вызванных Мальтер эффектом.

Одной из проблем, с которыми мюонный детектор столкнулся с момента ввода в эксплуатацию в 2010 году, были темновые токи, возникающие в пропорциональных камерах при возрастающей интенсивности сталкивающихся пучков. Токи достигали допустимых пороговых значений и камеры выключались, приводя к некоторым потерям в эффективности детектора. Одной из причин возникновения этих токов являлось остаточное загрязнение, не полностью устранённое при тренировке камер на конечной стадии производства. Облучение частицами от сталкивающихся пучков усиливало и провоцировало этот эффект.

Несмотря на то, что проблемные камеры немедленно начинали тренировать, число камер в которых проявлялся этот эффект увеличивалось, и к концу набора статистики в RUN2, в 2018 году, Мальтер эффект был замечен в ~19% мюонных камер, см. Таблица 1.

	max av. Lumi ~1.7x10 ³²		3.8x10 ³²		4. x 10 ³²		3.4x 10 ³²		3.7 x 10 ³²		3.5x 10 ³²		4.4x 10 ³²		total	
	% Gaps	% CMBs	% Gaps	% CMBs	% Gaps	% CMBs	% Gaps	% CMBs	% Gaps	% CMBs	% Gaps	% CMBs	% Gaps	% CMBs	% Gaps	% CMBs
1 M1R2	10.4	16.7	0.0	0.0	2.1	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.4	16.7
2 M1R3	8.3	10.4	3.1	6.3	4.2	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2.1	0.0	0.0	12.5	18.8
3 M1R4	1.3	2.6	3.1	5.2	1.3	2.1	0.5	1.0	0.3	0.5	0.3	0.5	0.0	0.0	3.9	6.8
4 M2R1	0.0	0.0	2.1	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	16.7
5 M2R2	1.0	4.2	1.0	4.2	1.0	4.2	2.1	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	16.7
6 M2R3	3.6	12.5	0.0	0.0	1.0	4.2	0.5	2.1	1.6	6.3	0.5	2.1	0.5	2.1	7.8	14.6
7 M2R4	1.2	3.6	3.4	9.4	2.6	8.3	0.5	2.1	2.7	10.4	0.3	1.0	0.4	1.6	7.0	18.8
8 M3R1	0.0	0.0	2.1	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	8.3
9 M3R2	0.0	0.0	1.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	8.3
10 M3R3	1.0	4.2	1.6	6.3	2.1	8.3	0.0	0.0	3.1	12.5	4.2	12.5	3.6	8.3	8.9	22.9
11 M3R4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	0.4	1.6	0.1	0.5	0.0	0.0	0.7	2.6
12 M4R1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	8.3
13 M4R2	8.3	29.2	1.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	10.4	33.3
14 M4R3	5.7	22.9	3.6	12.5	4.2	14.6	1.6	6.3	5.2	18.8	1.0	4.2	2.1	8.3	11.5	33.3
15 M4R4	0.0	0.0	1.0	3.6	2.5	7.8	0.1	0.5	3.1	11.5	1.0	3.6	2.3	8.9	7.2	22.4
16 M5R1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17 M5R2	12.5	25.0	3.1	8.3	2.1	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.5	25.0
18 M5R3	2.1	8.3	8.3	31.3	20.3	60.4	1.6	6.3	24.0	60.4	8.9	31.3	11.5	39.6	33.3	72.9
19 M5R4	2.3	6.8	4.2	11.5	3.9	12.5	1.2	4.2	4.2	14.6	1.2	3.6	0.5	2.1	10.2	25.5
total:	1.8	5.2	2.3	6.7	2.8	8.0	0.5	1.8	3.0	9.1	1.0	3.1	1.2	3.8	7.6	18.9

CMBs: 0% (green), 0-5% (yellow), 5-10% (orange), >10% (red)

Таблица 1. Статистика по газовым промежуткам и камерам, подверженным Мальтер эффекту в каждом из регионов мюонной системы за семь лет работы ЛНСб на пучке. В верхней строчке указана максимальная рабочая светимость для каждого года. В столбцах справа – общая статистика за все семь лет.

Данный рост числа камер, в которых появлялись темновые токи с увеличением светимости, в коллайдере объясняется проявлением хорошо известного Мальтер эффекта, которому весьма часто подвержены пропорциональные камеры, долго находящиеся под облучением. Суть данного эффекта состоит в появлении самоподдерживающегося коронного разряда, обусловленного эмиссией электронов с катодной плоскости пропорциональной камеры. Этот процесс возникает в случае образования тонких диэлектрических плёнок на катодах, что вызывает появление избыточного положительного заряда на плёнке, см. Рисунок 4. Процесс запускается под облучением ионизирующими частицами или в результате пробоя в газовом промежутке, когда напряженность электрического поля объёмного заряда ионов достигает величины необходимой для возникновения эмиссии электронов, когда скорость нарастания объёмного заряда становится больше скорости рассасывания ионов. Этот дисбаланс может возникать в основном из-за увеличения газового усиления или увеличения потока ионизирующих частиц, а также из-за роста величины сопротивления поверхностной плёнки на катоде. Образование плёнки на катодах может происходить самыми разными путями, от окисления меди, до полимеризации под облучением и с течением времени различных органических загрязнений, вплоть до отпечатков пальцев.

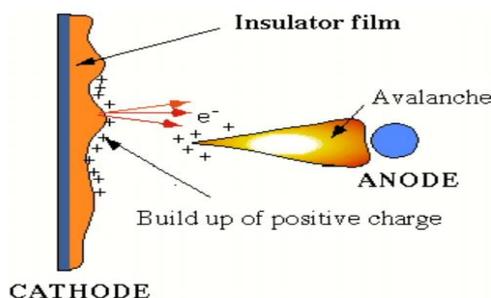


Рисунок 4. Мальтер эффект. Пример эмиссии электронов с катода при появлении избыточного положительного заряда на плёнке индуцированной ионизирующей частицей, прошедшей сквозь газовый объём пропорциональной камеры.

Сотрудниками ПИЯФ была разработана и успешно применялась методика тренировки камер по устранению темновых токов, появление которых обусловлено Мальтер эффектом, непосредственно в процессе набора данных, сохраняя эффективность регистрации на максимальном уровне. Детали проявлений Мальтер эффекта в мюонном детекторе LHCb и основные результаты применения методики его устранения, описаны в недавно опубликованной статье в JINST “Long-term operation of the multi-wire-proportional-chambers of the LHCb muon system” [3].

В текущем году все программное обеспечение для тренировки камер, как в лабораторных условиях, так и включённое в систему контроля эксперимента было подвергнуто серьёзной модернизации, связанной, в первую очередь с миграцией операционных систем с WINDOWS на LINUX, переноса проектов на виртуальные машины и очередного апгрейда WINCC OA. Все работы были выполнены сотрудниками ПИЯФ.

В декабре 2019 года, для более детального изучения были открыты две камеры из регионов M3R3 и M5R4 (Рисунок 5, слева), в которых наблюдался Мальтер эффект. Перед этим эффект появления темновых токов под облучением был воспроизведён на установке GIF++ в ЦЕРНе, с целью локализации источников тока в активной области газового промежутка камер. Для этого анализировалось появление избыточных счетов на каналах считывающей электроники коррелированных с появлением темновых токов. После открытия из камер были извлечены образцы катодных поверхностей и проволок и изучены при многократном увеличении на оптическом микроскопе в ЦЕРНе (Рисунок 5, справа).



Рисунок 5. Слева показаны катодные поверхности всех четырёх газовых промежутков открытой камеры M5R4, справа фотографии, полученные при изучении мест локализации Мальтер эффекта на катодах, с помощью оптического микроскопа в ЦЕРНе.

Более детальное изучение образцов планировалось произвести на электронном микроскопе в ЦЕРНе, но из-за карантина эта работа была отложена до лучших времён. Тем не менее, часть образцов была отправлена в Россию, где на атомно-силовой установке в Сарове было выполнено детальное изучение повреждений катодных поверхностей. Результаты данных исследований были опубликованы в ЖТФ [4] в этом году.

1.2.2. Работы над системой подачи высокого напряжения, произведённой в ПИЯФ.

В Мюонном детекторе использовались три типа систем подачи высокого напряжения. Станция М1, которая уже демонтирована в рамках программы модернизации детектора имела высоковольтную систему, обслуживающую камеры GEM. Остальные камеры в М1, а также центральные регионы R1 и R2 всех остальных станций М2-М5, обслуживались системой CAEN SY1527, всего было 1104 канала. Сейчас в системе CAEN осталось только 576 высоковольтных каналов, освободившиеся модули будут использоваться в качестве запасных. Самая большой HV-системой в детекторе остаётся высоковольтная системы, изготовленная в ПИЯФ, 3840 каналов, обеспечивающая высоким напряжением камеры регионов R3 и R4 в станциях М2-М5. Эта система полностью находится на обслуживании группы ПИЯФ, в коллаборации с группой из МГУ, отвечающей за контрольную часть системы, что включает в себя постоянное сервисное обслуживание, мониторинг калибровок и ремонт вышедших из строя элементов системы непосредственно в ЦЕРНе. В текущем году тестовый стенд, предназначенный для этих целей, был существенно модернизирован. В частности, управляющий модуль был заменён на номинальный, такой же, как и для управления в высоковольтной системе детектора, с использованием USB-Ethernet конвертера. Всё программное обеспечение стенда было адаптировано к новому интерфейсу, значительно улучшено и мигрировано на новую операционную систему WINDOWS 10, поскольку старая WINDOWS SERVER 2008, перестала поддерживаться в ЦЕРНе. Стенд был полностью запущен в работу и уже успешно применён для срочного ремонта и калибровки нескольких модулей высоковольтной системы ПИЯФ, необходимых для запуска детектора. Работы по массовой починке вышедших из строя модулей запланированы на следующий год.

Серьёзные работы были проведены в части высоковольтной системы, вынесенной непосредственно из детектора, хотя и расположенные также в шахте (первичные источники напряжения, управляющие модули, компьютеры и тп). Основная цель данной модернизации было полное разделение высоковольтной системы на независимое управление по двум сторонам мюонной системы, и также независимое по сторонам отключение в случае реакции на системы безопасности детектора (утечки воды, дым, повышение температуры, проблемы с газовой смесью). Для этого, была использована дополнительная стойка для электроники, теперь их три, добавлен источник низкого напряжения в систему контроля PNPI HV и модернизирована вся система подачи напряжения в стойках с новым подключением к системе безопасности детектора DSS (Detector Safety System). Окончательная схема расположения данной части системы в трёх стойках представлена на Рисунке 6.

В текущем году продолжались работы по апгрейду программного обеспечения контроля и подачи высокого напряжения на камеры детектора, связанного с переходом систем контроля и управления LHCb в новую инфраструктуру, включающий физический перенос и обновление компьютерных мощностей LHCb из шахты на поверхность в новый центр сбора данных, установки новой версии WINCC OA 3.16, а также миграции к операционной системе Linux, в рамках общей задачи максимального ухода от

программного обеспечения компании Microsoft в управлении детектора LHCb и остальных экспериментальных установок ЦЕРНа, в связи с многократным удорожанием данных продуктов, включая операционную систему WINDOWS. В целом, задачи успешно выполнены, хотя окончательный ввод системы в эксплуатацию и полная проверка работоспособности состоится только в следующем году, когда будет введена в строй общая система контроля LHCb после модернизации.

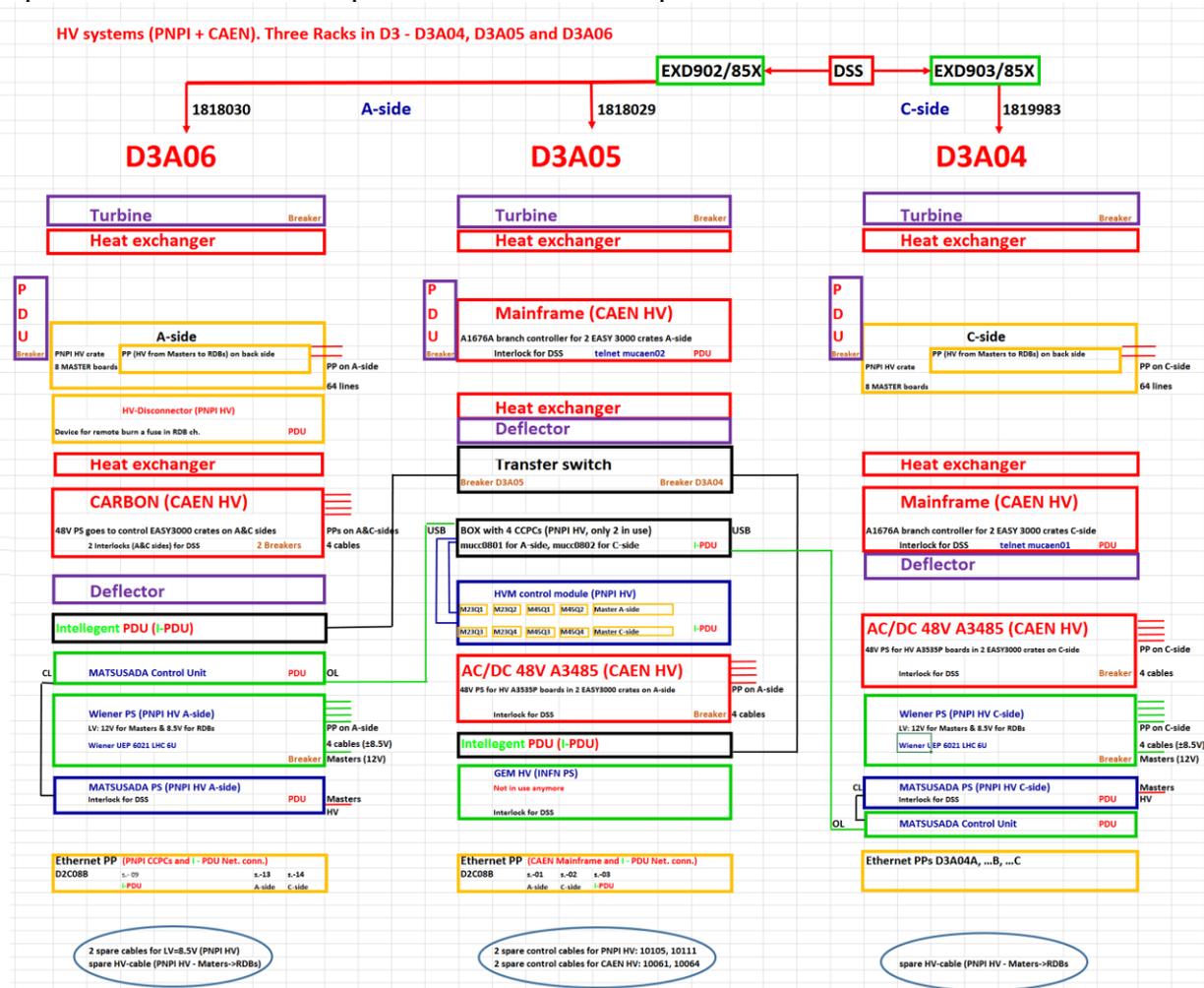


Рисунок 6. Упрощённая схема размещения в стойках для электроники части высоковольтной системы Мюонного детектора вынесенной за пределы непосредственно мюонных станций.

1.2.3. Работы над системой контроля качества газовой смеси.

Поддержание состава газовой смеси в пропорциональных камерах детектора на должном уровне и с высокой точностью является ключевым фактором для обеспечения высокой эффективности регистрации и идентификации частиц мюонной системой эксперимента LHCb. Контроль параметров газовой смеси, в частности, коэффициента газового усиления в мюонном детекторе осуществляется при помощи специальной созданной для этого установки, внедрённой непосредственно в линию подачи газа в детектор, работающей в циркуляционном режиме. Данная установка была разработана в 2016 году, ее фотография представлена на Рисунке 7.

Установка состоит из следующих компонентов:

- две двухззорные MWPC типа M1R2
- одна четырехззорная MWPC типа M2R1
- два источника ионизирующего излучения Sr^{90} и Am^{241}

- 12-ти канальный высоковольтный модуль A1821P, установленный в кейс CAEN SY4527
- программный OPC UA сервер
- программная система управления и мониторинга установки на базе WinCC OA



Рисунок 7. Установка для контроля качества газовой смеси с радиоактивными источниками.

Источник Sr^{90} используется для ионизации газа в объеме двух двухзачорных камер, которые подключены к разным точкам газовой системы детектора MUON, до и после прохождения газовой смесью объема детектора. Источник Am^{241} , соответственно, используется для оценки параметров газовой смеси в четырех-зачорной камере. Контроль температуры, влажности и давления осуществляется при помощи основной системы датчиков ЛНСб. Управление высоковольтным питанием из системы управления и мониторинга осуществляется через промежуточный OPC UA сервер. В ходе модернизации установки была произведена замена устаревшего сервера на программу, работающую по стандарту OPC UA и ориентированную на ОС Linux.

Принципиальная схема установки представлена на Рисунке 8.

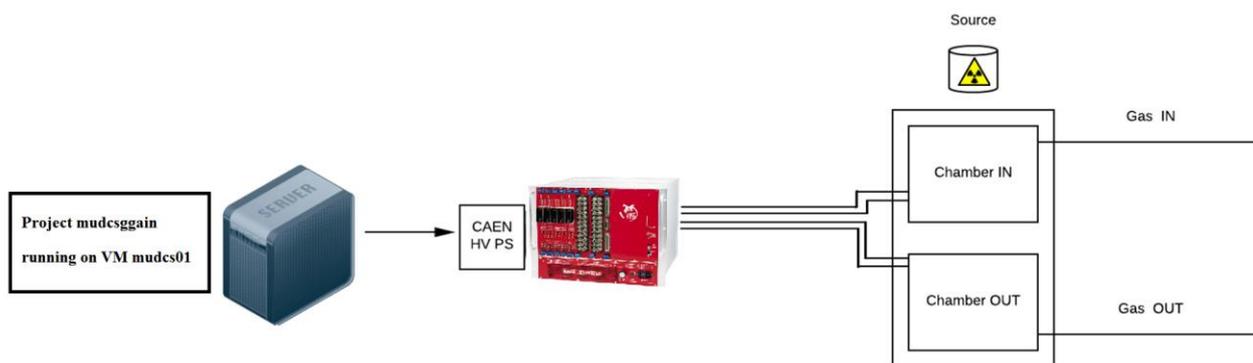


Рисунок 8. Принципиальная схема установки для контроля качества газовой смеси.

Модернизация детектора MUON во многом затронула программное обеспечение установки. Во-первых, в соответствии с политикой CERN, был произведен отказ от программного обеспечения для Windows OS. Как уже сообщалось ранее, это повлекло замену серверной программы для управления высоковольтным питанием. Так же, была обновлена версия программы контроля эксперимента WinCC-OA с версии 3.15 на 3.16.

Новая версия содержит меньше ошибок, но более строга к качеству пользовательского программного кода. При смене версии программного пакета, предыдущий проект контроля установки пришел в негодность, что повлекло его модернизацию. Помимо приведения проекта в работоспособное состояние, выполнена доработка метода коррекции измеряемых токов. Эта работа должна повысить точность сравнения измеряемых токов с их эталонными значениями. Функции предыдущего проекта, такие как сигнализирование об отклонении измеренного и эталонного значений тока, информирование экспертов посредством SMS-сообщения и Email, ведение log-файла и тд. были полностью восстановлены. Также, в значительной степени был переработан пользовательский графический интерфейс.

1.3. Устранение неполадок в прикамерной электронике

Параллельно с модернизацией детектора выполняются стандартные работы по устранению неполадок в работе прикамерной электронике. Данные работы возможны только при наличии прямого доступа к мюонным камерам, что требует открытие станций и установки подъёмных люлек между станциями. Как правило, все неполадки связаны с работой FEB, это шумящие каналы, или проблемы в части связанной с управляющей системой, что приводит к сбоям в конфигурации FEB. И то и другое приводит к потерям в эффективности регистрации детектора. Также, в течение эксплуатации случаются потери контактов и земляных связей.

В течение LS2 нам было необходимо устранить проблемы в 46-ти камерах. В 17-ти на стороне А и в 29-ти на стороне С. На данный момент основные работы, связанные с заменой электроники уже завершены, продолжается проверка контактных цепей и устранение выявленных неполадок.

1.4. Ревизия и производство запасных мюонных камер.

Начиная с 2013 года, производится ревизия и регулярная проверка запасных камер на предмет их работоспособности, включая полномасштабное тестирование как на способность камер обеспечивать необходимое газовое усиление, так и полную работоспособность камерной электроники. В основном были протестированы камеры, где недостаток запасных был наиболее вероятен или даже точно известен. В 2016 году эта работа была активизирована и, по мере возможности, продолжается в настоящее время. По результатам этой проверки стала заметной значительная нехватка запасных камер для нескольких регионов мюонной системы, в связи с заменой камер, вышедших из строя в детекторе из-за коротких замыканий внутри газового промежутка. Критерием недостатка запасных камер считается условие наличия не менее 10% резервных камер каждого типа от числа установленных в детекторе. Поэтому коллаборацией было принято решение о срочном возобновлении производства порядка 60 камер. В 2017 году в ПИЯФ были произведены и доставлены в ЦЕРН для окончательной сборки и установки придетекторной электроники 24 запасные камеры для 4-х регионов Мюонного детектора: 6 для M2R4, 7 для M2R3, 7 для M3R3 и 4 для региона M4R2. Надо добавить, что три последних из перечисленных типов камер изготавливались по новой технологии, разработанной и применявшейся в ПИЯФ для производства камер четвёртых регионов в станциях M2-M4. Недостающие камеры для регионов M5R4 и M5R2 были произведены в Италии. Работы по сборке и вводу в эксплуатацию всех запасных камер осуществляются в ЦЕРНе сотрудниками ПИЯФ параллельно с выполнением остальных задач.

Более того, на основании произведённой ревизии, с учётом качества имеющихся в наличии камер, было сделано заключение, что внутренние регионы в станциях M2 и M3, имеют либо очевидный недостаток запасных камер на ближайшие 10 лет работы, либо находятся на грани риска. Результаты данной работы как по запасным камерам в целом,

так и в качестве обоснования для производства новых детекторов повышенной гранулярности для внутренних регионов, суммированы и опубликованы во внутренних нотах [5, 6]. В данный момент осуществляется производство камер повышенной гранулярности для регионов M2R1, M2R2 и M3R1 в ПИЯФ, более детально описанные в следующей главе, посвящённой модернизации детектора.

Также, в рамках этой работы в 2021 году продолжались работы по миграции программного обеспечения тестовой установки (все рабочие программы для тестирования камер были разработаны и введены в эксплуатацию сотрудниками ПИЯФ) с операционной системы Windows на Linux и обновлён пакет WINCC OA до версии 3.16, что потребовало сделать соответствующие изменения в рабочих программах. Работы над улучшением данного программного обеспечения также продолжаются по мере возможности.

2. МОДЕРНИЗАЦИЯ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА LHCb

Модернизации эксперимента LHCb (U1), реализуемая с момента остановки в декабре 2018 года, и завершающаяся в феврале 2022 года, имеет целью обеспечить его работу при пятикратном увеличении светимости до $\sim 2 \times 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и увеличении скорости набора данных с 1.1 МГц до 30-40 МГц. Следует напомнить, что изначально детектор планировался для работы при светимости $\sim 2 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что и определяло геометрию детектора и методы сбора информации. При этом эксперимент успешно отработал в период RUN1 и RUN2 при светимости в два раза большей от проектной, $\sim 4 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В рамках данной модернизации Мюонный детектор полностью удаляет из системы станцию M1, заменяет всю офф-детекторную электронику (ODE) и управляющую электронику (service boards (SB)) для обеспечения скорости набора данных и заменяет камеры трёх внутренних регионов станций M2 и M3 новыми камерами с катодным считыванием и увеличенной гранулярностью для уменьшения неэффективности от мёртвого времени считывающей электроники (Front End Boards (FEB)). Сотрудники ПИЯФ играют ключевые роли во всех этих работах.

2.1 Замена и ввод в эксплуатацию новой электроники детектора.

Группа ПИЯФ играет ключевую роль в тестировании и вводе в эксплуатацию новой электроники для управления детектором и сбора данных, произведённой в Италии и созданной для увеличения скорости набора данных с 1.1 МГц до 30-40 МГц. Более того, один из сотрудников группы несёт ответственность в качестве официального координатора модернизации электроники в Мюонной системе.

2.1.1 Модернизация контрольной системы.

В ходе модернизации мюонного детектора прикамерная считывающая электроника (FEBs) остается без изменений, в то время как контрольная система была полностью переработана в соответствии с новой схемой считывания и контроля детектора LHCb [7], основанной на использовании протокола GigaBit Transceiver (GBT) [8]. Для обеспечения совместимости с имеющимся оборудованием новая контрольная система повторяет изначальную структуру, использовавшуюся с момента создания детектора. Система состоит из мастер-платы new Pulse Distribution Board (nPDM) и до 20 подконтрольных плат new Service Board (nSB) объединенных в крейт на базе new Custom Backplane (nCB), см. Рисунок 69. Благодаря высокоскоростному протоколу GBT, созданному для работы в условиях радиационного облучения, центральный удаленный сервер может управлять всей FEB-системой.

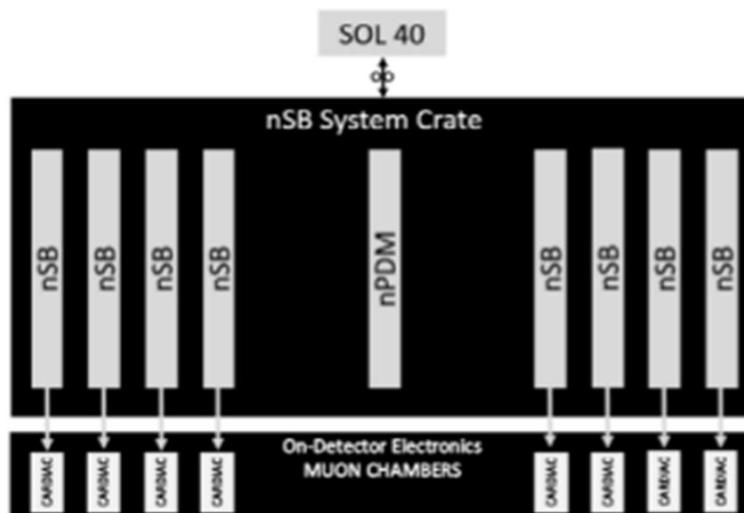


Рисунок 6. Упрощённая схема нового контрольного крейта со считывающей электроникой.

Радиационно-стойкий чип GBTx, реализующий протокол GBT и расположенный на nPDM, получает через высокоскоростной оптический линк сигналы Timing & Fast Control (TFC) и Slow Control (SC). Гигабитный приёмопередатчик GigaBit Transceiver-Slow Control Adapter (GBT-SCA) чип используется для коммуникации с FPGA через протокол FPGA. Microsemi IGLOO2® FPGA обеспечивает контроль и коммуникацию с FEB и генерирует тестовые импульсы, используемые для настройки временной синхронизации системы считывающей электроники [9].

Установленный в nSB, FPGA конвертирует данные стандартного протокола I2C, поступающие от GBT-SCA, с учетом работы I2C линии с длинными кабелями. Двенадцать из шестнадцати линий I2C на GBT-SCA используются для конфигурации и контроля FEB. Установленная в стандартном NIM-крейте, nCB, в свою очередь, обеспечивает обмен данными между nPDM и nSB, см. Рисунок 70.

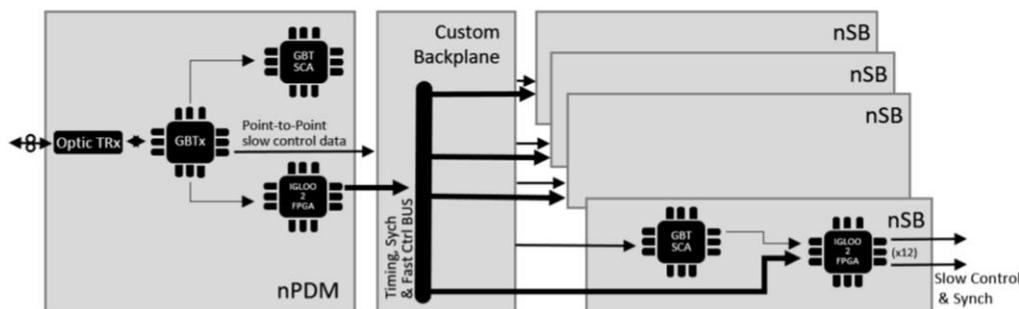


Рисунок 70. Схема, иллюстрирующая архитектуру модернизированной системы контроля считывающей электроники.

Совместно с итальянскими коллегами, сотрудники группы ПИЯФ создали и ввели в эксплуатацию тестовый стенд для проверки работоспособности и качества произведенной электроники, см. **Ошибка! Источник ссылки не найден.11**, и разработали программное обеспечение, см. **Ошибка! Источник ссылки не найден.2**, для автоматизации процесса тестирования. К настоящему времени все модули, 14 nPDM, включая 6 запасных и 150 nSB (из них 30 запасных) изготовлены, успешно прошли тестирование в Университете Рима, в Италии, установлены в детектор и введены в эксплуатацию.

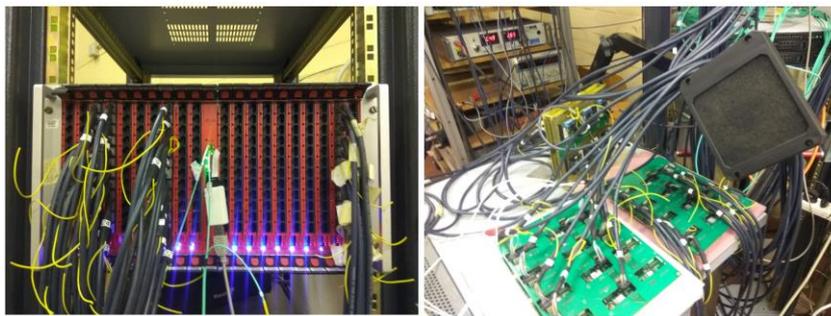


Рисунок 81. Тестовый стенд. Слева крейт с контрольной электроникой. Справа, тестовая сборка из нескольких FEB, используемых в мюонных камерах.



Рисунок 92. Контрольная панель программы тестирования. Модернизация системы сбора данных.

В рамках модернизации детектора и увеличения скорости набора данных производится полная замена офф-детекторной электроники на новую, nODE, в данный момент находящейся в стадии производства в Италии. Кроме того, общее число модулей nODE увеличивается в станциях M2 и M5, в связи с возрастающей нагрузкой детектора при пятикратном увеличении светимости. Таким образом решается проблема возможных потерь в эффективности детектора из-за мёртвого времени в цепи передачи данных. Практически данная задача решается путём замены промежуточных, логически объединяющих сигналы, приходящие с камер, Intermediate Board (IB), новыми nODE, см. Рисунок 103.

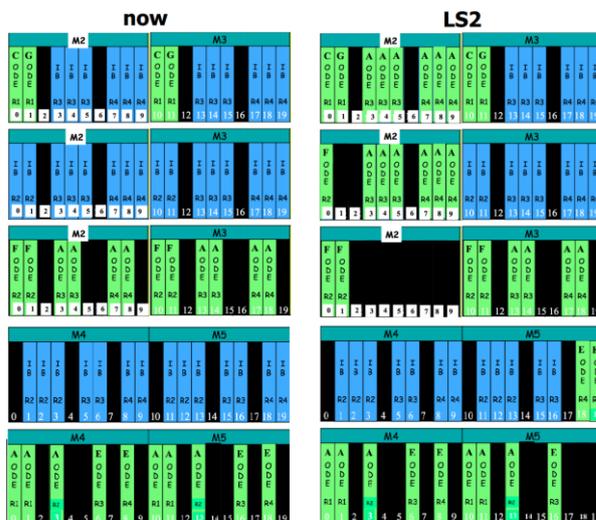


Рисунок 103. Схема расположения модулей офф-детекторной электроники в стойках до (слева) и после модернизации (справа) для одного из квадрантов станций M2 и M3 (вверху) и M4 и M5 (внизу).

Заменяются все промежуточные модули в регионах R2-R4 станции M2 и в регионе R4 станции M5, где данная область перегружена сигналами от вторичных частиц, рождающихся в результате облучения пучком элементов коллайдера, находящихся за Мюонными станциями. Таким путём, общее число модулей nODE увеличивается с 104-х до 144-х, но при этом входная загрузка на каналы офф-детекторной электроники в этих областях многократно уменьшается, до 6 раз, что полностью решает проблему неэффективности регистрации от мёртвого времени nODE. Также планируется произвести 46 запасных nODE, часть из которых будет использована для чтения данных после установки в систему новых камер повышенной гранулярности, изготавливаемых в ПИЯФ. К настоящему времени, 164 nODE изготовлены и прошли предварительное тестирование, 129 из 144 необходимых, уже установлены в детектор и проходят проверку.

Модули nODE были разработаны в соответствии с общими требованиями к производительности модернизированного детектора LHCb, и так же осуществляют обмен данными по протоколу GBT по оптической связи, см. Рисунок 114. Используя ранее модули ODE группировали логические каналы в Trigger Unit (TU), синхронизировали данные с тактовыми сигналами LHCb (LHCb clock), и отправляли их в аппаратный триггер, L0 muon, для принятия решения. Поскольку детектор LHCb больше не будет использовать аппаратный триггер, архитектуру nODE и чипа nSYNC, производящего обработку и синхронизацию данных, удалось значительно упростить и добиться большей гибкости работы с данными. При этом была сохранена обратная совместимость с системой считывающей электроники.

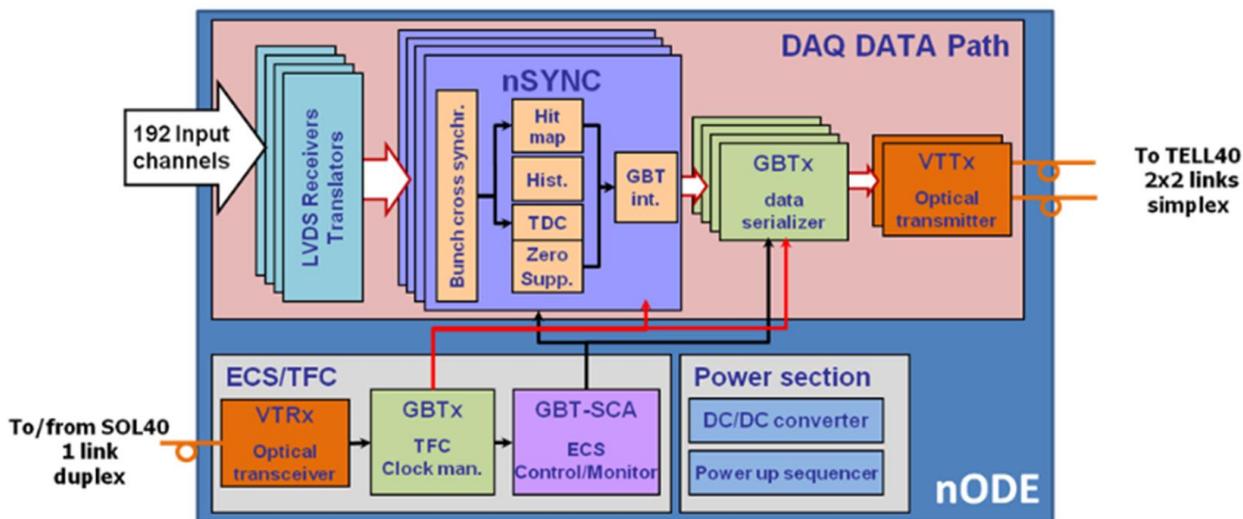


Рисунок 114. Функциональная блок-схема nODE.

2.1.2 Установка и ввод в эксплуатацию новых модулей в детектор.

Сотрудники ПИЯФ отвечают за окончательное тестирование и ввод в эксплуатацию новой электроники после установки модулей в детектор. Так как центральная система управления LHCb также находится в процессе модернизации, для осуществления этой процедуры в шахте детектора был установлен специальный тестовый стенд, см. Рисунок 125. Управляющий сервер стенда осуществляет контроль и обмен данными с электроникой через высокоскоростные волоконно-оптические связи.

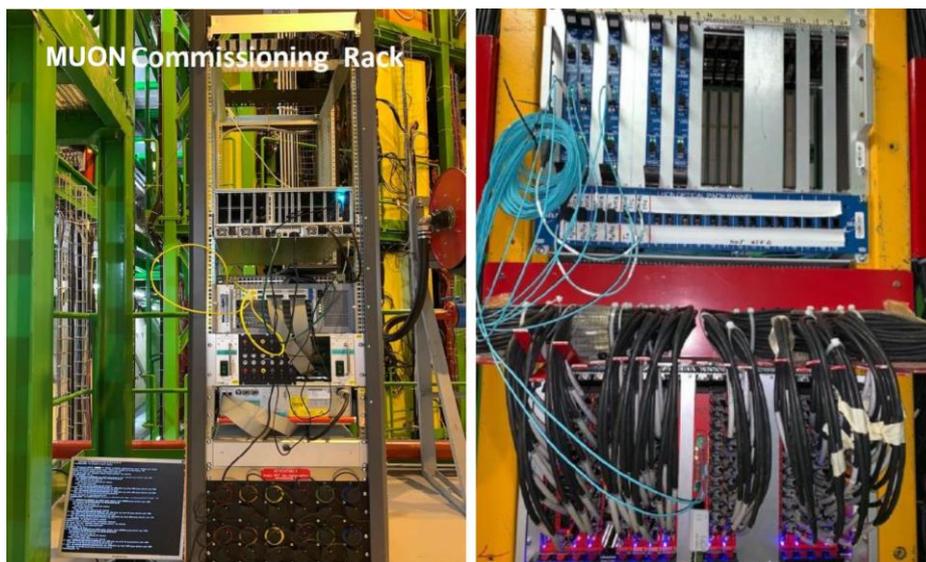


Рисунок 125. Проверочный стенд (слева) и установленная в рабочую стойку Мюонного детектора новая электроника, в верхнем крейте 5 модулей nODE, в нижнем 14 nSB и один nPDM (посередине).

Стандартная процедура тестирования (connectivity test) состоит в проверке всех соединений считывающей электроники детектора: nPDM генерирует тестовые импульсы и посылает их на выбранные nSB, которые, в свою очередь, пересылают их на FEB, установленные в мюонных камерах. Далее, по известной карте соединений, проверяется наличие сигнала на соответствующих каналах nODE, конвертирующей аналоговые сигналы FEB в цифровые логические каналы.

Для проведения тестирования был создан специальный программный алгоритм, позволяющий в автоматическом режиме тестировать выбранные элементы электроники и генерировать отчет о состоянии соединений, см. Рисунок 136.

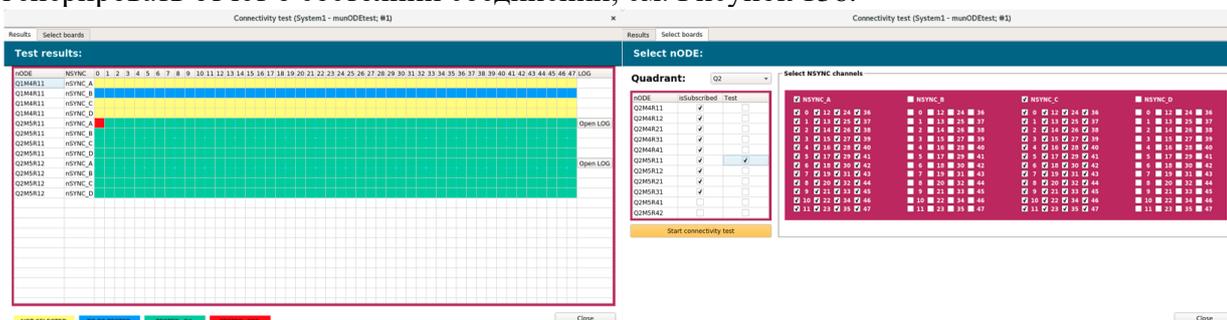


Рисунок 136. Пользовательский интерфейс программы "connectivity test".

2.1.3 Модернизация системы управления экспериментом для контрольной электроники.

В настоящее время сотрудники группы ПИЯФ разрабатывают программное обеспечение системы контроля эксперимента, ECS, для управления модернизированной контрольной системой считывающей электроники. Разработка ведется на базе SCADA WINCC OA, используемой для контроля всего детектора LHCb. Ввиду использования нового протокола GBT, обмен данными производится через специализированную версию DIM-сервера, GbtServer. В связи с этим, а также с изменением архитектуры контрольной электроники, все стандартные процедуры управления и контроля будут обновлены, либо полностью переписаны. Ведется подготовка к подключению контрольной электроники мюонного детектора к центральной системе контроля эксперимента LHCb и переключению коммуникаций с тестового стенда на сервер в дата-центре.

2.2 Модернизация камер внутренних регионов станций M2 и M3.

К сожалению, окончательное решение о необходимости замены камер в наиболее загруженных регионах станций M2 и M3 было принято Мюонной коллаборацией слишком поздно, для того чтобы полностью реализовать его в период LS2. Это было связано с требованием части коллаборации, подтвердить реальную необходимость данного решения в детальных расчётах, которые были закончены и представлены только в начале 2018 года [5]. Несмотря на то, что группа ПИЯФ, параллельно с данными расчётами, активно занималась разработками новых детекторов повышенной гранулярности (первый прототип камеры для M2R2 был изготовлен и испытан в ПИЯФ уже в 2016 году) для регионов M2R1, M2R2 и M3R1, полностью закончить все необходимые работы по производству и вводу в эксплуатацию новых камер до начала работы коллайдера в 2022 году не представляется возможным. Оптимальной стратегией в данной ситуации было выбрана следующая - параллельно с производством камер в период LS2, создание всей необходимой инфраструктуры для новых камер в детекторе, с тем, чтобы осуществить физическую замену детекторов, в одну из ближайших остановок коллайдера на зимний перерыв. При этом, не исключается возможность установки в детектор новых камер в регионе M2R1 в период LS2 в случае готовности.

2.2.1 Испытания прототипов M2R1 и M2R2.

Как уже упоминалось, в ПИЯФ был создан прототип камер для региона M2R2, см. Рисунок 147, с увеличенной гранулярностью катодных падов. Прототип был успешно испытан в ПИЯФ на протонном пучке, затем перевезён в ЦЕРН и прошёл детальное изучение на установке GIF++ (Gamma Irradiation Facility) при облучении мюонным пучком в присутствии больших фоновых загрузок от гамма-источника.



Рисунок 147. Прототип камеры M2R2.

В программу исследований вошли измерения свойств и параметров камеры, как без пучка, так и с пучком протонов. На пучке протонов в ПИЯФ были сняты зависимости эффективности камеры и временного разрешения от величины высокого напряжения. Также была измерена зависимость множественности срабатывания каналов от положения пучка. В результате камера показала высокую устойчивость к самовозбуждению даже при очень низких порогах дискриминаторов. Было измерено плато эффективности в 300В и измерено временное разрешение во всём диапазоне данного плато, см. Рисунок 18.

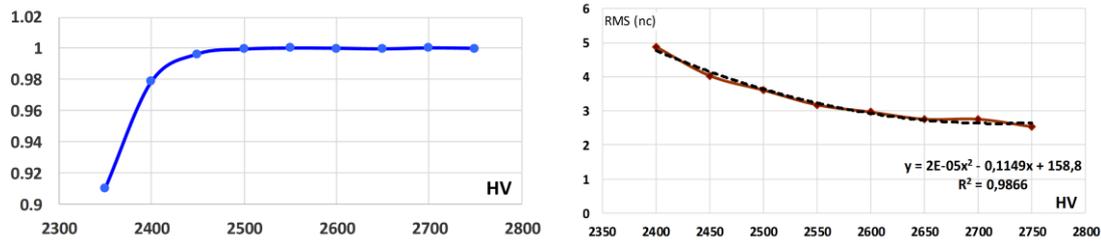


Рисунок 18. Прототип камеры M2R2. Зависимость эффективности (слева) и временного разрешения (справа) от высокого напряжения.

Поскольку камера предназначена для работы с большими нагрузками, то прототип был доставлен в ЦЕРН, где в 2018 году прошёл испытание на установке GIF++ в ЦЕРНе. Была измерена эффективность камеры и другие основные параметры, см. Рисунок , на пучке мюонов в присутствии гамма частиц большой интенсивности от радиоактивного источника, что достаточно хорошо моделирует реальную ситуацию в центральных регионах. Для решения этой задачи, сотрудниками ПИЯФ, был подготовлен испытательный стенд с необходимой электроникой, источником высокого напряжения и собрана установка, включающая сам прототип, а также два сцинтилляционных счётчика, обеспечивающих триггерование проходящих через камеру мюонов.

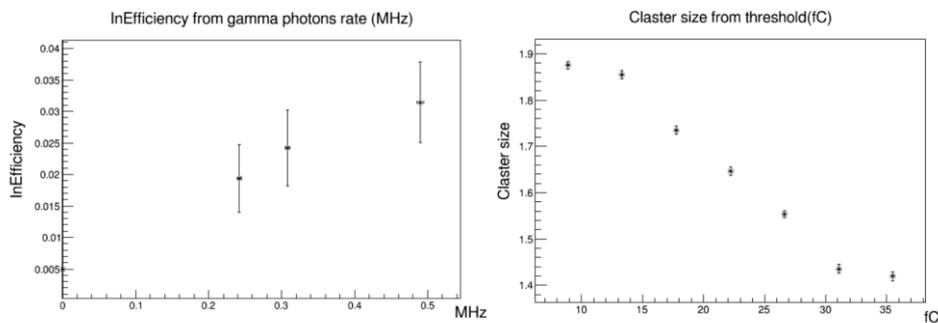


Рисунок 19. Неэффективность регистрации мюонов в прототипе камеры M2R2, в зависимости от фоновой загрузки от гамма-источника - слева. Справа – размер кластера (число сработавших падов на один трек мюона).

В первой половине 2020-ого года, в ПИЯФ был изготовлен и прошёл предварительные испытания на космике прототип камеры для региона M2R1, см. Рисунок 150.

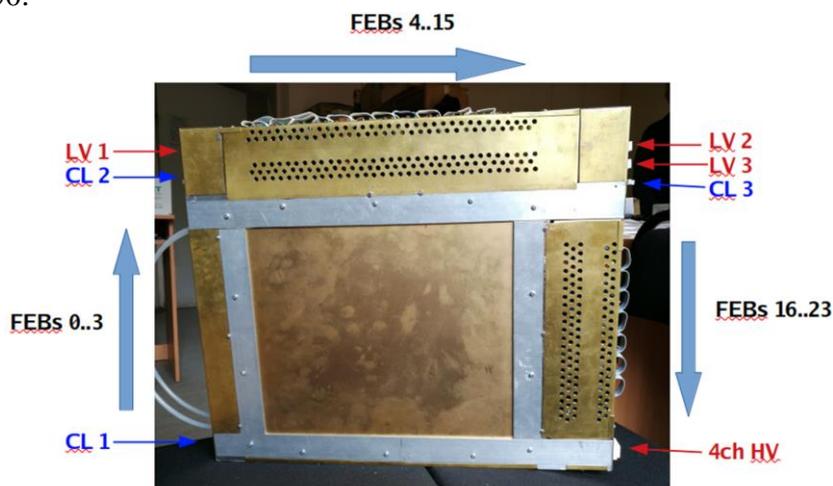


Рисунок 150. Полностью собранный прототип камеры M2R1. Указаны расположение 24-х фронт-энд плат (FEBs), места подключения 3-х контрольных линий (CL) и разъёмы для подачи высокого (HV) и низкого (LV) напряжения.

Данная камера, в отличие от прототипа M2R2, где газовые промежутки герметизировались эпоксидным клеем, была сделана по технологии с герметизацией на базе уплотнительных резиновых прокладок, что допускает разборку, в случае необходимости, без повреждения камеры. Данная технология применяется при массовом производстве камер для M2R1 в настоящее время в ПИЯФ и будет применяться в дальнейшем для остальных регионов.

В связи с пандемией, протонный ускоритель в ПИЯФ не работал и всё испытания прототипа M2R1 пришлось выполнять на с использованием космических лучей. Тем не менее, результаты тестов подтвердили работоспособность камеры и соответствие всех параметров необходимым требованиям.

На **Рисунок 161**, представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) и предварительная оценка, выполненная на малой статистике, временного разрешения камеры.

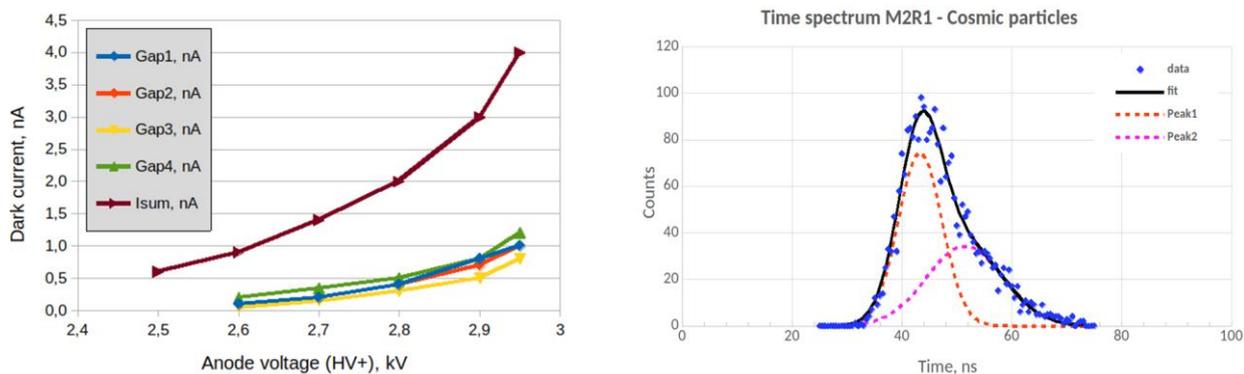


Рисунок 161. ВАХ суммарного темного тока и для каждой из четырех плоскостей слева и суммированный временной спектр с группы катодных падов. Аппроксимация полученного распределения выполнено двумя Гауссианами по МНК.

Несимметричная форма спектра объясняется регистрацией сигналов двух видов — это прямые сигналы с большой амплитудой, возникающие при прохождении частиц через область данного пада (быстрая составляющая), и сигналы малой амплитуды, возникающие при прохождении частицы через область соседних падов (медленная составляющая). Сигналы малой амплитуды имеют менее крутой фронт, что приводит к запаздыванию срабатывания дискриминатора, и как следствие появлению задержанных событий. В результате, усредненное временное разрешение составило 16.5 нс, RMS=7нс.

Также удалось произвести грубую оценку вероятности одновременного срабатывания двух и более падов при прохождении одной частицы, так называемый размер кластера (cluster size). Под средним размером кластера подразумевается отношение суммы регистрируемых событий (с матрицы падов) к числу триггеров. В результате измерений получен $\text{cluster size} = 2672/1290 = 2.07$, что вполне согласуется с результатами расчётов.

В результате анализа полученных результатов, мюонная коллаборация приняла решение признать камеру, как удовлетворяющую всем необходимым требованиям и приступить к работам по производству камер для всех трёх регионов M2R1, M2R2 и M3R1. В настоящее время осуществляется массовое производство камер M2R1.

В октябре 2021 года, прототип M2R1 был доставлен в ЦЕРН, где в течение 2022 года осуществлялись необходимые тесты по изучению новой камеры на космике.

2.2.2 Работы по подготовке инфраструктуры для новых камер в детекторе.

Как уже упоминалось выше, установка новых камер высокой гранулярности предполагается в один из зимних перерывов в течение RUN3 или в LS3. Для решения

этой задачи в относительно короткий период вся необходимая инфраструктура в детекторе должна быть подготовлена заранее, в период LS2.

Всего в детекторе будет заменено 48 камер, 12 в M2R1, 24 в M2R2 и 12 в M3R1. В существующих камерах данных регионов использовалась аналогичная схема формирования физического канала, где чтение производится, как с анодных проволок, объединённых в группы, образующие 48 узких вертикальных анодных каналов, так и с 64 широких катодных падов. Данная схема вполне удовлетворяла требованиям по эффективности регистрации мюонов в детекторе при ожидаемых нагрузках и была реализована с целью уменьшения числа каналов электроники и, соответственно, экономии средств на их производство. В совпадениях сигналов формировались 384 физических канала высокой гранулярности в камерах первого региона и 192 канала в камерах типа M2R2 (также в M3R2). Во всех новых камерах для этих регионов число FEB увеличивается с 14 до 24-х, соответственно на то же количество увеличивается число необходимых сигнальных кабелей для каждой камеры для транспортировки выходных сигналов в ODE, более того, в камерах M2R2, где сигналы с двух соседних катодов по вертикали объединялись на уровне FEB, число дополнительных сигнальных кабелей возрастает с 10 необходимых для камер первого региона, до 14-ти. Всего, на станциях было проложено 576 дополнительных сигнальных кабелей, большая часть в 2020-м году, в текущем году осуществлялась установка на них такое же количество разъёмов для подключения их к ODE через переходные платы.

В текущем году был выполнен большой объём работ для создания новой системы подачи низкого напряжения (low voltage, LV) для новых камер. В связи с невозможностью обеспечить напряжением дополнительное количество FEB резервами существующей системы на станциях, было принято решение, что система подачи низковольтного питания на новые камеры будет принципиально отличаться от той что используется сейчас в станциях M2-M5 и будет выполнена по схеме, похожей на использовавшуюся для подачи питания на FEB в GEM камерах в станции M1, с обеспечением контроля напряжения непосредственно на камерах, см. Рисунок 172. Предполагается установка по одному дополнительному источнику питания типа MARATON на каждую сторону Мюонного детектора, в свободное пространство в стойках с электроникой для станций M4 и M5 в верхнем квадранте, откуда напряжение будет подаваться через распределительные модули с предохранителями на регуляторы напряжения, установленные в верхней части станций M2 и M3. В существующих камерах, регуляторы установлены непосредственно внутри, и недоступны для замены в случае неполадок без открытия станций и снятия камер. Кроме того, контроль за напряжением осуществляется только непосредственно на выходе источника напряжения. Оттуда уже будет проложено шесть кабелей подачи напряжения и один контрольный, к каждой из новых камер. Практически всё, что требовалось для создания данной системы для региона M2R1 и большая часть оборудования для остальных регионов было демонтировано со станции M1. Необходимо изготовить только регуляторные блоки с регуляторами и установить необходимые разъёмы на кабелях на стороне непосредственно камер. Основными преимуществами новой системы LV, являются доступность регуляторов, с возможностью их замены в случае необходимости, во время сбора данных без открытия станций и контроль за напряжением непосредственно на камерах.

Более того, после завершения работ непосредственно на стенках станций была выполнена успешная проверка на сведение мюонных станций в рабочее положение. Это крайне деликатная операция, когда половины станций соединяются в рабочее положение, при этом камеры и другие конструкции, установленные на стенах, пересекаются с минимальными зазорами, см. Рисунок 24 - слева. Перед выполнением данной операции, была выполнена проверка с помощью специально изготовленного устройства с установленными на нём лазерным уровнем и видеокамерой оснащённой беспроводной связью, см. Рисунок 24 – справа, которое опускалось в зазор между частично сведёнными половинами станций.

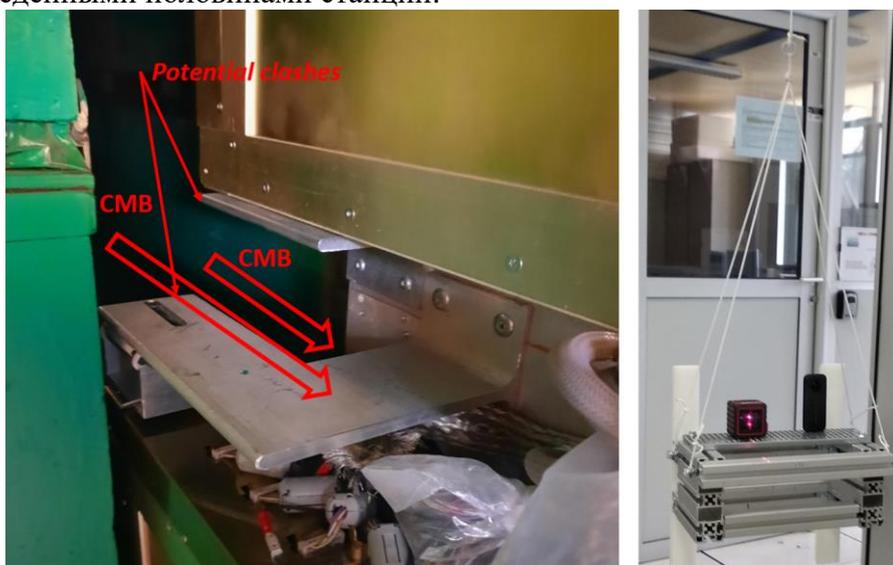


Рисунок 24. Слева показаны наиболее опасные места на станциях в момент соединения их в рабочее положение, справа - устройство для визуальной проверки данных мест с лазерным уровнем и видеокамерой с беспроводной связью.

2.3 Экранировка мюонных станций М2 и М3.

В предыдущие годы был выполнен цикл работ по экранировке, насколько это возможно в текущих условиях, станции М5 от вторичных частиц, рождающихся в результате облучения пучком элементов коллайдера, находящихся за Мюонными станциями. Для этого была построена стена из железных блоков в верхней части станции М5. Загрузки от этих частиц оказались настолько большими, что приводили к заметным перегрузкам ODE и, как следствие, к появлению заметной неэффективности в существенных областях станции М5, из-за мёртвого времени в цепи сбора данных. В рамках текущей модернизации для выхода на большую светимость, часть промежуточной логической электроники полностью удаляется из данной линии, для уменьшения загрузки.

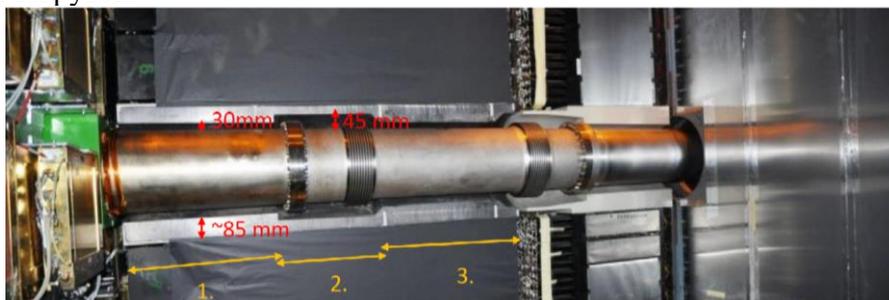


Рисунок 195. Пучковая труба проходит сквозь калориметры и мюонный детектор в индивидуальных защитных пеналах (Beam plug). Слева расположен мюонный детектор (показана только входная часть), в центре – адронный калориметр, и справа – электронный калориметр.

В тоже время, внутренние регионы станций M2 и M3, сильно перегружены сигналами от низкоэнергетических частиц, рождаемых в материалах пучковой трубы и вторичных частиц, вылетающих из адронного калориметра. Их вклад в общую загрузку на входе FEB превышает 90%. В 2014 году были выполнены работы для улучшения экранировки станции путём закрытия технологических отверстий в защитном кожухе пучковой трубы стальными вкладками. В текущем году стальной кожух (Рисунок 195, слева зелёного цвета) был заменён на новый, аналогичный в размерах, но выполненный частично из свинца, что должно улучшить экранировку, и таким образом уменьшить загрузки в центральных регионах станции. Защитный кожух в теле калориметра (Рисунок 195, в центре), также заменили на новый, немного увеличенный в диаметре, за счёт уменьшения зазора между пучковой трубой и внутренней частью кожуха. Также, для дополнительного подавления загрузки от фоновых частиц в текущем году установлена защита непосредственно в теле адронного калориметра, путём замены нескольких внутренних ячеек адронного калориметра слева и справа от трубы рядом с мюонной станцией на вольфрамовые блоки. Следует отметить, что эти участки калориметра в настоящее время уже исключены из детектора, так как малоэффективны из-за высоких загрузок. Общий вид предлагаемой защиты показан на Рисунок 206. Результаты последних расчётов показывают, что применение всех трёх мер защиты дают совокупный эффект ~50% для региона M2R1 и оказывают заметное подавление фона в других регионах.

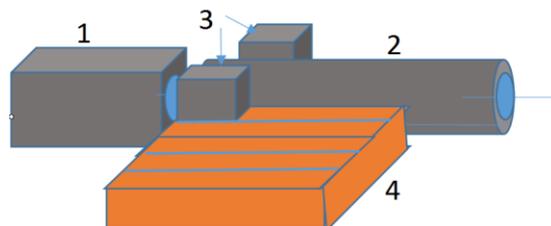


Рисунок 206. Общий вид предлагаемой защиты из вольфрама и свинца для мюонного детектора:

1. Блок защитного пенала на входе M2 с закрытыми боковыми окнами
2. Первая секция защитного пенала адронного калориметра
3. Дополнительные защитные блоки на выходе калориметра
4. Замена центральных ячеек адронного калориметра на вольфрамовые блоки

2.3.1. Изучение возможностей подавления фона от тепловых нейтронов.

В рамках подготовки к следующей модернизации, от группы ПИЯФ поступило предложение по изучению возможностей экранировки от низкоэнергетического фона, порождаемого тепловыми нейтронами, генерируемого в адронных каскадах в материалах калориметров, мюонных фильтров и частей ускорителя. Распределение потоков нейтронов в детекторе является неравномерным, см. Рисунок 27, и трудно симулируемым. Нейтроны производят фотоны посредством фотоядерной реакции (n, γ), которые в свою очередь при Комптоновском рассеянии и фото-эффекте в материалах детектора производят вторичные электроны. Образующиеся таким образом электроны приводят к появлению фоновых сигналов в пропорциональных камерах, что понижает эффективность регистрации системы за счёт мёртвого времени электроники.

Предложение состоит в прямом измерении возможного уменьшения загрузок путём установки в детектор образцов с материалами, насыщенными известными поглотителями, в частности B^{10} . Путём прямого сравнения изменения за счёт установки экранов, счетов на физических считывающих электродах MWPC, можно будет сделать вывод о целесообразности масштабного оборудования детектора данными типами экранов LS3 и LS4.

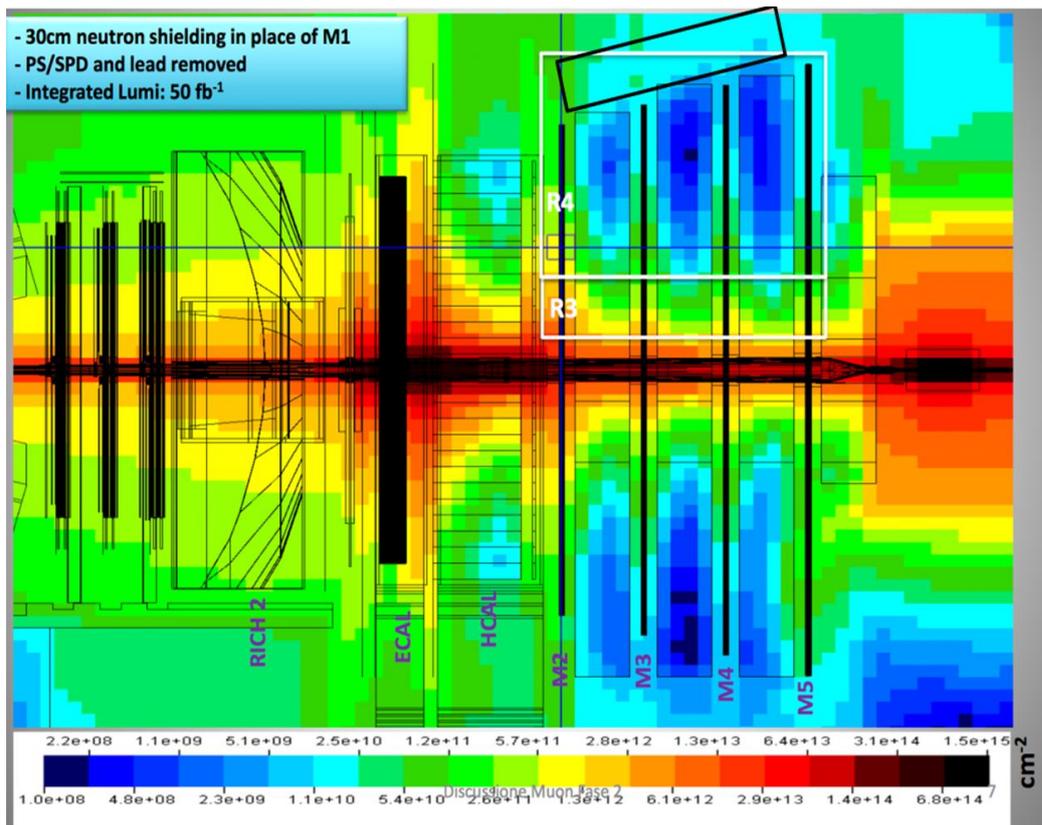


Рисунок 27. Статистическое распределение нейтронного потока, ожидаемое для интегральной светимости 50fb^{-1} в детекторной системе LHCb, вычисленная во Fluka (расчеты и рисунок - Matthias Karacson). Зоны с красным цветом имеют наибольшую нейтронную загрузку: для Мюонной системы это центральные области за HCAL, вдоль пучковой трубы и зона за станцией M5.

Для выбора оптимальной модели образцов была создана компьютерная модель нейтронной защиты средствами программы Fluka [10] с графическим интерфейсом Flair, с целью оценки эффективности поглощения нейтронов при различной конфигурации защиты и вклада вторичного излучения порождаемого данной защитой. Для упрощения анализа результатов была выбрана геометрическая конфигурация с осевой симметрией, Рисунок 27, где все активные слои представлены дисками равного диаметра (20см), но разной толщины. Каждый слой мог программно "выключаться" или "включаться" в зависимости от конкретной задачи симуляции.

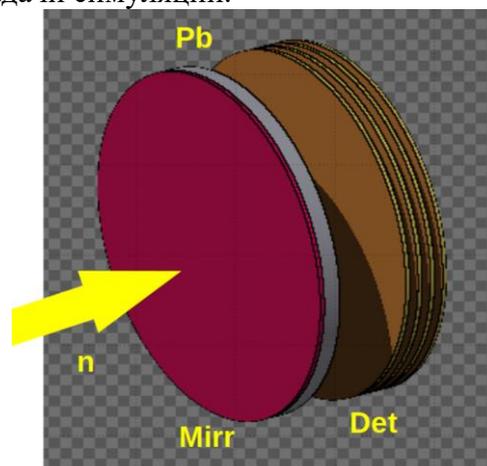
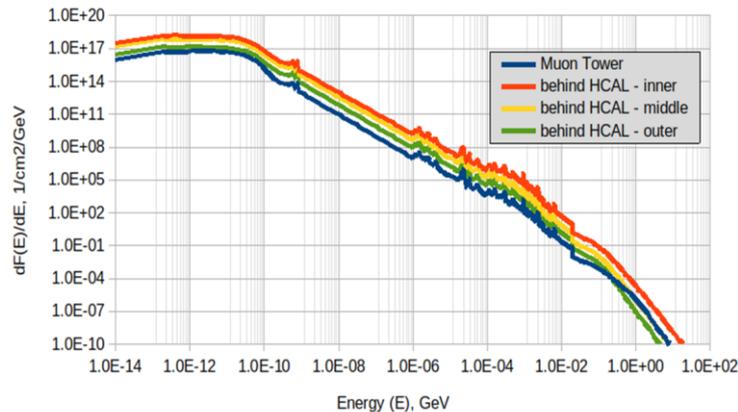


Рисунок 28. Геометрия расчетной модели: красный слой "Mirr" - поглощающий нейтроны материал, серый слой "Pb" - свинцовый поглотитель вторичного излучения, "Det" - четырехслойная конструкция, описывающая конструкцию газоразрядного детектора (анодные проволочки в расчете не учитывались), материал среды окружения - воздух.

Каждый слой детектора представляет собой "слодку" по геометрическим параметрам приближенный к гэпу реального детектора: 20мкм-слой Cu (материал катода) + 5мм-слой газовой смеси Ar/CO₂ (для упрощения 5% добавка CF₄ не рассматривалась) + 20мкм-слой Cu. Расстояние между отдельными гэпами 10мм. Несущий материал катода - стеклотекстолит – также не принимался в рассмотрение в симуляции.

В качестве поглотителя нейтронов рассматривались разные материалы применяемые для защиты от нейтронного излучения: борированный полиэтилен с различным содержанием бора, фольги Cd и Gd, однако здесь будем говорить только об одном из них - Mirrobor (производитель - фирма Mirrotron, Венгрия), который наиболее удобен для наших задач и коммерчески оправдан. Это композитный гибкий материал на основе порошка карбида бора B₄C и связующего акрилатного клея. Массовое содержание B₄C в материале около 80% (с природным содержанием B¹⁰ - ~20%), что примерно соответствует концентрации атомов B¹⁰ на уровне 9.4×10^{21} ат/см³ (по данным производителя). Данный материал и аналоги находят широкое применение для защиты от фонового нейтронного излучения различных узлов и компонент нейтронных спектрометров и дифрактометров.

Нейтронный источник излучения имитировался коллимированным пучком частиц, который падал перпендикулярно на поверхность поглотителя см. Рисунок 28 или другого первого по ходу пучка функционального слоя с соосной круглой площадки диаметром 17см, удаленной на некоторое расстояние. Спектр нейтронов описывался распределениями, Рисунок 29, полученными ранее специалистами дозиметрической службы (RP) LHCb (Matthias Karacson) и были ими любезно предоставлены для данной работы.

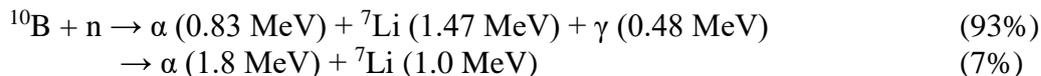


Place	Fluence spectra integrals, cm-2	Factor to Muon Tower	Comments	
air volume behind the HCAL PMT holder	Inner region	5.96E+07	27.1	from beam plug to +1m in x and y
	Middle region	2.74E+07	12.4	from +1m to +2m in x and y
	Outer region	5.80E+06	2.6	until the edge of the HCAL detector plane
Muon Tower	2.20E+06	1.0	Muon Tower beam height area	

Рисунок 29. Дифференциальный нейтронный поток $dF(E)/dE$, в ед. $1/\text{см}^2/\text{ГэВ}$. Приведены распределения для 4-х областей МД: красная линия - внутренняя область детектора за HCAL, желтая - средняя область, зеленая - внешняя область, синяя - область Muon Tower. Границы областей приведены в таблице под рисунком.

Для симуляций использовался спектр внутренней области (Inner region). Из характера распределения потока нейтронов по энергиям можно заметить, что основная часть нейтронов приходится на тепловой диапазон энергий $E < 10^{-9}$ ГэВ. Это означает, что нейтронный конвертер B¹⁰ с высоким сечением поглощения в тепловой области B¹⁰ будет

эффективным для поглощения фоновых нейтронов. Реакция конвертации нейтронов идет по двум каналам:



В основном канале реакции образуются 0.48 МэВ фотоны, которые приводят к появлению дополнительно фона в детекторе, поэтому в качестве поглотителя вторичных частиц предложено использовать свинец. Оптимизация толщины свинца также было задачей симуляции. Таким образом, самый простой вариант защиты от нейтронов должен представлять собой двухслойную конструкцию - "Mirrobor+Pb".

Расчеты проводились для нескольких конфигураций и толщин поглотителей, в качестве референсного Run0 использовалась конфигурация без поглотителей, т.е. "чистый" детектор. Второй набор конфигураций: Mirrobor+Детектор (Run1: толщина Mirrobor 2 мм, Run2 - 5мм). Третья конфигурация: Mirrobor+Свинец+Детектор (Run3-6: толщина Mirrobor 2 мм и 5мм, свинец 10 и 19 мм). Результат с одной из наиболее приемлемой для мюонного детектора композицией материалов, включающей в себя слой толщиной 19мм свинца и 2мм Mirrobor представлен на Рисунке 30.

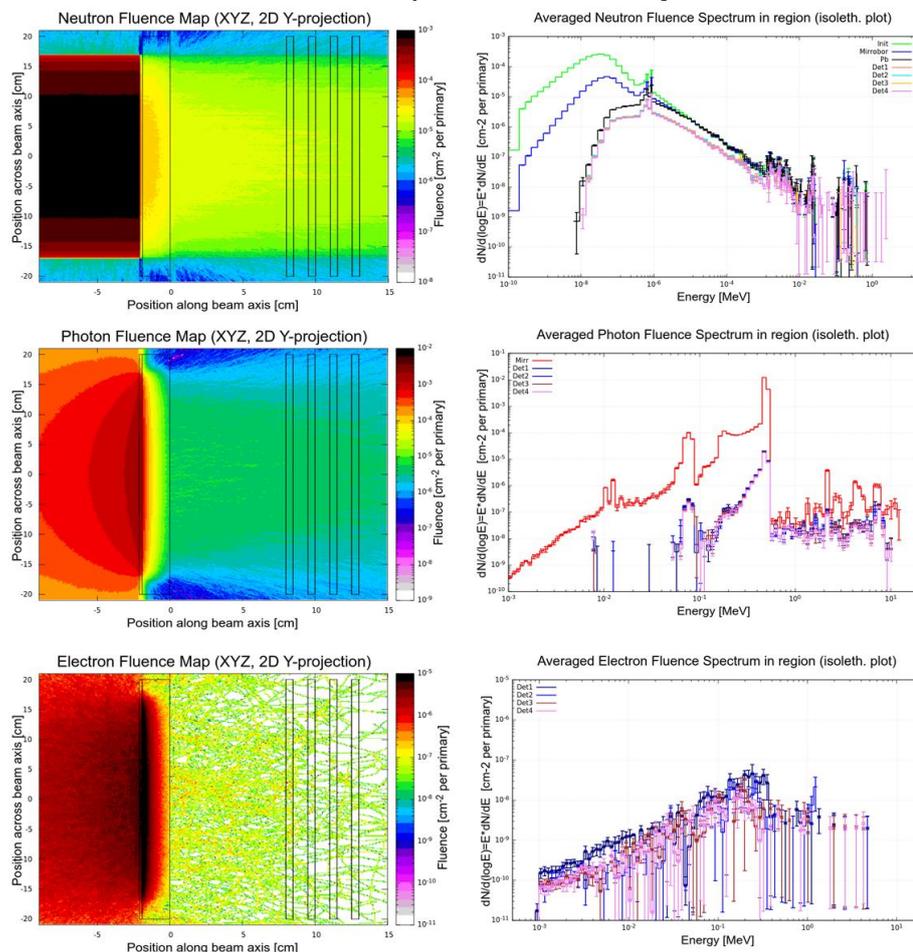


Рисунок 30. Слева представлены 2D-проекции потоков части, сверху – вниз: нейтронов, фотонов от фотоядерных реакций и вторичных электронов, справа, в том же порядке – энергетические спектры частиц, усреднённые по заданному объёму MWPC. Все распределения нормированы на 1 начальный нейтрон.

На Рисунке 31 представлены все результаты симуляций, где потоки вторичных частиц нормированы на результаты по детектору без защиты.

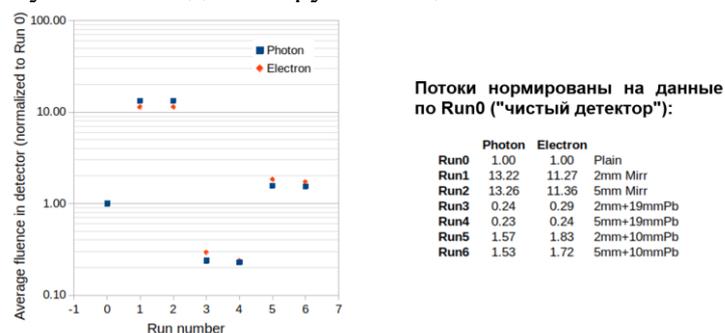


Рисунок 31. Слева – потоки вторичных частиц, нормированные на результат, где перед детектором не установлена защита, справа таблица, представляющая данные отношения, с указанием состава композиции.

Как видно, наиболее интересна комбинация, включающая слои с Mirrobor и свинец толщиной 19мм (run3 и run4), позволяющая уменьшить фракцию низкоэнергетичного фона от нейтронов в MWPC примерно в 4-ре раза. Подобные образцы находятся в процессе изготовления, их установка в детектор планируется в начале следующего года.

2.4 Модернизация программного обеспечения Мюонного детектора.

Группа ПИЯФ занимает ведущую роль в модернизации программного обеспечения систем контроля и управления детектором и систем сбора данных (ECS). Управление экспериментальными установками в рамках ЦЕРН традиционно реализуется с помощью программного пакета WINCC OA. Модернизация подразумевает исключение удалённой из детектора станции M1 из всех проектов, входящих в иерархию системы, а также перевод всей информации, касающихся компонентов детектора, устройств и конфигурационных параметров Мюонной системы из локальных конфигурационных файлов в реляционную базу данных ORACLE, что обеспечит в дальнейшем гарантированную сохранность информации, удобство и гибкость работы с данными параметрами, как для пользователей, так и для экспертов. Кроме того, продолжается работа по расширению функциональности управления мюонным детектором, созданию дополнительных инструментов контроля и мониторинга систем детектора, что позволит в дальнейшем облегчить работу экспертов по устранению возникающих неполадок и тем самым повысить эффективность регистрации мюонной системы в целом в период набора данных. Более того, кардинально меняется сама структура ECS мюонного детектора, за счёт унификации большинства составляющих её проектов, включая заметное уменьшение их числа, а также компонентов системы. Данная модернизация стала возможной за счёт перевода почти всех систем детектора на обмен данными посредством новых оптических коммуникаций и увеличения самих компьютерных мощностей в эксперименте.

Другим, скорее техническим моментом, но также требующим тщательного внимания экспертной группы, работающей над модернизацией ECS, является параллельная плановая миграция компьютерных мощностей от операционной системы WINDOWS на LINUX, в связи со значительным удорожанием продуктов компании Microsoft. Данные преобразования подразумевают полную замену промежуточного программного обеспечения, обеспечивающего передачу данных между ECS и конечными устройствами, а также обновление программных библиотек самой системы ECS. Столь существенные изменения влекут необходимость разработки новых программ промежуточного уровня для компонентов, производитель которых напрямую не поддерживает операционную систему Linux, а также повторные отладку и тестирование всей системы.

Наиболее серьёзным моментом в осуществлении данных работ в 2020 году оказался физический перенос всех компьютерных мощностей, сопровождающийся полным их обновлением, а также перевод всех ключевых систем по управлению детектором и сбору данных на оптические линии, включая полную замену всех сопутствующих сервисных устройств. Создание нового центра сбора данных, на поверхности, до этого он располагался в экспериментальной шахте, оказалось серьёзно подвержено проблемам с задержками как в поставках необходимого оборудования, так и в последующем вводе его в эксплуатацию, из-за пандемии коронавируса. Естественно, отсутствие реальных рабочих мощностей сильно затруднило работы по модернизации программного обеспечения.

Тем не менее, были получены от разработчиков и протестированы, либо модернизированы имеющиеся программы нижнего и промежуточного уровня для всех видов устройств, входящих в состав мюонного детектора, выполнено тестирование и отладка отдельных программ промежуточного уровня, а также осуществлена миграция большинства существующих проектов систем контроля и сбора данных на обновленную версию 3.16 программного пакета WINCC OA.

3. УЧАСТИЕ ГРУППЫ ПИЯФ В ОБРАБОТКЕ И АНАЛИЗЕ ДАННЫХ В 2021 ГОДУ.

Основной целью эксперимента LHCb является изучение свойств элементарных частиц, содержащих тяжёлые (b, c) кварки. Подробно исследуется физика слабого взаимодействия, проверяются многие аспекты сильного взаимодействия, ведётся поиск новых элементарных частиц, изучаются редкие распады элементарных частиц и таким образом тестируется Стандартная Модель (СМ) на наличие возможных расширений, таких как SUSY (Суперсимметричное расширение СМ).

Группа анализа данных ПИЯФ в основном работает в рамках группы анализа данных LHCb «Charm Working Group», которая занимается исследованиями адронов, содержащих c кварки. В рамках группы ведётся поиск нарушения CP четности в распадах очарованных частиц, поиск редких распадов таких частиц, спектроскопические измерения.

Для более глубокого понимания процессов рождения частиц, содержащих тяжёлые b - и c -кварки необходимы новые экспериментальные данные. Так на сегодняшний день отсутствуют детальные сведения о рождении очарованных барионов (трёхкварковых состояний, содержащих c -кварк) в pp -взаимодействиях при высоких энергиях. Одним из направлений исследований группы анализа данных является изучение рождения и распадов очарованных барионов Ξ_c^+ , $\Sigma_c^{+,0}$ и Λ_c^+ , а также их возбужденных состояний. Одна из целей – исследование поведения сечений рождения очарованных гиперонов в зависимости от его поперечного импульса и быстроты, что поможет пролить свет на механизмы их рождения.

В 2021 году завершена вторая стадия анализа данных по экспериментальному измерению отношения сечений рождения очарованных барионов: Λ_c^+ , $\Lambda_c(2595)^+$, $\Lambda_c(2625)^+$ и $\Sigma_c^{+,0}$ в протон-протонных взаимодействиях. Изучаемые отношения сечений рождения получены в диапазоне поперечных импульсов гиперонов от 3 до 20 ГэВ/с и в диапазоне быстрот от 2.0 до 4.5 для протон-протонных соударений при энергии 7 и 8 ТэВ в системе центра масс сталкивающихся протонов. Работа получила одобрение группы анализа данных LHCb «Charm Working Group»,

Также, в 2021 году осуществлялись работы по асимметрии рождения Λ_c^+ барионов. Основной проблемой являлся учёт вклада в наблюдаемую асимметрию детектирования протонов и антипротонов. Существовало несколько подходов к учёту этого эффекта. Наиболее надёжным оказался подход, базирующийся на измерении

зависимости сечений (анти)протон-протонного и (анти)протон-дейтронного взаимодействий. Данный подход был экспериментально подтверждён измерениями выходов Λ гиперона, распадающегося по каналу $p\pi^-$. При этом удалось получить сигналы от распадов Λ гиперона используя только информацию о треке протона из вершинного детектора LHCb.

Разработанный метод был успешно применен для измерения асимметрии рождения Λ_b^0 барионов [11]. Изучалась асимметрия рождения барионов и антибарионов, сечения рождения получены в диапазоне их поперечных импульсов от 2 до 25 ГэВ/с и в диапазоне быстрот от 2 до 4 для протон-протонных соударений при энергии 7 и 8 ТэВ в системе центра масс сталкивающихся протонов (см. Рисунок 32). Экспериментальные данные показали наличие асимметрии. Имеется тренд к увеличению величины эффекта с ростом быстроты бариона.

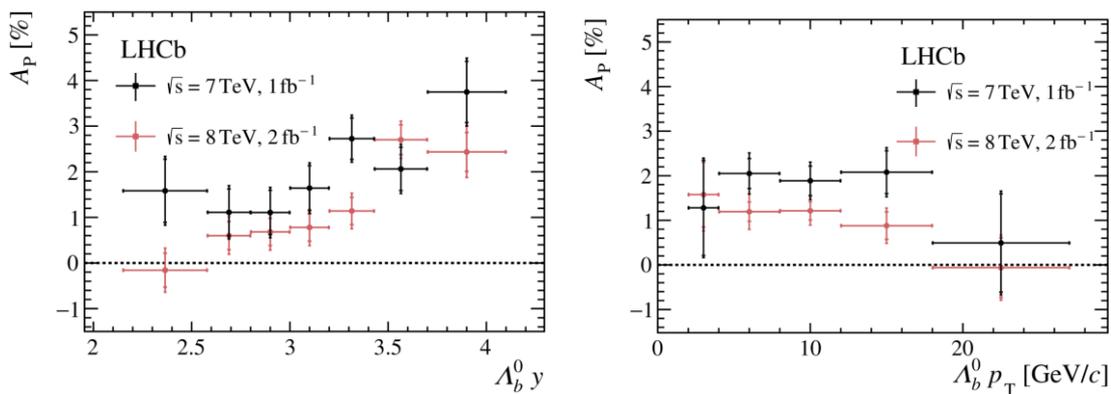


Рисунок 32. Измеренная асимметрия рождения Λ_b^0 относительно быстроты (слева) и поперечного импульса (справа).

Разработанный метод учета асимметрии детектирования протонов может быть применен и для получения величины асимметрии рождения Λ_c^+ барионов. Также начат предварительный анализ данных по измерению асимметрии рождения Ξ_c^+ барионов

В настоящее время продолжается анализ данных по измерению отношения сечений рождения Ξ_c^+ барионов и их возбужденных состояний $\Xi_c(2645)^0$ и $\Xi_c(2815)^+$. Данная работа является развитием анализа данных по измерению сечений рождения Λ_c^+ , $\Lambda_c(2595)^+$, $\Lambda_c(2625)^+$ и Σ_c^{++0} . В настоящее время эти работы проходят рецензирование рамках группы анализа данных «Charm Working Group».

Помимо непосредственно анализа экспериментальных данных LHCb, физики ПИЯФ участвуют в качестве рецензентов работ, выпускаемых «Charm Working Group». В зону ответственности ПИЯФ входят работы по измерению свойств очарованных адронов, а также сечений их образования в протон-протонных взаимодействиях высоких энергий. В 2021 году при участии сотрудников ПИЯФ опубликованы работы по поиску CP нарушения в распадах очарованных мезонов [12-15]; работы по поиску барионов с двойным очарованием [16, 17], измерение времён жизни Ξ_c^0 и Ω_c^0 барионов [18], а также первое экспериментальное измерение разницы масс собственных состояний D^0 мезонов [19].

Сотрудники ПИЯФ также принимают активное участие во внутреннем рецензировании работ LHCb (review committee). Наиболее значимыми достижениями LHCb за 2021 стали:

- обнаружение указание на расхождение наблюдаемых, полученных из анализа распадов $B_s^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$ и предсказаний СМ [20, 21];

- новые данные о вероятности редкого распада $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ [22, 23] и поиск редких распадов типа $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ [24];
- работы по проверке принципа лептонной универсальности в секторе прелестных мезонов [25, 26];
- уточнение параметров осцилляций B_s^0 мезонов [27];
- поиск новых адронных состояний (в том числе экзотических) [28-31].

Результаты, представленные выше, либо уже опубликованы, либо направлены в реферируемые научные журналы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Группа ПИЯФ, вместе с итальянскими группами, несет ответственность за функционирование Мюонной Системы детектора LHCb, в разработку и создание которой ПИЯФ внес определяющий вклад. Сотрудники института играют ключевые роли в Мюонной коллаборации и в анализе данных эксперимента, в частности, трое сотрудников группы ПИЯФ в настоящее время несут нагрузку в качестве заместителя лидера проекта Мюонной детектора, Координатора по модернизации электроники и Координатора направления «Рождение и свойства распадов очарованных адронов». В 2021 году, несмотря на трудности, вызванные эпидемией коронавируса, группа активно работала над модернизацией Мюонной Системы в рамках общего проекта модернизации детектора LHCb, целью которого является обеспечение возможности пятикратного повышения светимости после технической остановки коллайдера в 2022-м году. ПИЯФ активно участвует в этой программе, которая включает в себя полный апгрейд офф-детекторной электроники, а также изготовление запасных мюонных камер для нескольких регионов Мюонной Системы, включая создание и производство новых мюонных камер высокой гранулярности для внутренних регионов станций M2 и M3 Мюонной Системы.

В 2021 году группа ПИЯФ активно продолжала работу по анализу экспериментальных данных как полученных в период RUN1 и RUN2. Одним из направлений исследований группы анализа данных является изучение рождения и распадов очарованных барионов Ξ_c^+ , $\Sigma_c^{+,0}$ и Λ_c^+ , а также их возбужденных состояний. В этом году продолжены работы по измерению асимметрии рождения Λ_c^+ , и анализ данных по измерению отношения сечений рождения Ξ_c^+ барионов и их возбужденных состояний. Были представлены результаты измерения времен жизни для барионов: Ω_c^0 и Ξ_c^0 .

Сотрудники группы НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ принимали активное участие в процедуре внутреннего рецензирования работ LHCb.

Все результаты были представлены на конференциях и либо уже опубликованы, либо находятся в стадии подготовки к публикации.

КОЛЛАБОРАЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ ГРУППЫ ПИЯФ В 2020 ГОДУ

- Доклады на внутренних совещаниях коллаборации.

ПУБЛИКАЦИИ В 2020 ГОДУ

1. М.Э. Бузоверя, Г.Е. Гаврилов, О.Е. Маев, ЖТФ 91 (2) 375 (2021)
2. M. E. Buzoverya, G. E. Gavrilov & O. E. Maev, Technical Physics volume 66, pages 356–366 (2021)
3. LHCb collaboration, *Measurement of CP violation in the decay $B^+ \rightarrow K^+ \pi^0$* , Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 091802
4. LHCb collaboration, *Observation of the $B_s^0 \rightarrow D^{*\pm} D^{\mp}$ decay*, JHEP 03 (2021) 099
5. LHCb collaboration, *Observation of CP violation in two-body $B_{(s)}^0$ -meson decays to charged pions and kaons*, JHEP 03 (2021) 075
6. LHCb collaboration, *First observation of the decay $B_s^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu$ and measurement of $|V_{ub}|/|V_{cb}|$* , Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 081804
7. LHCb collaboration, *Observation of the $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ K^+ K^- \pi^-$ decay*, Phys. Lett. B815 (2021) 136172
8. LHCb collaboration, *Measurement of the CKM angle γ and B_s^0 – B_s^0 -bar mixing frequency with $B_s^0 \rightarrow D_s^{\mp} h^+ \pi^+ \pi^{\mp}$ decays*, JHEP 03 (2021) 137
9. LHCb collaboration, *Search for the rare decay $B^0 \rightarrow J/\psi \phi$* , Chin. Phys. C45 (2021) 043001
10. LHCb collaboration, *Study of $B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- K^+ K^-$ decays*, JHEP 02 (2021) 024
11. LHCb collaboration, *Observation of a new Ξ_b^0 state*, Phys. Rev. D103 (2021) 012004
12. LHCb collaboration, *Measurement of differential bb^- - and cc^- -dijet cross-sections in the forward region of pp collisions at $\sqrt{s}=13\text{TeV}$* , JHEP 02 (2021) 023
13. LHCb collaboration, *Measurement of the CKM angle γ in $B^\pm \rightarrow DK^\pm$ and $B^\pm \rightarrow D\pi^\pm$ decays with $D \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$* , JHEP 02 (2021) 169
14. LHCb collaboration, *Observation of multiplicity-dependent prompt $\chi_{c1}(3872)$ and $\psi(2S)$ production in pp collisions*, Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 092001
15. LHCb collaboration, *Search for CP violation in $D_{(s)}^+ \rightarrow h^+ \pi^0$ and $D_{(s)}^+ \rightarrow h^+ \eta$ decays*, JHEP 06 (2021) 019
16. LHCb collaboration, *Measurement of prompt-production cross-section ratio $\sigma(\chi_{c2})/\sigma(\chi_{c1})$ in pPb collisions at $s_{NN} = 8.16\text{TeV}$* , Phys. Rev. C103 (2021) 064905
17. LHCb collaboration, *Observation of the decay $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c1} p \pi^-$* , JHEP 05 (2021) 95
18. LHCb collaboration, *Angular Analysis of the $B^+ \rightarrow K^{*+} \mu^+ \mu^-$ Decay*, Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 161802
19. LHCb collaboration, *Evidence of a $J/\psi A$ structure and observation of excited Ξ^- states in the $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi A K^-$ decay*, Science Bulletin 66 (2021) 1278
20. LHCb collaboration, *Measurement of CP observables in $B^\pm \rightarrow D^{(*)} K^\pm$ and $B^\pm \rightarrow D^{(*)} \pi^\pm$ decays using two-body D final states*, JHEP 04 (2021) 081
21. LHCb collaboration, *Search for long-lived particles decaying to $e^\pm \mu^\mp \nu$* , Eur. Phys. J. C81 (2021) 261
22. LHCb collaboration, *Observation of a new excited D_s^+ meson in B^0 to $D^- D^+ K^+ \pi^-$ decays*, Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 122002
23. LHCb collaboration, *Search for heavy neutral leptons in $W^+ \rightarrow \mu^+ \mu^\pm$ jet decays*, Eur. Phys. J. C81, (2021) 248
24. LHCb collaboration, *Searches for 25 rare and forbidden decays of D^+ and D_s^+ mesons*, JHEP 06 (2021) 044

25. LHCb collaboration, *Measurement of the branching fraction of the $B^0 \rightarrow D_s^+ \pi^-$ decay*, Eur. Phys. J. C 81 (2021) 314
26. LHCb collaboration, *Observation of the Mass Difference Between Neutral Charm-Meson Eigenstates*, Phys. Rev. Lett. 127, 111801
27. LHCb collaboration, *Angular analysis of $B^0 \rightarrow D^- D_s^{*+}$ with $D_s^{*+} \rightarrow D_s^+ \gamma$ decays*, JHEP 06 (2021) 177
28. LHCb collaboration, *Measurement of CP asymmetry in $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$ decays*, Phys. Rev. D 104, L031102
29. LHCb collaboration, *Search for the doubly heavy baryons Ω_{bc}^0 and Ξ_{bc}^0 decaying to $\Lambda_c^+ \pi^-$ and $\Xi_c^+ \pi^-$* , Chin. Phys. C 45 093002
30. LHCb collaboration, *Search for CP violation in $D_{(s)}^+ \rightarrow h^+ \pi^0$ and $D_{(s)}^+ \rightarrow h^+ \eta$ decays*, JHEP 06 (2021) 019
31. LHCb collaboration, *Observation of new resonances decaying to $J/\psi K^+$ and $J/\psi \phi$* , Phys. Rev. Lett. 127 (2021) 082001
32. LHCb collaboration, *Observation of a $\Lambda_b^0 - \Lambda_b^0$ bar production asymmetry in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=7$ and 8TeV* , JHEP 10 (2021) 0601
33. LHCb collaboration, *Branching fraction measurements of the rare $B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ and $B_s^0 \rightarrow f_2'(1525) \mu^+ \mu^-$ decays*, Phys. Rev. Lett. 127 (2021) 151801
34. LHCb collaboration, *Search for time-dependent CP violation in $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ and $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ decays*, Phys. Rev. D 104, 072010
35. LHCb collaboration, *Search for the doubly charmed baryon Ω_{cc}^+* , Sci. China Phys. Mech. Astron. 64, 101062 (2021)
36. LHCb collaboration, *Search for CP violation in $\Xi_b^- \rightarrow p K^- K^-$ decays*, Phys. Rev. D 104, 052010
37. LHCb collaboration, *Precise measurement of the f_s/f_d ratio of fragmentation fractions and of B_s^0 decay branching fractions*, Phys. Rev. D 104, 032005

ССЫЛКИ

1. A. Augusto Alves Jr. et al., *The LHCb Detector at the LHC*, JINST (3) 2008 S08005.
2. A. Augusto Alves Jr. et al., *Performance of the LHCb muon system*, JINST (8) 2013 P02022
3. F.P. Albicocco et al., *Long-term and efficient operation of the MWPC muon detector at LHCb*, JINST (14) 2019 P11031, <http://arxiv.org/abs/1908.02178>
4. М.Э. Бузоверя, Г.Е. Гаврилов, О.Е. Маев, *ЖТФ* 91 (2) 375 (2021)
5. LHCb internal note LHCb-INT-2017-028
6. LHCb internal note LHCb-INT-2018-009
7. Alessio, F. et al.: *Readout Control Specifications for the Front-End and Back-End of the LHCb upgrade*. LHCb Technical Note, LHCb-INT-2012-018 (2012).
8. Moreira, P. et al.: *The GBT Project*. In: *Topical Workshop On Electronics For Particle Physics*, pp.342-346 (CERN-2009-006), Paris (2009)
9. Bocci, V.: *Architecture of the LHCb muon Front-End Control System upgrade*. In: *IEEE Nuclear Science Symposium*. San Diego (2015).
10. <http://www.fluka.org/>
11. LHCb collaboration, JHEP 10 (2021) 060
12. LHCb collaboration, JHEP 06 (2021) 019
13. LHCb collaboration, Phys. Rev. D 104, L031102
14. LHCb collaboration, Phys. Rev. D 104, 072010

15. LHCb collaboration, arXiv:2111.03327
16. LHCb collaboration, Sci.China Phys.Mech.Astron. 64, 101062 (2021)
17. LHCb collaboration, arXiv:2109.07292
18. LHCb collaboration, arXiv:2109.01334, Submitted to Science Bulletin
19. LHCb collaboration, Phys. Rev. Lett. 127, (2021) 111801
20. LHCb collaboration, JHEP 11 (2021) 043
21. LHCb collaboration, Phys. Rev. Lett. 127 (2021) 151801
22. LHCb collaboration, arXiv:2108.09283
23. LHCb collaboration, arXiv:2108.09284
24. LHCb collaboration, arXiv:2111.11339
25. LHCb collaboration, arXiv:2103.11769, Submitted to Nature Physics
26. LHCb collaboration, arXiv:2110.09501
27. LHCb collaboration, arXiv:2104.04421, Submitted to Nature Physics
28. LHCb collaboration, Phys. Rev. Lett. 127 (2021) 082001
29. LHCb collaboration, arXiv:2109.01038
30. LHCb collaboration, arXiv:2109.01056
31. LHCb collaboration, arXiv:2110.04497