



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА»
ФИЛИАЛ МГУ В Г.ДУБНЕ

НАПРАВЛЕНИЕ 03.04.02 «ФИЗИКА»
ПРОФИЛЬ «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАТОДНО-СТРИПОВЫХ КАМЕР ПЕРЕДНЕЙ СТАНЦИИ ТОРЦЕВОЙ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА CMS

Студент:

Научный руководитель:

Научный консультант:

Козлов Дмитрий Николаевич

д. ф.-м. н. Ольшевский Александр Григорьевич

д. т. н. Каржавин Владимир Юрьевич

18.06.2026

Дубна



Мотивация и актуальность



Компактный мюонный соленоид (**CMS**) – один из двух экспериментов общего назначения на Большом адронном коллайдере (БАК) ЦЕРНа (LHC CERN).

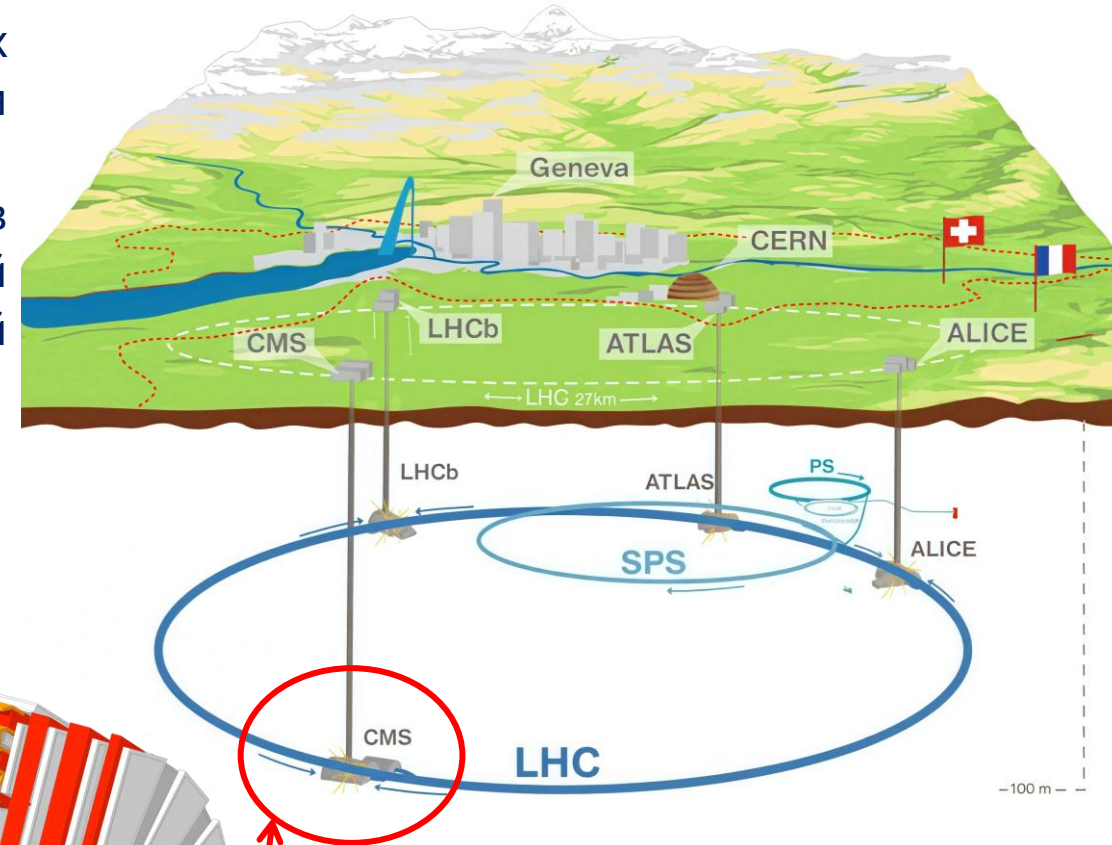
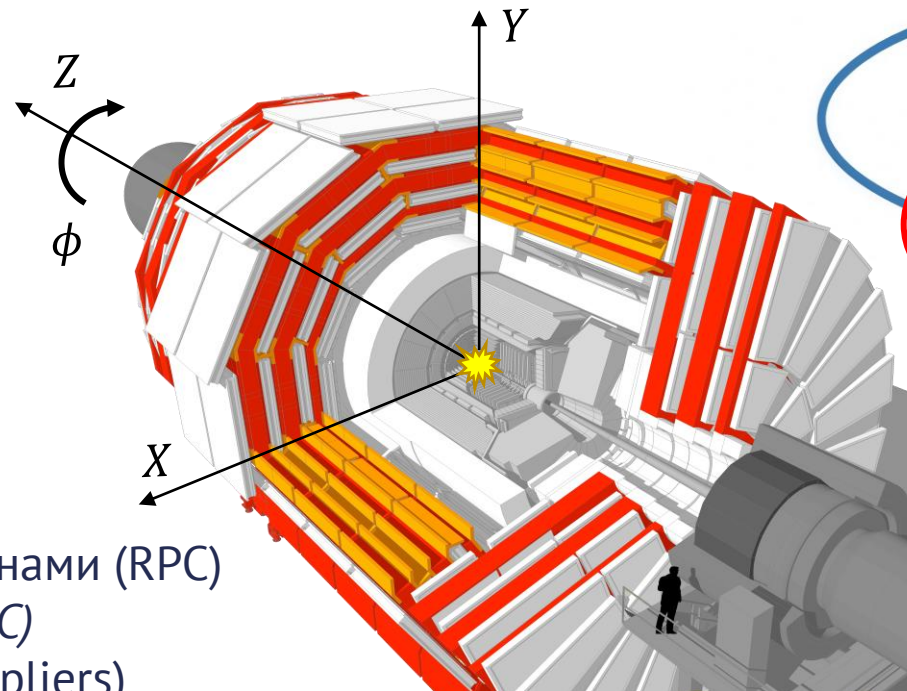
Физическая программа CMS включает изучение свойств бозона Хиггса, прецизионную проверку выводов Стандартной модели (СМ), а также поиск доказательств существования новой физики за пределами СМ.

Основные подсистемы детектора CMS:

1. Трекер
2. Электромагнитный калориметр
3. Предливневый детектор
4. Сверхпроводящий соленоид.
5. Адронный калориметр

6. Мюонная система:

- Дрейфовые камеры (DT)
- Камеры с резистивными пластинами (RPC)
- Катодно-стриповые камеры (CSC)
- Камеры GEM (Gas Electron Multipliers)



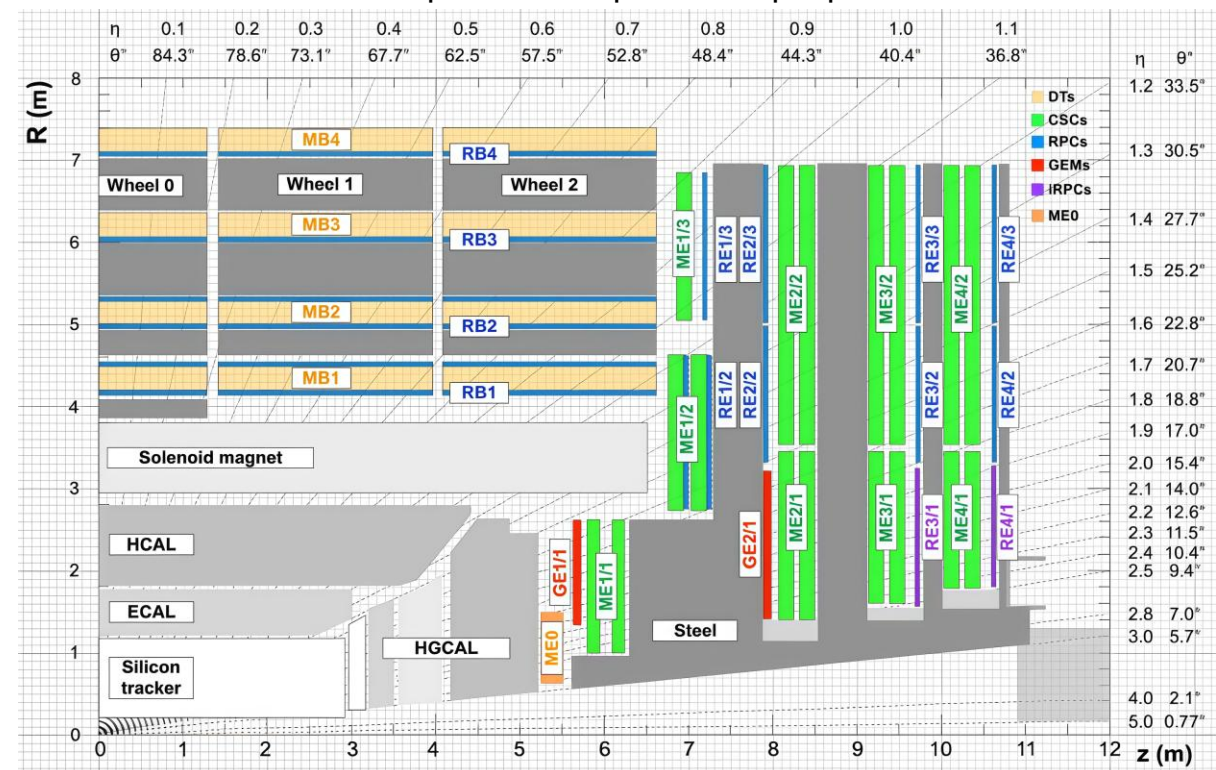
Общая масса:	14 тыс. т
Диаметр:	15.0 м
Длина:	28.7 м
Магнитное поле:	3.8 Тл



Мотивация и актуальность



Четверть детектора CMS в разрезе



Основные характеристики CSC ME1/1:

- Хорошее пространственное разрешение ~ 50 мкм
- Хорошее временное разрешение ~ 3-5 нс
- Точное сопоставление координат с внутренним трекером
- Запуск в области псевдобыстрот η ($1,6 < \eta < 2,4$)

CMS Collaboration. Performance of CMS endcap muon CSC and GEM detector in 2025: CMS Detector Performance Note. – Geneva : CERN, 2024. – (CMS DP-2025/060).

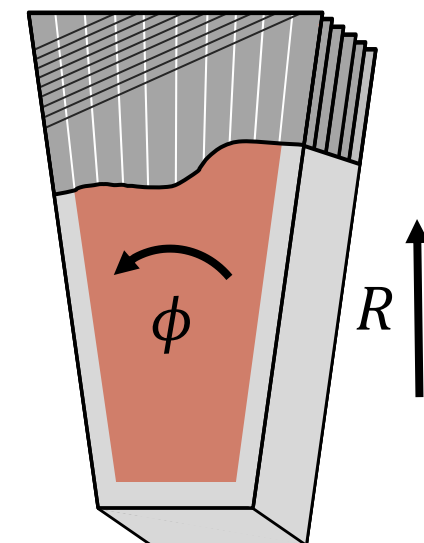
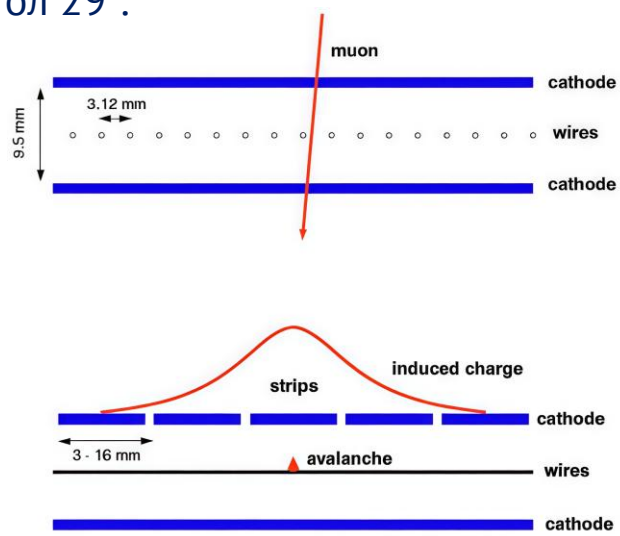
Катодно-стриповые камеры являются одним из основных

детекторов торцевой мюонной системы, обеспечивая детектирование мюонов и запуск триггера.

CSC формируют 4 мюонные станции в каждой торцевой части. Станции, в свою очередь, состоят из колец, образованных 36 или 18 трапецевидными CSC, обозначаемыми как MEx/y, где x обозначает номер станции, а y – номер кольца.

Каждая CSC состоит из 6 слоев и работает как стандартная многопроволочная пропорциональная камера (MWPC). Газовая смесь: 40%Ar + 50%CO₂ + 10%CF₄.

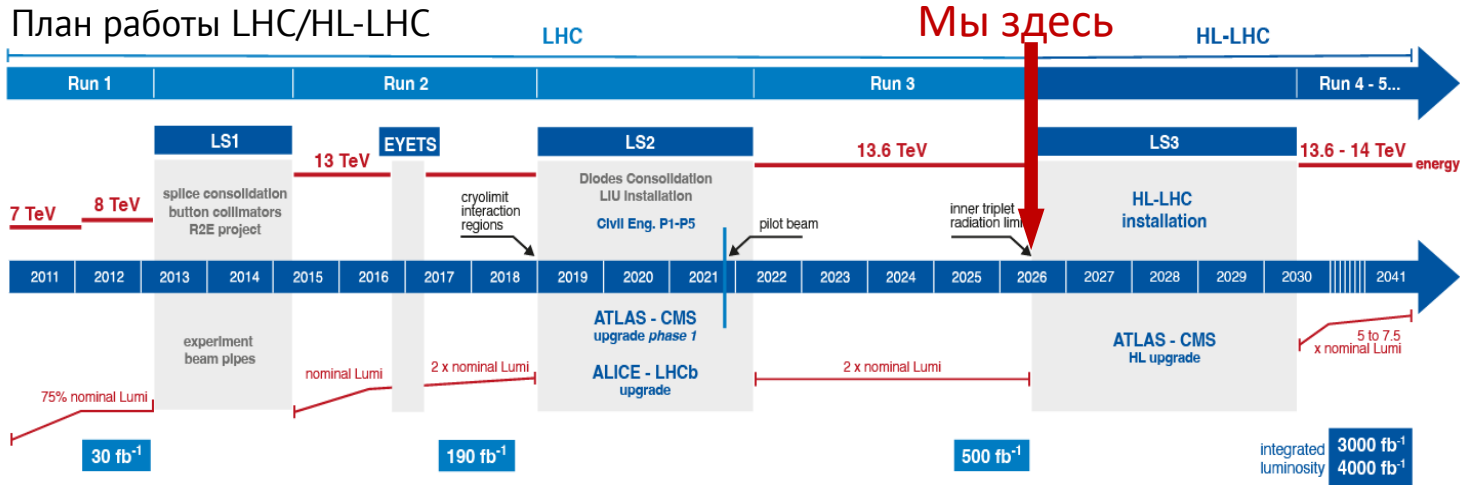
Для компенсации действие силы Лоренца и улучшения пространственного разрешения в камерах ME1/1 анодные проволоки повернуты по отношению к центральному стрипу на угол 29°.





Цель и задачи

План работы LHC/HL-LHC



Усложнение условий работы в режиме высокой светимости LHC (HL-LHC)	LHC CMS Фаза 1	HL-LHC CMS Фаза 2
Мгновенная светимость ($\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$)	10^{34}	5×10^{34}
Интегральная светимость (фб^{-1})	300	3000
Пайлап	30	~200
Частота триггера (кГц)	100	750
Задержка триггера (мкс)	3.6	12.4

Экстремальные условия работы детекторов CMS в режиме HL-LHC могут приводить к ухудшению рабочих характеристик CSC.

Актуальность: необходимость экспериментального подтверждения долговременной стабильности рабочих характеристик катодно-стриповых камер ME1/1 эксперимента CMS в условиях, максимально приближенных к эксплуатации в режиме работы коллайдера с высокой светимостью (HL-LHC).

Цель: экспериментальное исследование характеристик катодно-стриповых камер детектора CMS в условиях интенсивного гамма-облучения на установке GIF++ с акцентом на мониторинг стабильности газового усиления для оценки эффектов радиационной деградации, и прогнозирования работоспособности детекторов в период эксплуатации HL-LHC.

- Задачи:**
- Описание конструкции и принципов работы CSC эксперимента CMS, физических механизмов старения газовых детекторов.
 - Участие в проведении сеансов измерений на установке GIF++ по экспериментальному исследованию радиационной стойкости CSC, а также измерение зависимости основных рабочих характеристик камер от накопленного заряда.
 - Анализ экспериментальных данных, полученных в период с 2016 по 2025 год при исследовании CSC с различными газовыми смесями. Оценка заряда накопленного на CSC за весь период работы эксперимента CMS.
 - Формулировка выводов о степени деградации характеристик CSC под воздействием ионизирующего излучения.



Эффекты радиационно-индуцированной деградации



Радиационно-индуцированная деградация (старение) представляет собой критическую проблему, обусловленную высокой светимостью современных ускорителей и, как следствие, интенсивным ионизирующим излучением.

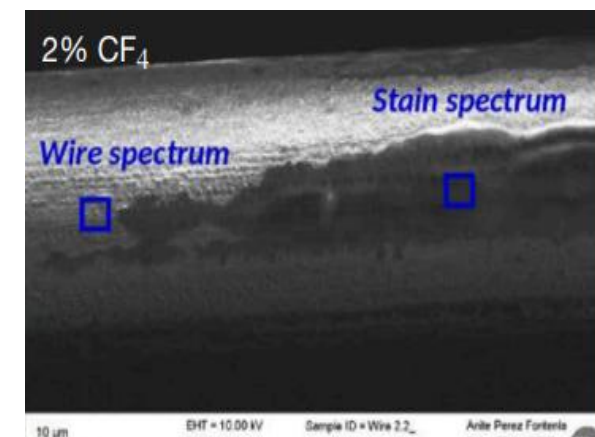
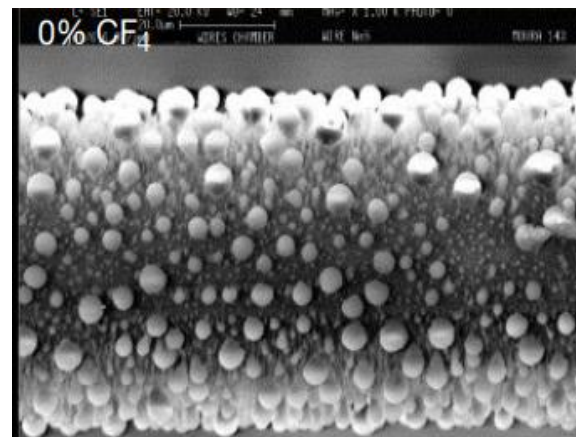
Из-за лавинного характера газового усиления CSC в объеме газа может происходить образование химически активных ионов или радикалов, что приводит к модификации поверхностей электродов, например, из-за отложения полимеров.

Последствия:

- Возникновение коронных и искровых зарядов
- Появление эффекта Мальтера
- Увеличение темнового тока.
- Значительное снижение газового усиления.
- Ухудшение пространственного разрешения.

Одним из наиболее важных типов старения является образование кремнийсодержащих отложений на анодных проволоках, что приводит к увеличению их диаметра и, следовательно, к снижению газового усиления.

Использование CF_4 предотвращает отложение кремния на проводах за счет образования газообразного SiF_4 ($4\text{F}\cdot + \text{Si}$).



Регламент ЕС по фторсодержащим газам предусматривает сокращение объемов продаж газов с высоким потенциалом глобального потепления (CF_4 , GWP ~7000)

Тесты с источником ^{90}Sr показали ухудшение газового усиления в 2 раза при заряде 250 мКл/см без использования в газовой смеси CF_4 . Причина – образование кремниевых депозитов на проволоке.

Было показано, что при содержании CF_4 в газовой смеси менее 5% приводит к образованию углеродных депозитов при накопленном заряде 300 мКл/см.

Мониторинг газового усиления является одним из ключевых параметров при проведении испытаний на радиационную стойкость.



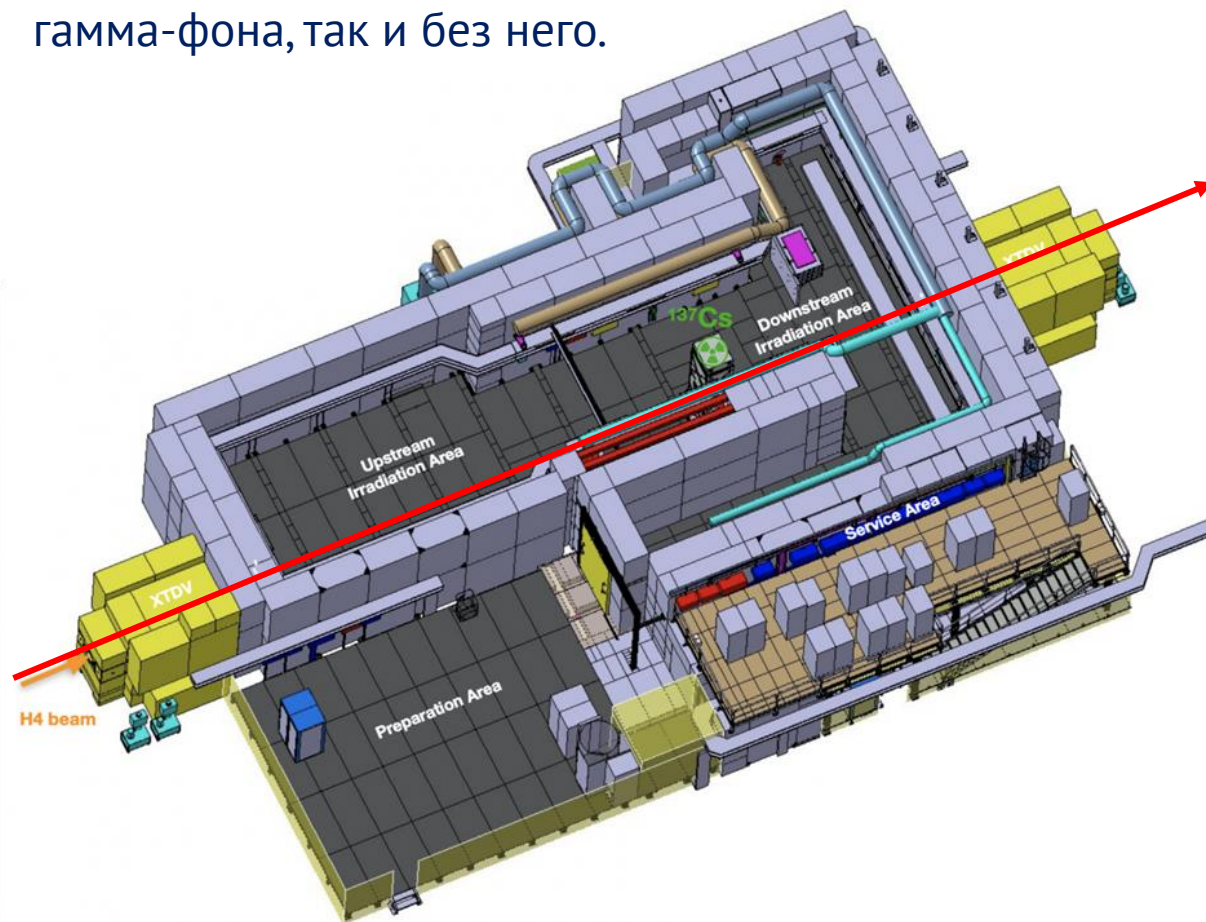
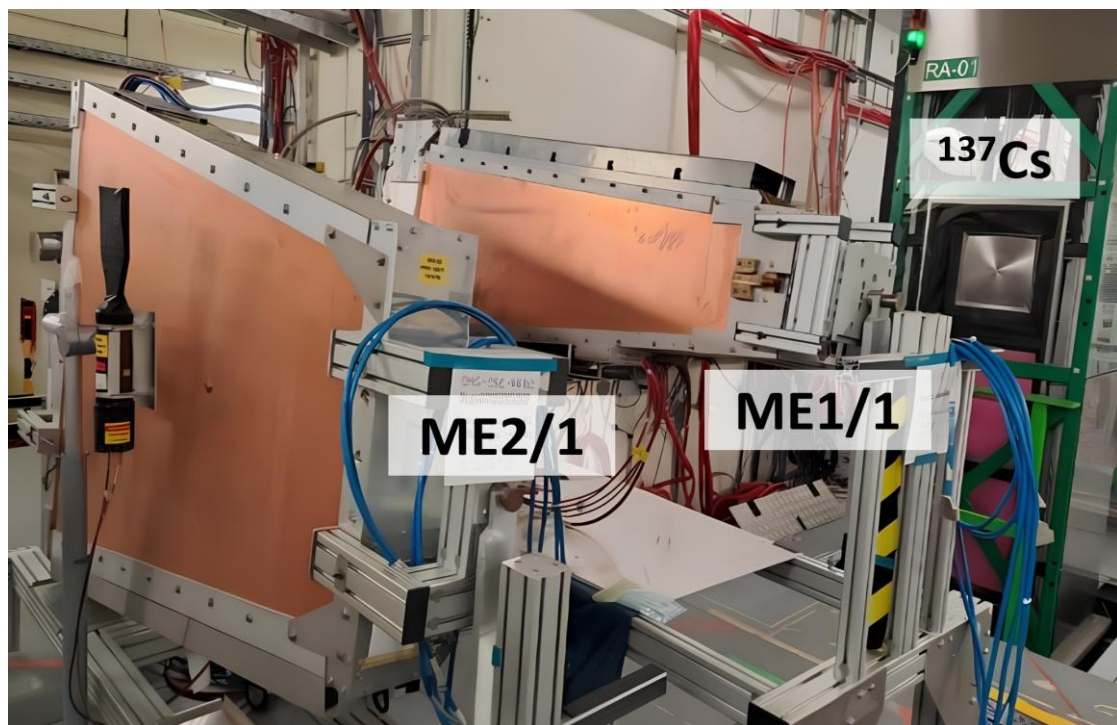
Исследование эффектов старения на установке GIF++



В 2016 году были начаты исследования долговечности камер CSC в условиях HL-LHC с использованием двух типов детекторов – ME1/1 и ME2/1. Эти камеры различаются по конструкции и расположены в передней (торцевой) области CMS, где они работают при высоком уровне фона.

Исследования долговременной работы проводятся на установке GIF++ в ЦЕРН как с рабочей газовой смесью для CSC, так и со смесью с пониженным содержанием CF_4 .

Установка GIF++ позволяет облучать детекторы интенсивным источником гамма-квантов на основе ^{137}Cs и выполнять уникальные измерения с использованием мюонного пучка – как в присутствии гамма-фона, так и без него.



источник ^{137}Cs ($E_\gamma = 662 \text{ keV}$), 14 TBq



Исследование стабильности газового усиления



Анализ данных посвящён исследованию стабильности газового усиления CSC в зависимости от накопленного заряда, при облучении на установке GIF++.

Накопленный заряд на единицу длины определяется как интеграл по времени высоковольтного тока в слое камеры, деленный на общую длину проволок в этом слое.

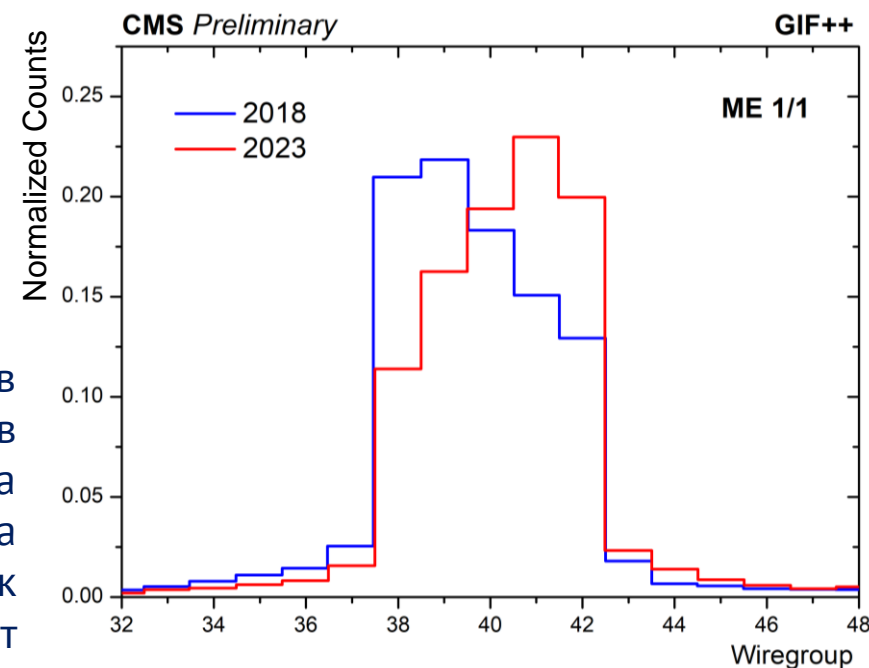
Методика измерений (2016–2025 гг.)

- Облучение проводилось непрерывно, а тестовые измерения выполнялись в специально отведенные периоды для испытаний на мюонных пучках.
- Во время облучения на два из шести слоев не подавалось высокое напряжение и они служили в качестве референсных..
- В течение 10-летнего периода использовались 3 различные газовые смеси с различным содержанием CF_4 . Изменения газовых смесей были вызваны лабораторными исследованиями, направленными на снижение содержания CF_4 для работы HL-LHC.

Исследования характеристик камер с использованием мюонных пучков проводились без фонового излучения от ^{137}Cs , используя совпадение сигналов сцинтиллятора для запуска считывания CSC. Положение сцинтиллятора выравнивалось таким образом, чтобы для каждого измерения выбиралась одна и та же область CSC размером 15×15 см². На графике показана загрузка группы проволок ME1/1 в мюонном пучке для разных периодов набора данных. График демонстрирует воспроизводимость юстировки и иллюстрирует изменение профиля пучка.

Накопленный на CSC заряд в различные периоды облучения на GIF++

CSC	Accumulated charge Q (mC/cm)				
	before 2018 (10% CF ₄)	November 2021 (2% CF ₄)	November 2025 (5% CF ₄)	Total	Expected at HL-LHC (3000 fb ⁻¹)
ME1/1	330	370	450	1150	400
ME2/1	310	Not irradiated	710	1020	220
Period	I	II	III (ongoing)		





Мониторинг газового усиления



Заряд, измеренный на стрипах CSC, пропорционален:

$$Q \sim E_{ionization} \times G$$

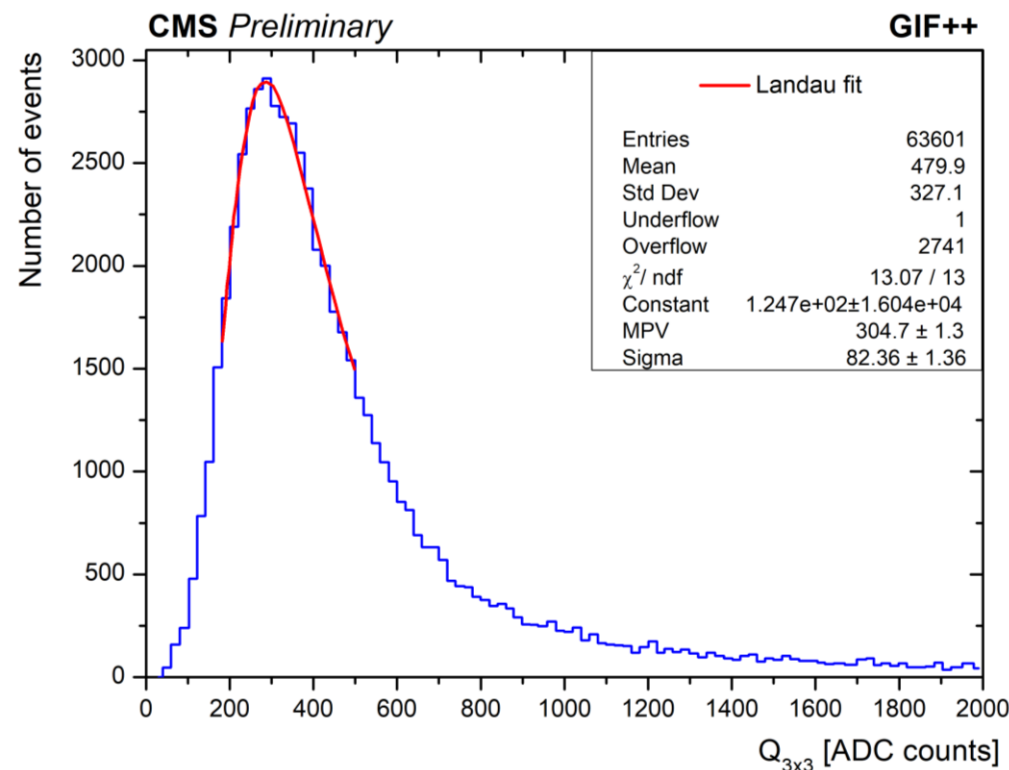
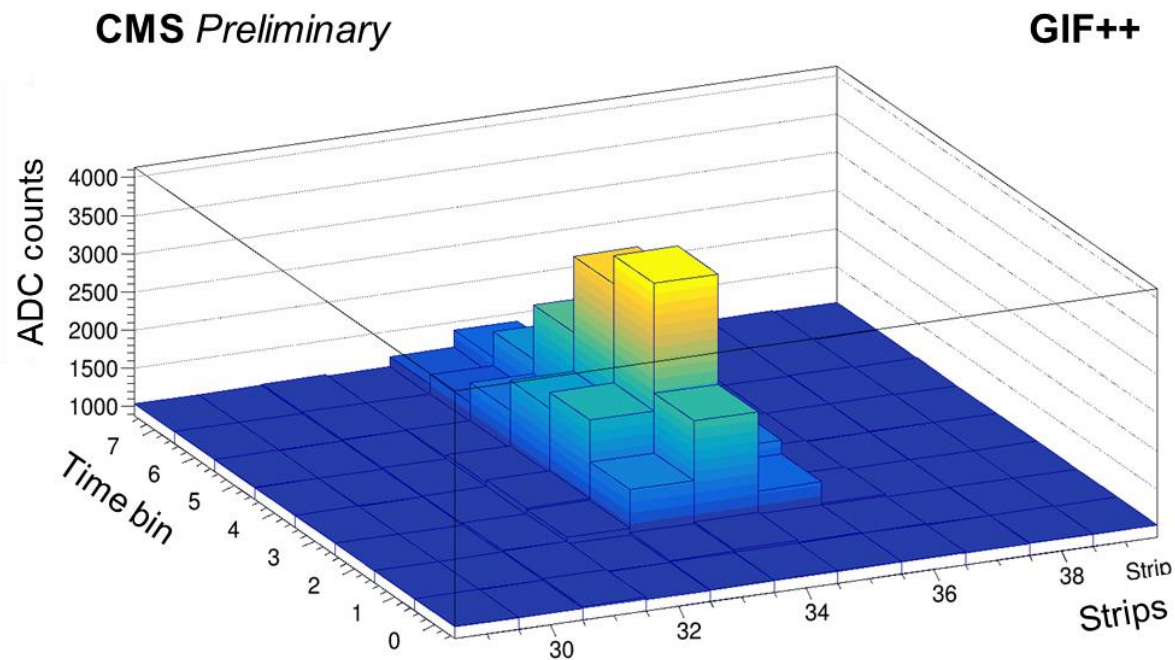
где $E_{ionization}$ ионизационные потери энергии мюонов и G коэффициент газового усиления. Для заданной электроники и состава газа распределение заряда, измеренное с помощью высокоэнергетических мюонов, позволяет контролировать газовое усиление.

Катодная электроника непрерывно интегрирует заряды на отдельных стрипах в течение 50 нс временных интервалов.

Интегрирование индуцированного заряда $Q_{3 \times 3}$ выполнялось путём суммирования сигналов с трёх смежных стрипов во временном окне 150 нс.

Спектр $Q_{3 \times 3}$ аппроксимируется распределением Ландау для извлечения наиболее вероятного значения (MPV).

Значение MPV используется в качестве показателя газового усиления.





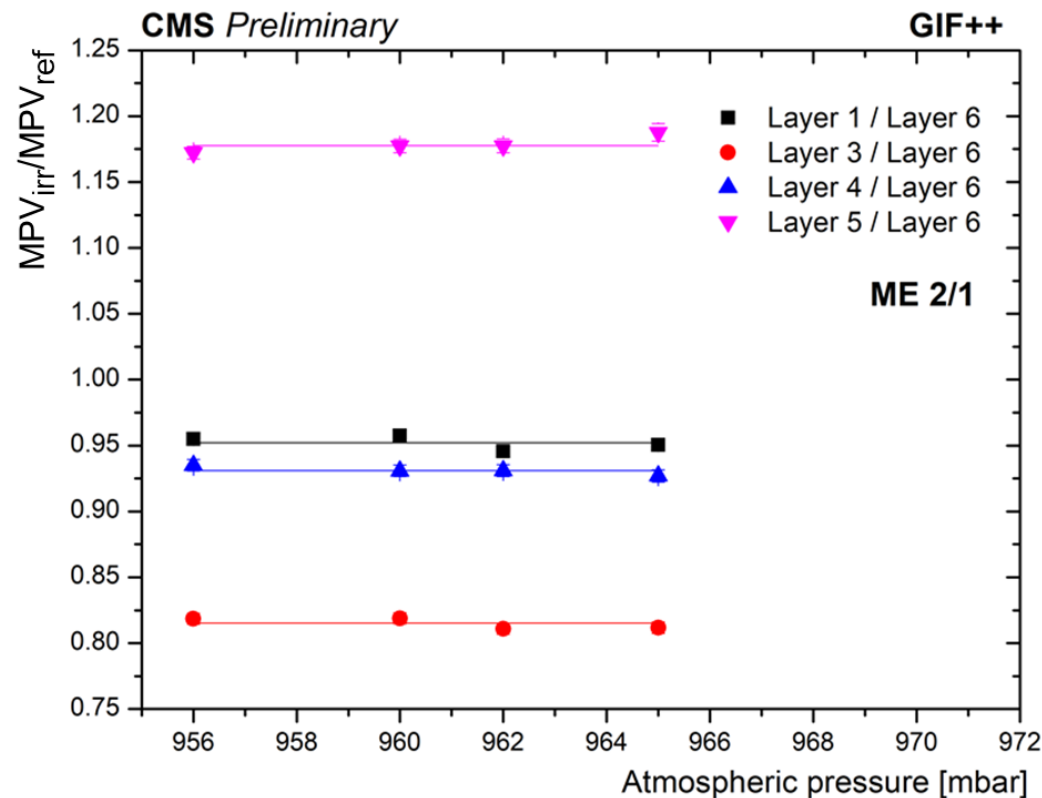
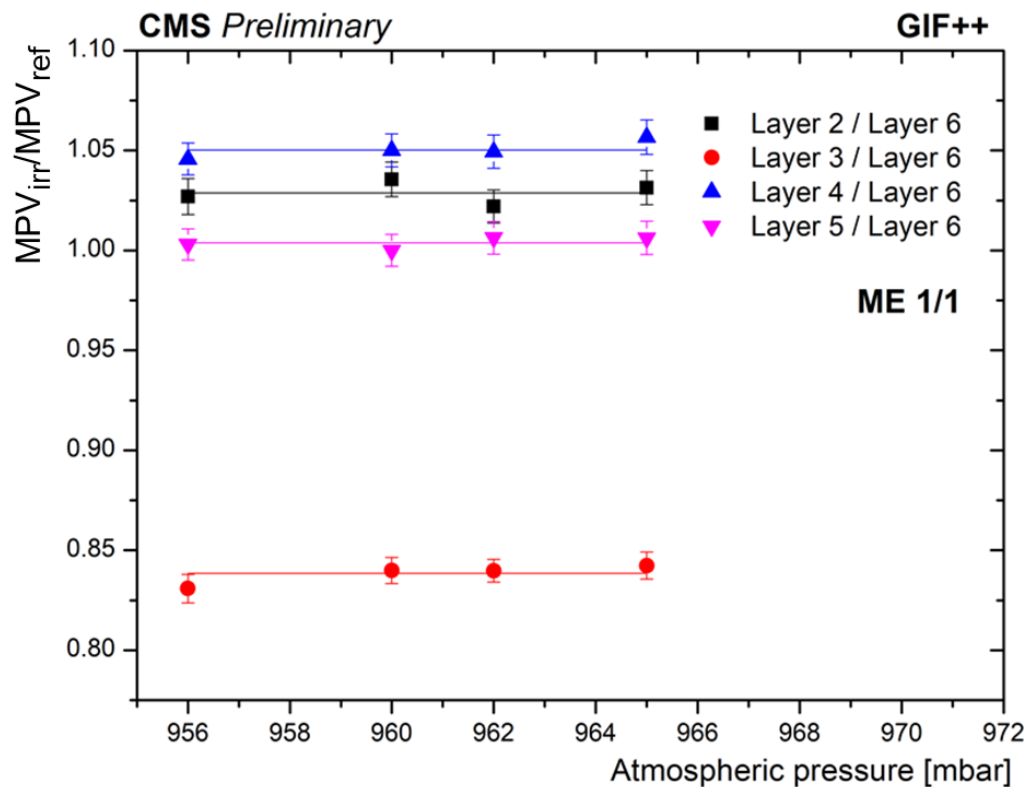
Уменьшение зависимости газового усиления от давления и температуры газовой смеси



Величина газового усиления зависит от давления и температуры газа. Для минимизации этой зависимости было принято решение нормировать измеренные величины MPV облученных слоев, на которые подавалось высокое напряжение во время облучения MPV_{irr} на значение MPV референсного слоя MPV_{ref} (слой 6), на который высокое напряжение не подавалось, то есть: $MPV_{norm} = MPV_{irr} / MPV_{ref}$

В качестве примера ниже представлены графики нормированного значения MPV_{norm} в зависимости от атмосферного давления для ME1/1 (слева) и для ME2/1 (справа) с использованием данных за апрель 2024 года.

Это отношение не зависит от атмосферного давления.



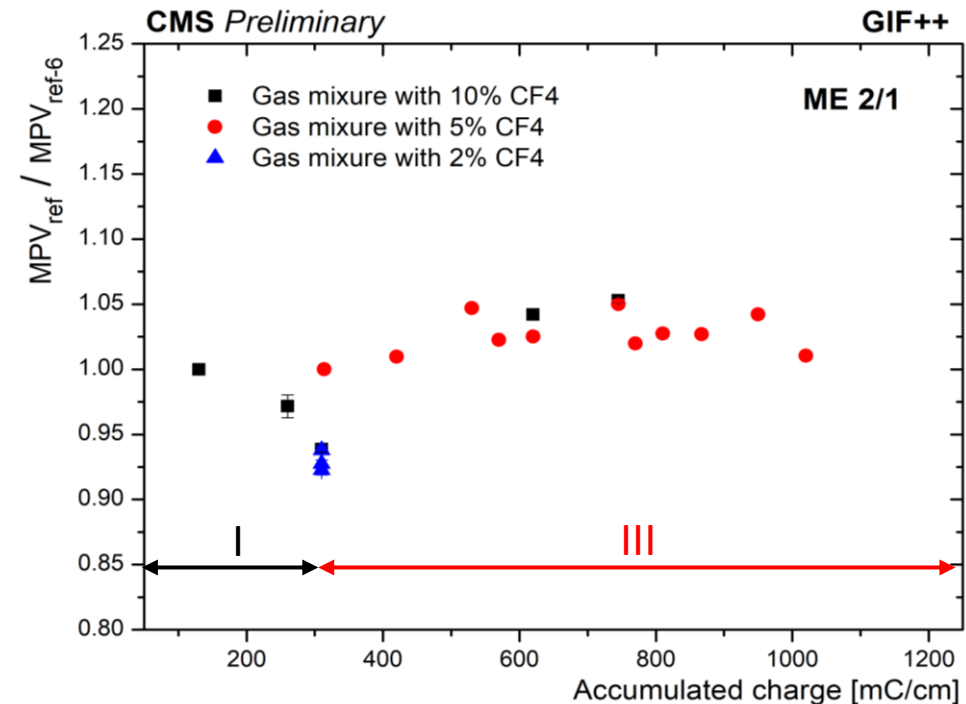
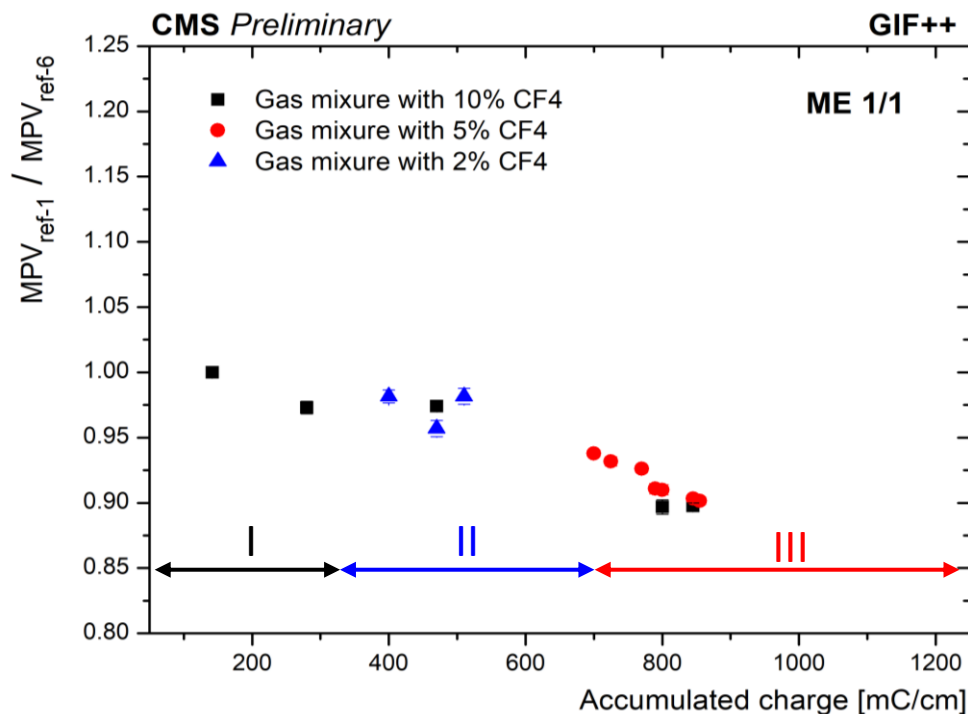


Оценка систематической неопределенности



На графиках показана зависимость отношения наиболее вероятного значения (MPV) для двух референсных слоёв от накопленного заряда в облучённых слоях. Измерения выполнялись на протяжении 9 лет. Периоды I, II и III соответствуют времени облучения детекторов при работе с различным содержанием CF_4 в газовой смеси (10%, 2% и 5% соответственно). Измерения характеристик детекторов проводились между сеансами облучения с использованием пучка мюонов. Основные источники систематической неопределённости – вариации параметров мюонного пучка и влияние внешних условий; их вклад оценивается с помощью референсных слоёв.

Все результаты нормированы на первоначальное измерение (принятое за 1). Для камеры ME2/1 использовались два набора референсных слоёв: слои 1 и 6 для периода I и слои 2 и 6 для периода III; нормировка применялась отдельно для каждого из этих периодов. Изменение нормированного значения MPV для референсных слоёв составило 10% для ME1/1, а также 8% и 5% для ME2/1 в периоды I и III соответственно.



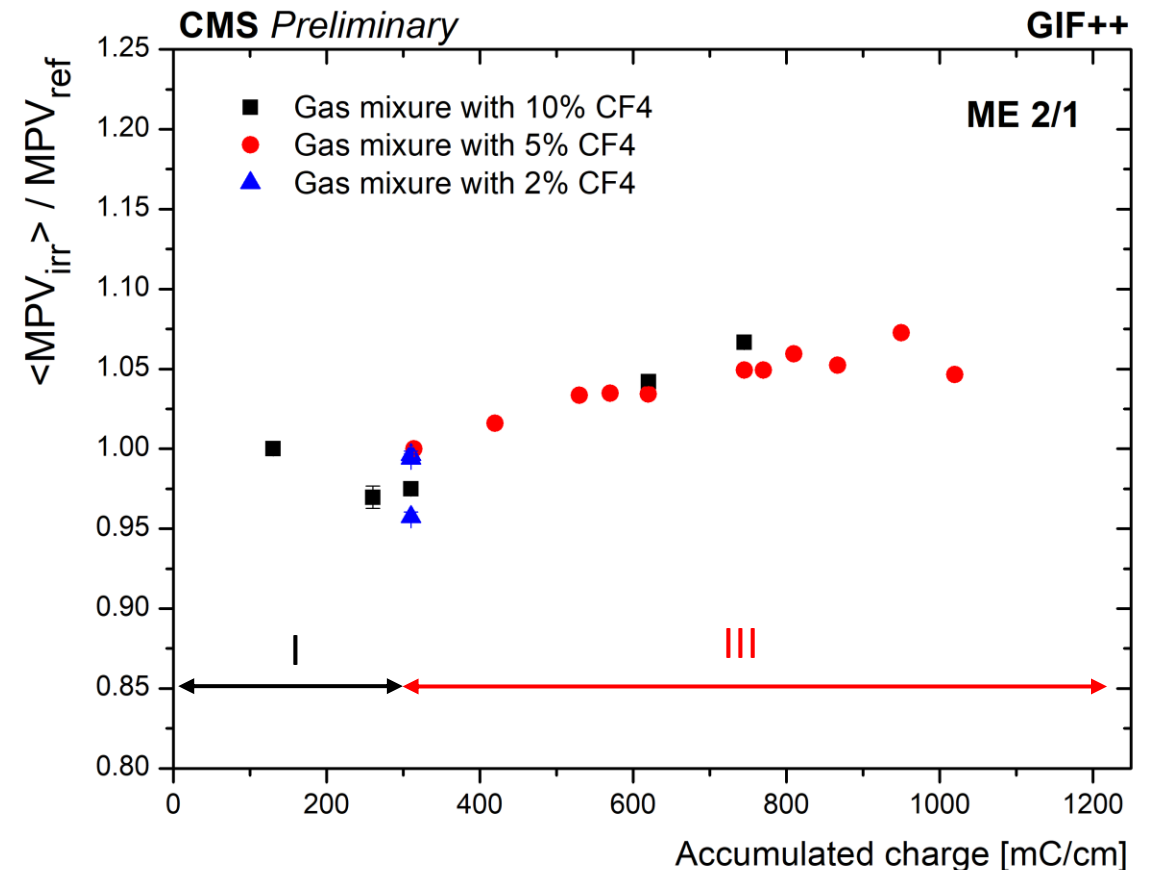
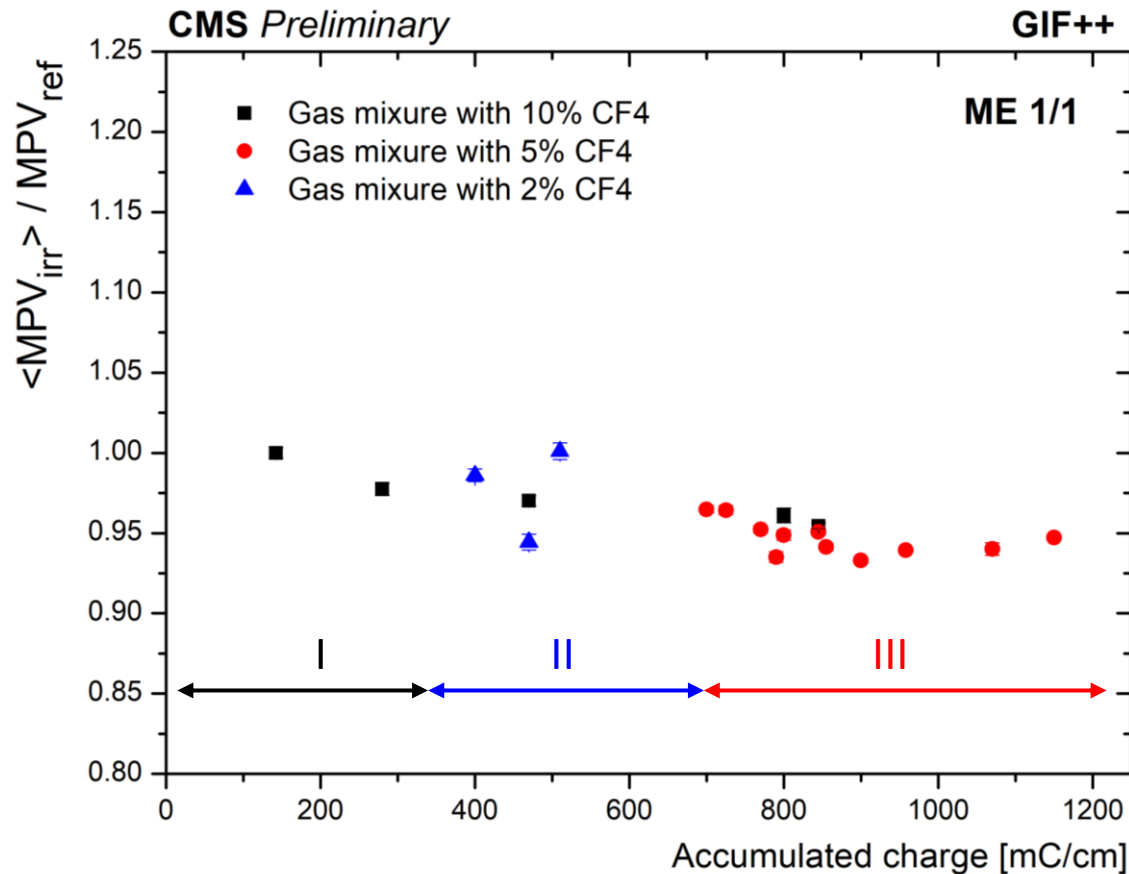


Относительное газовое усиление в зависимости от накопленного заряда



На графиках показано отношение среднего нормированного газового усиления для четырех облученных слоев в зависимости от накопленного заряда на анодных проволоках.

Нормированное значение газового усиления демонстрируют отсутствие ухудшения газового усиления вплоть до накопленного заряда 1150 мКл/см для ME1/1 и 1020 мКл/см для ME2/1.

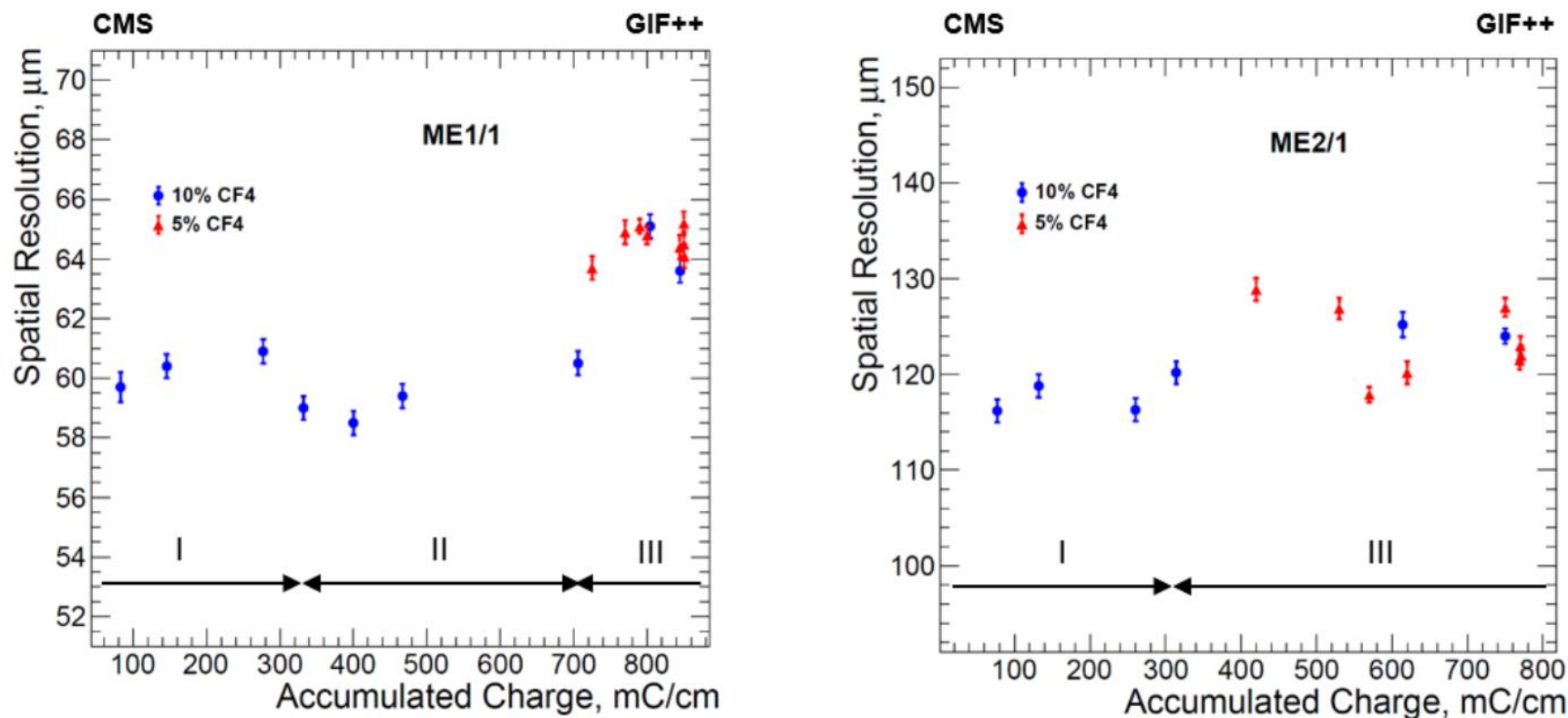




Пространственное разрешение в зависимости от накопленного заряда на анадных проволоках



Предыдущие исследования* радиационной стойкости катодно-стриповых камер на установке GIF++ были основаны на изучении пространственного разрешения как функции накопленного заряда. В течение всего периода облучения до заряда 700 мКл/см² для ME1/1 не наблюдалось существенного ухудшения пространственного разрешения. Незначительное ухудшение разрешения ME1/1 в период III (2023-2024 гг.) будет исследовано дополнительно. Ошибки носят статистический характер. Систематическая неопределенность оценивается как ± 2 мкм для ME1/1 и $\pm 3-4$ мкм для ME2/1. **Признаков радиационного старения детекторов выявлено не было.**



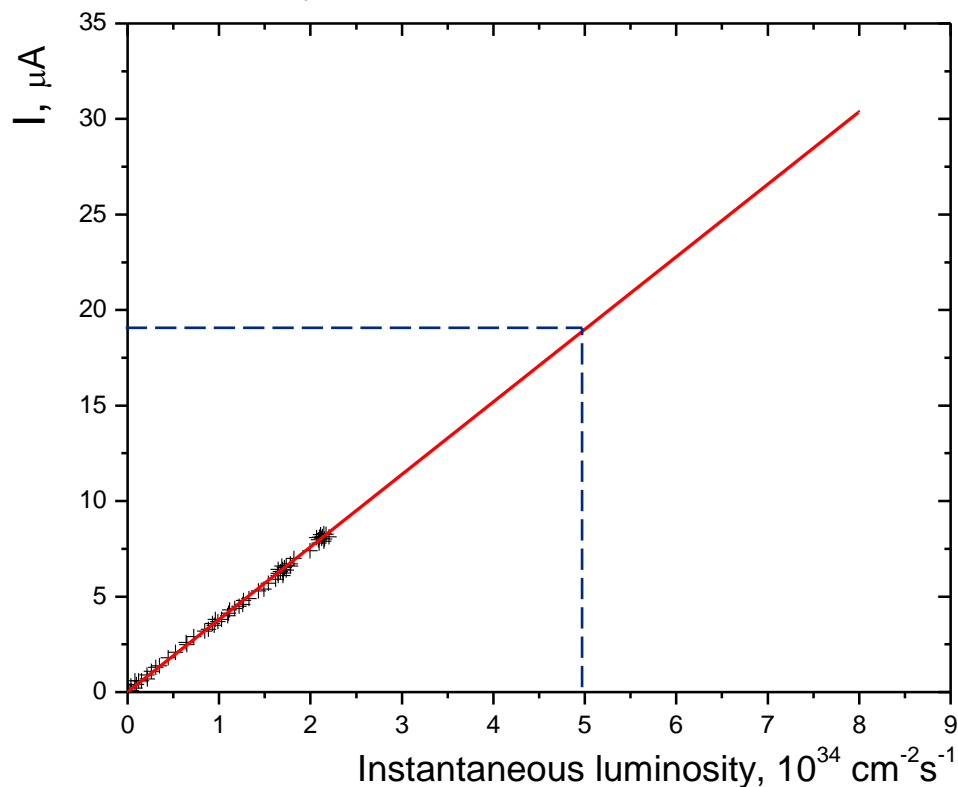
* E. V. Kuznetsova, V. V. Palichik, and V. V. Perelygin. CMS CSC Longevity Study. Physics of Atomic Nuclei, 2025, Vol. 88, No. 5, pp. 973–977.



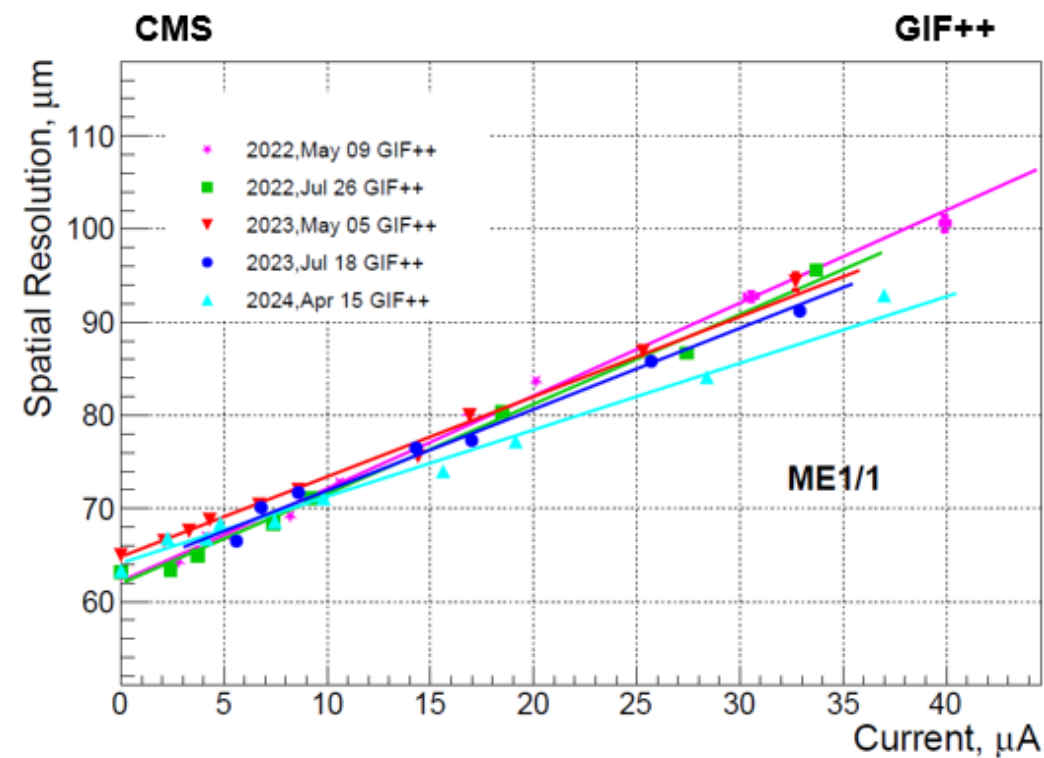
Оценка пространственного разрешения при увеличении светимости БАК



Для того чтобы определить токи на камерах ME1/1 в условиях роста светимости LHC, по данным CMS была получена линейная зависимость тока от мгновенной светимости. Экстраполируя эту линейную зависимость на проектные значения мгновенной светимости HL-LHC, получаем оценочное значение тока на камерах передней мюонной станции ~19 мкА.



Пространственное разрешение для ME1/1 CSC как функция тока на камере. Измерения проводились с помощью пучка мюонов и источника ^{137}Cs на установке GIF++



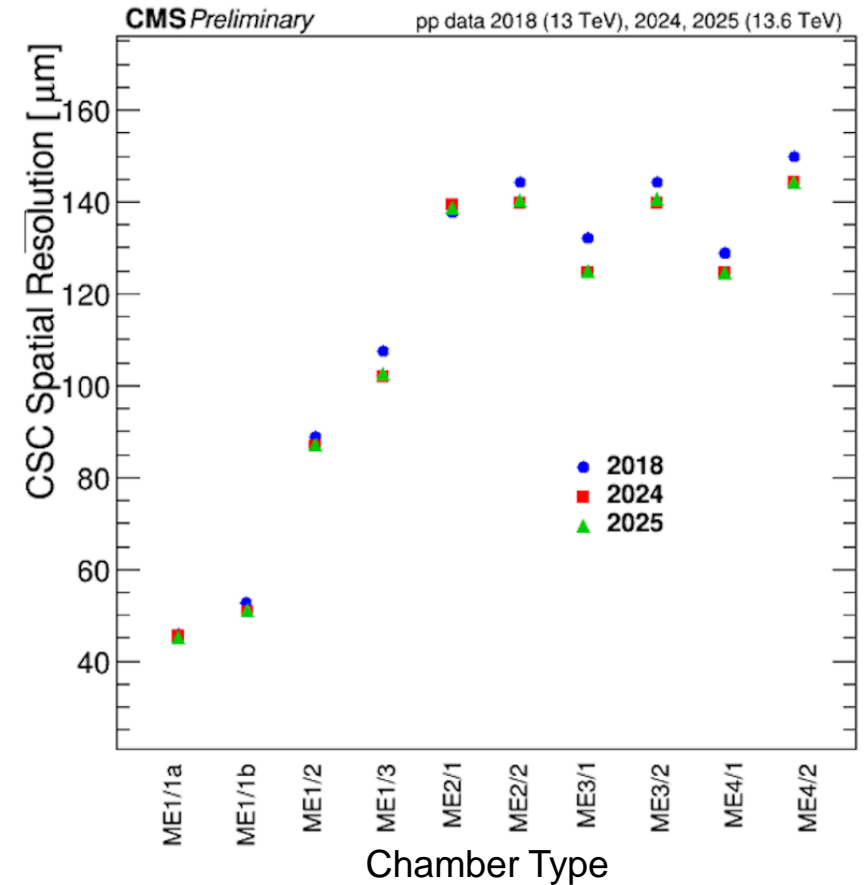
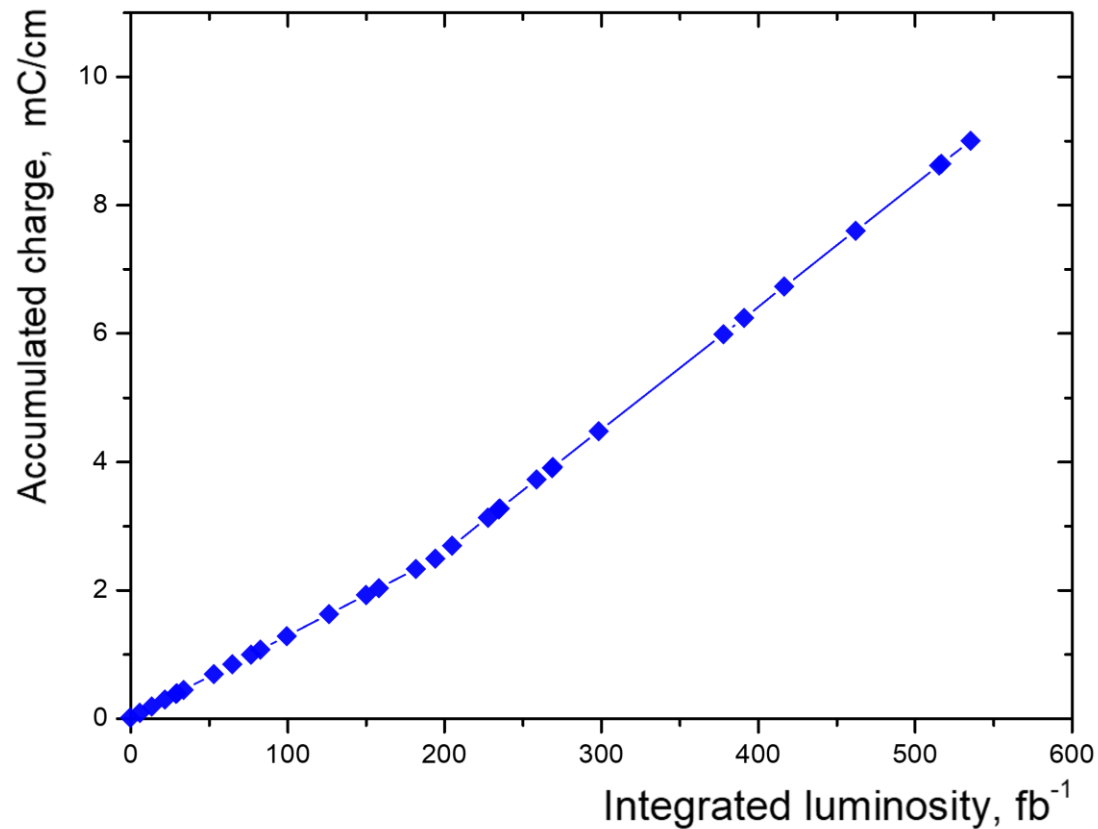
Если мгновенная светимость возрастет до $\sim 5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, то пространственное разрешение для катодно-стриповых камер ME1/1 снизится до ~ 75 мкм (проектного значения)



Оценка накопленного заряда на проволоках камер ME1/1 работающих на эксперименте CMS с 2010 по 2026 годы



Используя информацию о токах на камерах ME1/1, была получена зависимость накопленного заряда от интегральной светимости (слева). Заряд накопленный на единицу длины анодной проволоки за все время эксплуатации катодно-стриповых камер передней станции ME1/1 составил ~ 10 мКл/см.



Величины пространственного разрешения, полученные при анализе данных, набранных в разные годы (справа) указывают на отсутствие эффектов старения камер ME1/1 вплоть до накопленного заряда ~ 10 мКл/см

Апробация результатов

Результаты, представленные в диссертационной работе, прошли апробацию на семинарах Московского государственного университета, рабочих совещаниях коллаборации CMS, а также на всероссийских и международных научных конференциях:

1. **XVI Международная школа-конференция «Актуальные проблемы физики микромира»** (ИЯП БГУ, Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, 25–31 августа 2025 г.).
2. **Международная конференция по физике высоких энергий SHEP-Yerevan-2025** (Национальная научная лаборатория им. А. Алиханяна, г. Ереван, Армения, 29 сентября – 3 октября 2025 г.)
3. **Сессия-конференция Секции ядерной физики Отделения физических наук Российской академии наук «Физика фундаментальных взаимодействий»** (ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, 10–13 марта 2026 г.)
4. **V Всероссийская школа-конференция «Фундаментальная физика и прикладные технологии»** (Государственный университет «Дубна», Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия, 6–9 апреля 2026 г.).
5. **64-я сессия Программно-консультативного комитета ОИЯИ по физике частиц** (ОИЯИ, Дубна, 15 июня 2026 г.)

Основные положения магистерской диссертации отражены в статье **«LONGEVITY STUDIES OF THE CMS CATHODE STRIP CHAMBERS WITH GIF++ FACILITY»**, которая готовится к публикации в журнале "Physics of Atomic Nuclei"



Основные результаты работы:

- **Подтверждена долговременная стабильность газового усиления катодно-стриповых камер ME1/1 и ME2/1** при величине заряда, накопленном на единицу длины анодной проволоочки, 1150 и 1020 мКл/см соответственно, что существенно превышает ожидаемую величину за весь период работы HL-LHC (~400 мКл/см).
- **Признаков радиационного старения** (падения газового усиления, роста темновых токов, ухудшения разрешения) в исследованном временном диапазоне **не выявлено**. Небольшое ухудшение разрешения в период с 2023 по 2024 год не носит критического характера и требует дополнительного анализа
- **Снижение содержания CF₄ в газовой смеси с 10% до 5%** (в соответствии с экологическими ограничениями) **не приводит к катастрофической деградации** рабочих характеристик камер при зарядах, соответствующих работе детекторов в период HL-LHC.
- На основе данных CMS **установлена линейная зависимость тока камер ME1/1 от мгновенной светимости**. Экстраполяция на проектные значения HL-LHC ($5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) даёт прогнозируемое **пространственное разрешение ~75 мкм**, что соответствует проектным требованиям.
- **Отсутствие старения CSC в CMS**: Анализ данных CMS за 2010–2026 гг. (**накопленный заряд ~10 мКл/см**) не выявил признаков радиационной деградации камер.



Заключение



Экспериментально подтверждено, что катодно-стриповые камеры ME1/1 будут способны поддерживать стабильную и долговременную работу при работе коллайдера в режиме с высокой светимостью HL-LHC. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации состава рабочей газовой смеси и оптимизации значений высокого напряжения на CSC камерах эксперимента CMS.

Личный вклад

- Полный цикл обработки экспериментальных данных: от восстановления спектров заряда $Q_{3 \times 3}$ до оценки систематических неопределённостей и вычисления накопленного заряда на анодных проволоках CSC камер.
- Участие в разработке методики мониторинга газового усиления (MPV + нормировка на давление и температуру).
- Установление зависимости накопленного заряда от интегральной светимости БАК для CSC передней станции торцевой мюонной системы мюонной CMS.
- Вычисление накопленного заряда на анодных проволоках камер ME1/1 передней мюонной станции.

The image shows a vast, dimly lit industrial interior, possibly a particle accelerator tunnel. The central focus is a long, narrow passage lined with complex machinery and structural elements. On the right side, there are large, cylindrical components with labels such as 'BEARE-1202', 'BEARE-1203', and 'BEARE-1236'. The floor is concrete, and a yellow crane or lift is visible in the distance. The overall atmosphere is technical and industrial.

Спасибо за внимание!