



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2025–7

И.Л. Ажгирей, И.С. Байшев, И.А. Курочкин, О.В. Суманеев

**Прогнозирование радиационных полей
в эксперименте CMS на БАК**

Протвино 2025

Аннотация

Ажгирей И.Л. и др. Прогнозирование радиационных полей в эксперименте CMS на БАК: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2025–7. – Протвино, 2025. – 40 с., 10 рис., 1 табл., библиогр.: 87.

Излучение приводит к потере эффективности измерений в физических экспериментах на ускорителях. Надежные прогнозы поля излучения играют решающую роль в планировании, проведении и разработке экспериментов. Такие прогнозы могут быть получены только путем полномасштабного математического моделирования поля излучения методом Монте-Карло. Это требует создания и поддержки модели эксперимента, а также выбора соответствующего программного обеспечения для проведения расчетов. Кроме того, необходимо по возможности контролировать уровни излучения во время эксперимента для верификации и валидации результатов моделирования. В данном обзоре описывается опыт подобной работы в рамках коллегии CMS на БАК.

Abstract

Azhgirey I.L. et al. Predictions of the radiation field in the CMS experiment at the LHC: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2025–7. – Protvino, 2025. – p. 40, figs. 10, tables 1, refs.: 87.

Radiation leads to a loss of measurement efficiency in physics experiments at accelerators. Reliable predictions of the radiation field play a crucial role in the design, execution, and development of experiments. Such predictions can only be achieved through full-scale mathematical modeling of the radiation field using the Monte Carlo method. This requires creating and maintaining a model of experiment, and selecting appropriate software for performing the calculations. Furthermore, it is necessary to monitor radiation levels during the experiment whenever possible to verify and validate the modeling results. This review describes the experience of such work within the CMS collaboration at the LHC.

1. Введение

Радиационные повреждения материалов и фоновое воздействие излучения на детектор приводят к потере эффективности измерений в физических экспериментах на ускорителях. При проектировании, проведении и развитии экспериментов важную роль играет надёжность прогнозов характеристик радиационного поля и вызываемых им эффектов в детекторах, электронике и прилегающей инфраструктуре. Такое прогнозирование и доступные меры оптимизации радиационной обстановки могут быть выполнены только при помощи полномасштабного математического моделирования радиационного поля методом Монте-Карло. Для этого необходимо создать и поддерживать модель эксперимента, включая элементы ускорителя, детектор и оборудование, и подобрать соответствующее программное обеспечение для проведения вычислений. С другой стороны, в эксперименте необходимо по мере возможности мониторировать уровни излучения для проверки и подтверждения результатов моделирования. В этом обзоре описан опыт координации такой работы в сотрудничестве CMS на Большом адронном коллайдере, основные направления исследований и используемое для этого программное обеспечение.

2. Эксперимент CMS на Большом адронном коллайдере

Большой адронный коллайдер (БАК) [1] - двух кольцевой сверхпроводящий ускоритель протонов и ионов, действующий в ЦЕРН (Женева, Швейцария). В номинальном режиме БАК обеспечивает столкновения пучков протонов при энергии 14 ТэВ в с.ц.м. и

светимости¹ до 10^{34} см⁻² с⁻¹. При этом ток каждого протонного пучка достигает 0.584 А, а полная накопленная энергия около 362 МДж. Пучок ускорителя состоит из 2835 банчей (сгустков), каждый из которых содержит около 10^{11} протонов. Банчи могут сталкиваться в областях пересечения пучков с интервалом 25 нс. Длина подземного туннеля БАК составляет 26.7 км. БАК имеет 8 криволинейных частей (арк) и 8 прямолинейных промежутков (IR, Insertion Regions). На коллайдере размещены четыре больших эксперимента: ATLAS [2] в области первой точки встреч пучков IP1 (Insertion Point), ALICE [3] в IP2, CMS [4] в IP5 и LHCb [5] в IP8 (см. рисунок 1). В промежутках IR3 и IR7 располагаются системы подавления дисперсии пучка (DS) [1].

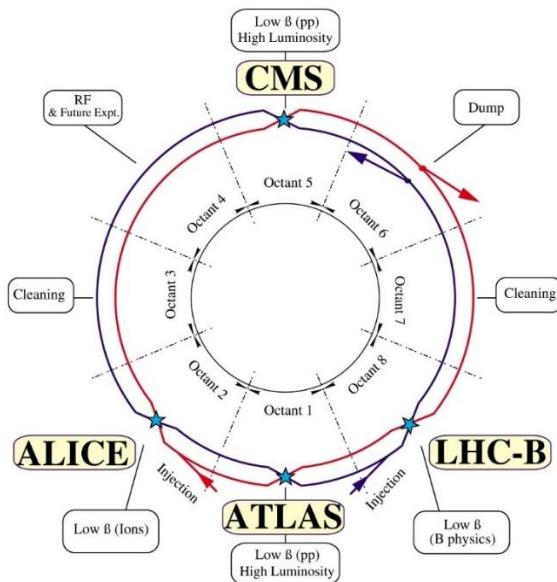


Рис. 1. Схема Большого адронного коллайдера.

БАК получил первые столкновения протонных пучков в 2009 году. Предполагается, что первая очередь БАК будет работать до 2026 года.

Максимальная светимость достигается в двух прямолинейных промежутках – IR1 и IR5. По сравнению с другими экспериментами по физике высоких энергий, эксперименты CMS и ATLAS находятся в беспрецедентно жёстком радиационном поле. Было предпринято много усилий для создания подсистем детектора CMS с высокой радиационной стойкостью.

¹ Светимость (L) определяет частоту взаимодействий (R) частиц пучков, производимых коллайдером: $R = L \times \sigma$, где σ – сечение взаимодействия сталкивающихся частиц.

Уровни излучения в залах экспериментов определяются в первую очередь интенсивностью неупругих протон-протонных взаимодействий в точках встреч. При номинальной светимости и энергии сталкивающихся частиц 14 ТэВ в с.ц.м. интенсивность первичных неупругих взаимодействий протонов в IP1 и IP5 составляет порядка 8×10^8 Гц.

Радиационные проблемы обычно рассматриваются для режима работы с пучками протонов, поскольку в этом случае светимость значительно выше, чем для ионов. Соответственно, вклад ионных сеансов в радиационные проблемы в экспериментах на БАК пренебрежим.

После 3-го сеанса работы (2022–2026 гг.) БАК будет модернизирован для исследований при высокой светимости (до 5×10^{34} см $^{-2}$ с $^{-1}$ в протон-протонной моде). Вторая очередь коллайдера (HL-LHC) [6] может быть запущена не ранее 2030 года. Это позволит главным экспериментам на БАК (ATLAS и CMS) набирать статистику 300 фб $^{-1}$ интегральной светимости в год, и суммарно порядка 3000 фб $^{-1}$ в течение предполагаемого времени эксплуатации HL-LHC. Номинальная светимость БАК в 5 раз меньше, чем у HL-LHC, и тщательный анализ возможных радиационных эффектов является ключевым для продолжения успешной работы основных экспериментов в будущем. Оборудование эксперимента CMS для второй очереди должно быть спроектировано так, чтобы детектор сохранял работоспособность до достижения интегральной светимости не менее 4000 фб $^{-1}$ при средней светимости 5×10^{34} см $^{-2}$ с $^{-1}$. Опыт прогнозирования радиационных полей на первой стадии проекта важен для верификации проекта второй очереди.

Эксперимент CMS (Compact Muon Solenoid) [4] проводится на многоцелевом детекторе, созданном для исследования физики протон-протонных и ион-ионных взаимодействий. Детектор предназначен для высокоточных измерений энергии и импульса γ -квантов, а также электронов, мюонов и других заряженных частиц, и для обеспечения высокого разрешения при оценке масс новых частиц.

Основными элементами детектора CMS являются: центральный трекер [7], система мюонных камер [8] и расположенные внутри магнитного поля сверхпроводящего соленоида [9] электромагнитный калориметр [10], изготовленный из кристаллов вольфрамата свинца, и адронный калориметр [11] из бронзы с активными слоями из пластико-

вого сцинтиллятора. В состав адронного калориметра входит также передний адронный калориметр, расположенный за торцевой мюонной системой в области больших псевдобыстрот² вылета вторичных частиц из IP5. Железное ярмо для обратного магнитного поля соленоида оборудовано четырьмя станциями мюонного спектрометра, перекрывающими большую часть телесного угла вокруг области взаимодействия пучков IP5. Длина детектора CMS 21.6 м, окружность 14.6 м, полный вес около 12500 т. Общий вид детектора проиллюстрирован на рисунке 2.

CMS прошёл разные стадии развития, от технического предложения и проектирования до реализации, начала работы и дальнейшей модернизации. Всегда существуют разнообразные проекты усовершенствования как экспериментальной установки, так и ускорителя. Чтобы гарантировать запланированную работоспособность аппаратуры детектора, необходимы расчёты изменений радиационного поля в результате предполагаемых модификаций в конструкции детектора и близко расположенного ускорительного оборудования. Возможные радиационные эффекты в эксперименте CMS многочисленны и сложны. Оптимизация радиационной обстановки, оценка радиационной стойкости материалов и электронного оборудования основаны в первую очередь на прогнозах, полученных при помощи моделирования методом Монте-Карло.

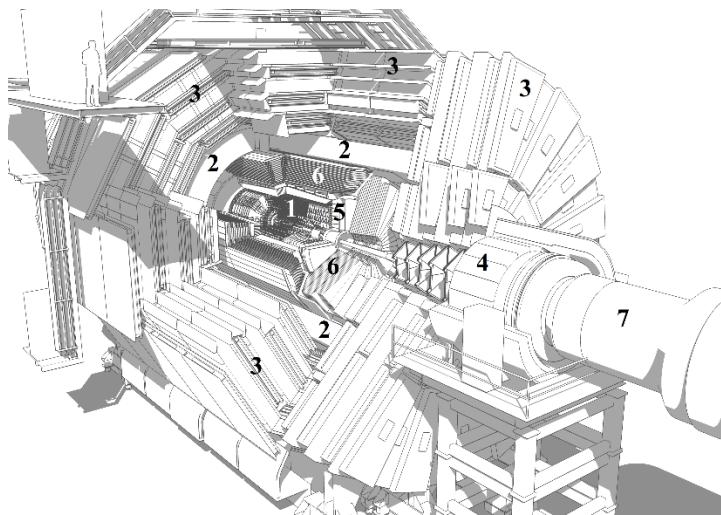


Рис. 2. Общая схема детектора CMS. 1 – центральный трекер, 2 – соленоид, 3 – мюонные камеры, 4 – передний калориметр, 5 – электромагнитный калориметр, 6 – адронный калориметр, 7 – мобильная защита (© Tai Saluma et al., CMS-OUTREACH-2018-032)

² Псевдобыстрота η – безразмерная физическая величина, показывающая, насколько направление движения элементарной частицы отличается от направления оси пучка.

Для проведения расчётов радиационного поля в эксперименте, в отличие от физического моделирования формирования “полезного” сигнала детектора, недостаточно включить в модель собственно подсистемы детектора (см. рисунок 2), необходим также по возможности корректный учет материалов и магнитных полей, окружающих детектор, то есть практически всего экспериментального зала вместе с расположенной в нем электроникой, инфраструктурой эксперимента и т. п. (см. рисунок 3).

Зона переднего адронного калориметра заканчивается на расстоянии³ 14.99 м. За передним адронным калориметром, на расстоянии 19.05 м, располагается медный поглотитель вторичных частиц TAS длиной 1.8 м с апертурой диаметром 34 мм. TAS предназначен для защиты ближайшего сверхпроводящего квадрупольного магнита от излучения, приходящего из точки встречи. Обмотки магнита располагаются на расстоянии 22.8 м, а на расстоянии 26.5 м расположена граница экспериментального зала CMS. Схематично расположение детектора и примыкающего к нему оборудования можно видеть на рисунке 4, где представлено сечение геометрической модели CMS для проведения расчётов радиационного поля при помощи пакета программ FLUKA CERN [12–15].

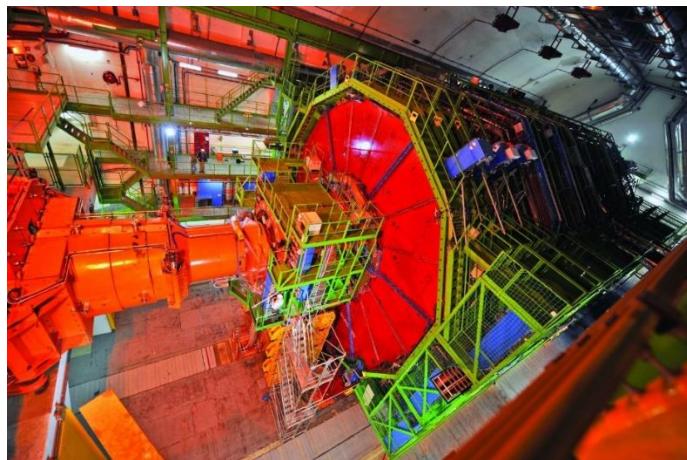


Рис. 3. Детектор CMS в экспериментальном зале. Слева виден один из комплектов мобильной защиты, между защитой и торцевой мюонной камерой – передний калориметр.

Радиационные повреждения уже являются важным ограничительным фактором работы БАК. Можно упомянуть потерю прозрачности кристаллами вольфрамата свинца

³ Расстояния указаны от точки встречи пучков IP5.

(PbWO_4) торцевого электромагнитного калориметра, радиационное старение дрейфовых трубок центральной мюонной системы, радиационное повреждение системы сбора сигнала с адронного калориметра и преждевременный выход из строя электроники системы питания центрального трекера. Радиационный фон усложняет анализ данных, получаемых детектирующими подсистемами CMS [16]. Ожидается, что это может стать серьёзным ограничением при повышении светимости, и, одновременно, при смещении интереса физического анализа в область менее исследованных процессов с меньшими сечениями [17].

Эксперименту CMS также необходимо вести контроль уровней излучения, чтобы верифицировать предсказания, полученные при помощи расчётного моделирования.

В сотрудничестве CMS расчётом и измерениями радиационных полей занимаются соответственно группы RadSim (Radiation Simulation) и NRM (Neutron and Radiation Monitoring) в рамках проекта BRIL (Beam Radiation Instrumentation and Luminosity) [18-20].

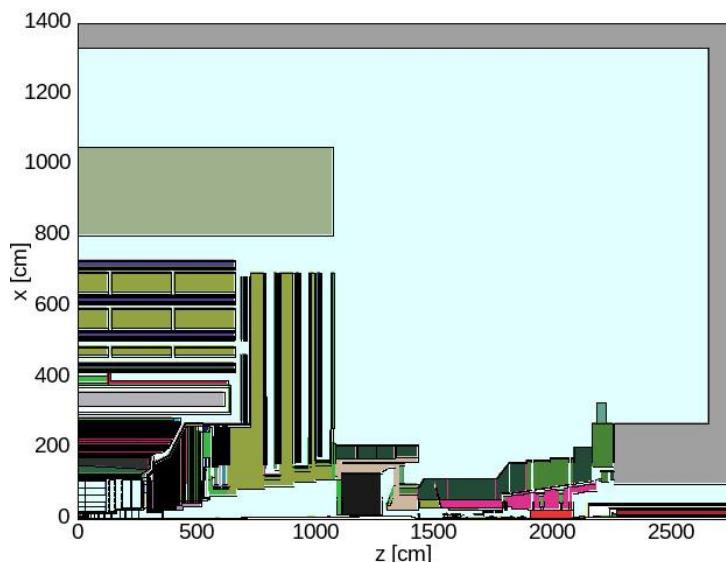


Рис. 4. Горизонтальное сечение геометрической модели (одной четверти) эксперимента CMS, модель CMS FLUKA v6.0.0.2. Прямоугольный объект на $X \sim 800-1000$ см – схематичное представление зоны размещения электроники CMS.

3. Формирование радиационного поля в CMS

Радиационное поле (РП) в эксперименте состоит из трёх компонент: основной, определяемой столкновениями пучков в точке встречи IP5; ускорительного фона, кото-

рый существует при циркуляции пучков в ускорителе, независимо от столкновений в IP; наведённой радиоактивности, которая появляется и существует после начала работы установки, и накапливается в процессе её работы.

Основной источник излучения в экспериментальном зале CMS - неупругие протон-протонные соударения в IP5. Частицы, родившиеся в этом процессе, взаимодействуют с веществом детектора и ускорителя, порождая новые поколения частиц и формируя РП. Нейтроны, родившиеся в результате цепочки взаимодействий после первичного взаимодействия протонов, могут приходить в мюонную систему через несколько микросекунд. Пространственное распределение потоков частиц в экспериментальном зале определяется энергетически-угловым распределением рождения частиц в первичном взаимодействии, конфигурацией детектора и примыкающего ускорительного оборудования.

Мюонная система CMS перекрывает область псевдобыстрот $|\eta| < 2.4$, система калориметров – область $|\eta| < 3$, передний адронный калориметр перекрывает область до $|\eta| < 4.7$. Анализ распределения вторичных частиц из области протон-протонного взаимодействия по энергии и псевдобыстроте показывает, что 75% всех рожденных частиц попадает в область $|\eta| < 5$. В то же время эти 75% всех частиц уносят всего лишь около 5% всей энергии из точки встречи. Конструкция детектора CMS такова, что он является практически герметичным по отношению к излучению, рожденному в области малых псевдобыстрот $|\eta| < 5$.

Для защиты обмоток сверхпроводящих магнитов БАК от радиационного разогрева, приводящего к квенчу⁴, между IP5 и криостатами фокусирующих триплетов установлены поглотители вторичных частиц TAS, перехватывающие часть излучения по пути от IP до криостата. Из оставшихся 95% энергии первичного взаимодействия около 30% будут перехвачены (и частично рассеяны) поглотителем в области $|\eta| < 7.9$, а остальная часть высадится далее за TAS в прямолинейном промежутке IR5 или уйдёт в тоннель БАК.

Таким образом, область эксперимента CMS в диапазоне псевдобыстрот от 5 до 7.9, в которую попадают поглотитель TAS и участок вакуумной камеры малого радиуса перед ним, оказывается главным источником рассеянного излучения в активных элементах.

⁴ Квенч (quench) – переход сверхпроводящего магнита в “тёплое” состояние.

тах внешней части детектора, электронике и экспериментальном зале CMS. Так, если во всём детекторе CMS поглощается около 240 ГэВ из 14 ТэВ энергии первичного протон-протонного взаимодействия, то на каждый из двух поглотителей TAS приходит по 2.3 ТэВ. Защиту чувствительных элементов внешней части мюонной системы и компонентов электроники от вторичного излучения, выходящего из области TAS, в основном обеспечивает передняя защита CMS (FS, Forward shielding) [21-23]. От эффективности FS зависит успешность работы и ресурс службы целого ряда подсистем CMS. С другой стороны, положение FS в экспериментальном зале накладывает ограничения на возможный максимальный размер и вес частей защиты и сценарий их перемещения, поэтому эффективность FS далека от желаемой с точки зрения снижения уровня излучения в зале.

FS состоит из двух подобных частей, расположенных у стен подземного зала по обе стороны от точки встречи пучков. Она располагается в экспериментальном зале на расстоянии 14.95 м от IP5. Общий вид одного из двух узлов передней защиты приведён на рисунке 5. Передняя защита состоит из:

- блиндажа (расположен от $Z = 21.7$ м) – сборного каркаса из стальных балок, залитого бетоном. Блиндаж установлен на платформе и прикреплён к торцевой стене экспериментального зала. Блиндаж поддерживает большие оси опор толстой части мобильной защиты;
- неподвижной стальной конической защиты FIN (Fixed Iron Nose, $Z = 18 \div 20.8$ м), окружающей поглотитель TAS. Эта часть защиты с помощью двух регулируемых опор крепится к блиндажу. Она имеет коническую форму для обеспечения максимального отката назад торцевой мюонной системы при открытии детектора CMS;
- толстой мобильной защиты ($Z = 18 \div 21.7$ м), которая крепится на оси блиндажа и представляет из себя стальную оболочку, залитую обычным либо тяжелым бетоном (в разных секциях);
- тонкой мобильной защиты ($Z = 14.9 \div 18$ м), которая крепится к малым осям, расположенным на толстой мобильной защите; эта часть состоит из стальной оболочки, также заполненной бетоном;
- воротника ($Z = 14.3 \div 15.3$ м), расположенного между зоной размещения ФЭУ переднего калориметра и тонкой мобильной защитой.

Излучение, выходящее за защиту в зал, состоит в основном из нейтронов, энергетический спектр этих частиц - от сотен ГэВ до тепловых энергий. Так как нейтроны не обладают электрическим зарядом, они имеют сравнительно большой пробег в отличие от заряженных частиц, и чаще всего являются источником радиационных проблем в CMS. Так, дрейфовые трубы внешних мюонных камер центральной мюонной системы MB при накоплении поглощённой дозы теряют свою эффективность из-за химических процессов: на электродах оседают органические вещества, образующиеся в газе под действием излучения, в результате падает коэффициент усиления. Доза создаётся электронами, рождёнными при конверсии фотонов, рождающихся в основном в реакциях радиационного захвата нейтронов ядрами компонентов бетона стены экспериментального зала и железного ярма соленоида CMS.

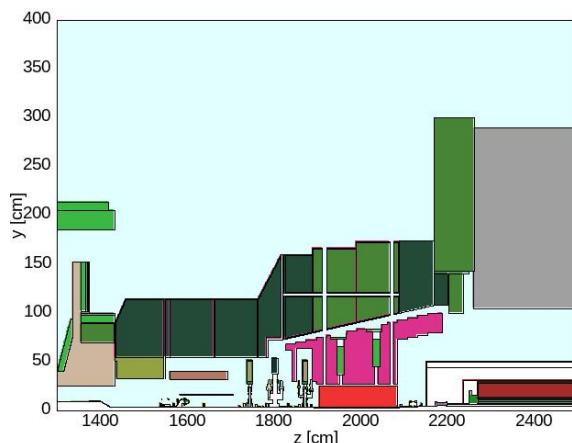


Рис. 5. Вертикальное сечение области передней защиты (одна четверть). Модель CMS FLUKA v6.0.0.2.

На рисунке 6 приведены пространственные распределения флюенса⁵ адронов с энергией выше 20 МэВ (слева) и флюенса нейтронов (справа). Виден максимум в районе тонкой мобильной защиты (около 17 м от IP5), создаваемый излучением, выходящим из поглотителя TAS в обратном направлении. Нейтроны, попадая в армированный бетон стен экспериментального зала, замедляются, отражаются или рождают следующие поколения нейтронов. Видно, что область внешней камеры MB4 ($R \sim 7$ м и Z от -7 до +7 м) центральной мюонной системы – самая защищённая во всём CMS, тем не менее, потеря эффективности работы дрейфовых трубок камеры проявилась уже во втором сеансе работы БАК.

⁵ Флюенс – интеграл по времени от плотности потока частиц.

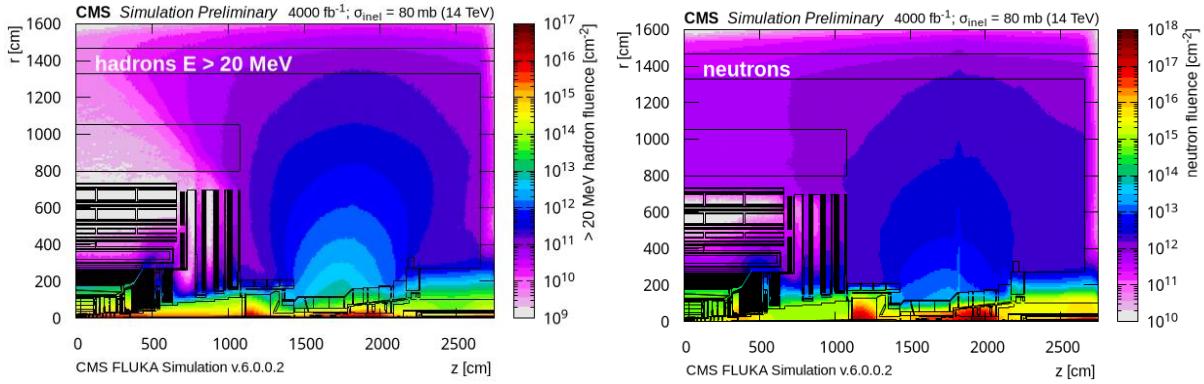


Рис. 6. Двумерное распределение флюенса адронов с энергией выше 20 МэВ (слева) и нейтронов (справа) в экспериментальном зале CMS (показана одна четверть). Результаты расчётов проинтегрированы по азимутальному углу. Модель CMS FLUKA v 6.0.0.2.

Процессы, вызываемые нейtronами низких энергий, не были учтены на ранних стадиях проектирования CMS [24], поскольку транспорт нейтронов с энергией ниже 100 кэВ вообще не рассматривался. Предполагалось, что этими эффектами можно пренебречь. Интерес к роли нейтронов низких энергий, в первую очередь в качестве источника фоновых проблем для переднего мюонного детектора, появился при проектировании эксперимента SDC на SSC [25-27], а затем и в экспериментах на БАК [28-30].

На рисунке 7 показаны поперечные пространственные распределения флюенса адронов и нейтронов в зале CMS на расстоянии 2.5 м от IP5. Минимумы в нижней части распределения определяются конструкцией экспериментального зала.

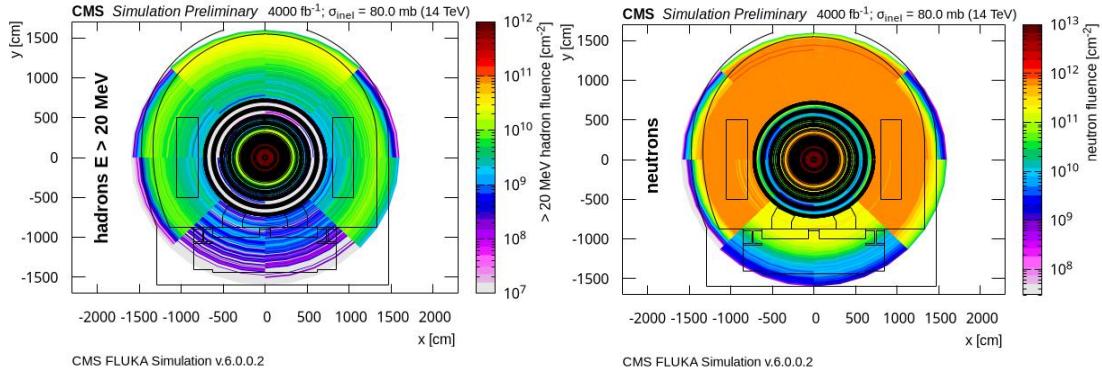


Рис. 7. Двумерное распределение флюенса адронов с энергией выше 20 МэВ (слева) и нейтронов (справа) в экспериментальном зале CMS (показана одна четверть) для $z = 2.5\text{--}2.6$ м от IP5. Результаты расчётов приведены для 8 азимутальных интервалов. Модель CMS FLUKA v 6.0.0.2.

Ускорительный фон⁶ [31] – это частицы, прилетающие из туннеля ускорителя, но не являющиеся частью пучка. Они рождаются в результате взаимодействий пучка (или гало пучка) с остаточным газом внутри вакуумной камеры ускорителя, или с материалом коллиматоров, ограничивающих апертуру пучка. В районе центрального детектора ускорительный фон обычно подразделяется на 3 типа, в зависимости от механизма его образования⁷:

- Неупругие взаимодействия с остаточным газом (LBG, Local Beam Gas). Этот источник определяет интенсивность ускорительного фона вблизи оси пучка. Для эксперимента наиболее значимы взаимодействия внутри ближайшего криостата, частично находящегося в экспериментальном зале (примерно в 22 м от IP5).
- Гало пучка (BH, Beam Halo). Частицы гало пучка, сошедшие с орбиты, взаимодействуют с одним из коллиматоров систем подавления дисперсии пучка. Продукты этих взаимодействий затем перехватываются третичными коллиматорами ТСТ, которые находятся примерно на расстоянии 150 м по обе стороны от IP5. Часть вторичных частиц, рождённых на ТСТ, и их потомков долетает до экспериментального зала.
- Упругие взаимодействия с остаточным газом (DBG, Distant Beam Gas). Они могут происходить на любом участке кольца БАК. Частица, получившая небольшое изменение своего импульса, после нескольких оборотов по кольцу ускорителя перехватывается одним из коллиматоров DS или ТСТ.

На рисунке 8 показаны пространственные распределения частиц ускорительного фона, вызванного источниками BH и LBG, связанными с пучком 1 коллайдера [32]. Источник DBG подобен источнику BH, но его амплитуда примерно на 2 порядка выше, чем у BH [33].

Учёт вклада от LBG важен для трекера и калориметров CMS. Суммарно источники DBG и BH доминируют над LBG на больших расстояниях от оси пучка (более ~ 2 м). В основном это мюоны, корректный учёт которых важен для эффективности работы мюонной системы эксперимента.

⁶ Beam induced background, BIB.

⁷ Для вынесенных в туннель малоугловых детекторов могут быть важными и другие источники.

Наведённая радиоактивность появляется в процессе самопроизвольного распада нестабильных (радиоактивных) ядер, образовавшихся после трансмутации ядер вещества при неупругих взаимодействиях, вызванных адронами высоких энергий, или в нейтронных реакциях. В результате распада происходит испускание позитронов и фотонов, и, возможно, рождение следующих поколений нестабильных ядер.

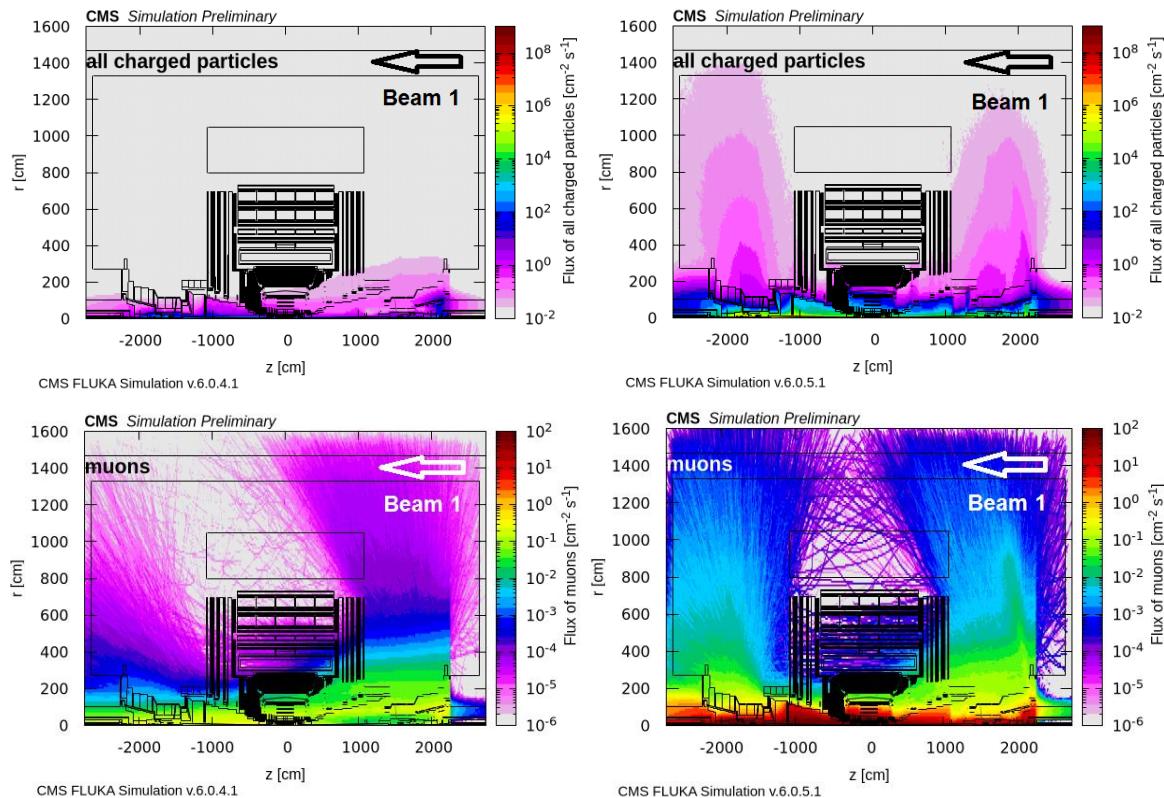


Рис. 8. Вверху слева: расчёты оценки потока заряженных частиц в зале CMS от источника BH, справа – от источника LBG. Внизу слева: потоки мюонов от BH, справа: от LBG.

4. Радиационные эффекты

При воздействии излучения физическая аппаратура и инфраструктура эксперимента получают повреждения. Эффекты воздействия могут быть мгновенными либо накопленными (кумулятивными). Влияние излучения на материалы и аппаратуру приводит к следующим нежелательным последствиям:

- Радиационному старению используемых материалов вследствие разрушения структуры вещества.
- Ухудшению качества регистрируемого сигнала из-за появления постороннего фона.

- Радиационно-индуцированным эффектам в электронике – сбоям, появлению ложных сигналов.
- Появлению наведённой радиоактивности оборудования, что усложняет доступ к датчику для ремонта или обслуживания.

Все эти факторы приводят к снижению эффективности и, следовательно, к повышению стоимости проведения исследований.

Понимание радиационных эффектов основано на тестовых облучениях. Однако облучательные установки не воспроизводят комплексную реальность экспериментов на БАК. Экстраполяция с предыдущих коллайдеров так же невозможна, как из-за меньшей энергии, так и из-за низкой светимости.

Радиационное старение – накапливаемый (кумулятивный) эффект. Любой материал меняет свои свойства под действием излучения. Это может быть следствием повреждений кристаллической решётки, накопления химических изменений или ускоренного окисления поверхностного слоя вещества. Например, он вызывает снижение светопропускания в сцинтилляторах и световодах, что приводит к проблемам с калибровкой в калориметрии [34]. Дрейфовые трубы центральной мюонной системы CMS теряют свою эффективность, подвергаясь воздействию излучения.

Радиационный фон - мгновенные радиационные эффекты. К ним относятся регистрируемые треки фоновых частиц, схожих по параметрам с “истинными”, а также рост загрузки аппаратуры за счёт сигналов посторонних частиц, что может вызвать насыщение (перегрузку) фронтальной электроники детекторов (то есть привести к потере части сигнала), создать проблемы со считыванием информации и затруднить распознавание образов траекторий частиц [16]. Возникающие радиационные эффекты вызываются заряженными частицами, которые, однако, могут порождаться локально в чувствительной среде или вблизи неё в результате взаимодействий нейтральных частиц низких энергий (нейтронов, фотонов), поэтому необходимо отслеживать все компоненты РП.

Отдельно рассматривается ускорительный фон. Частицы от неупругих взаимодействий пучка с остаточным газом создают помехи в центральной части трекера. В основном это электроны. Также возможна имитация сигнала от струй из IP5 в электромагнитном калориметре в результате регистрации тормозного излучения, испускаемого электронами ускорительного фона. Фоновые мюоны - потомки протонов, провзаимо-

действовавших на коллиматорах ТСТ. Они могут имитировать сигнатуры частиц, рожденных в IP, и вносить дисбаланс в измерение полного поперечного импульса. Интенсивность такого рода событий небольшая, во втором сеансе работы БАК она составляла всего несколько Гц [20]. Однако есть несколько специфических направлений физического анализа, где вклад подобного фона остаётся значительным [35, 36].

Радиационные эффекты в электронике могут быть как мгновенными, так и кумулятивными. Кумулятивные эффекты могут включать повреждения кристаллической решётки кремниевых детекторов и элементов электроники, что приводит к снижению производительности и росту отношения “шум/сигнал”.

Электронные устройства, чувствительные к кумулятивным эффектам, то есть к таким, которые масштабируются с суммарной поглощенной дозой, или повреждениями от смещения атомов кристаллической решётки, будут отказывать, когда доза или флюенс эквивалентных нейтронов с энергией 1 МэВ достигнут предельно допустимых значений. Таким образом, можно спрогнозировать время, через которое произойдет вероятный отказ конкретной единицы оборудования.

Для электронных устройств, чувствительных к единичным событиям, отказ может произойти в любой момент времени, и вероятность определяется в терминах сечений взаимодействия частиц с веществом или кристаллической решёткой. Мгновенные эффекты в электронике, вызванные единственной частицей с высокой энергией, называются эффектами единичного события (single event effects, SEE). Сбои при единичном событии (single event upset, SEU) — это “мягкие” ошибки при работе, и, как правило, неразрушающие, поскольку они обычно проявляются как переходные импульсы в логической или вспомогательных схемах, или как переключение битов в ячейках памяти или регистрах [37]. Ядерные взаимодействия, вызывающие SEU, — это рассеяние адронов на ядрах кремния при высоких энергиях адрона (выше 20 МэВ), или вылет а-частицы после захвата теплового нейтрона на ядре бора ^{10}B , содержащегося в виде примеси в материалах печатных плат. Также возможны несколько типов важных, потенциально разрушительных ошибок, включая выход из строя ключевой электронной схемы (single event latch up, SEL), что может вызвать серьёзные последствия, такие, как аномально высокий рабочий ток, полное выгорание силового полевого транзистора (MOSFET), “заморозку” битов памяти [38].

Контроль работоспособности электроники требует подробного прогноза распределения поглощённой дозы и флюенса эквивалентных нейтронов с энергией 1 МэВ для кремниевых устройств, а также распределения уровня SEU в областях размещения фронтальной электроники подсистем CMS.

Наведённая радиоактивность оборудования приводит к ограничению доступа к элементам детектора и другому оборудованию в экспериментальном зале. Аккуратность описания распространения излучения и процесса образования ядер-остатков определяет точность предсказания уровней наведённой радиоактивности. Накопление наведённой радиоактивности накладывает ограничения на возможность доступа персонала для обслуживания и ремонта оборудования во время остановки ускорителя [39]. Приходится ждать “остывания” активированных участков, таким образом увеличивается времяостояния ускорителя. Оптимизация уровня наведённой радиоактивности требует изначального тщательного отбора материалов, используемых в эксперименте, по их химическому составу, включая примеси. Необходимо предсказывать уровни активации материалов и соответствующей мощности амбиентного эквивалента дозы (МАД) вокруг них.

5. Методы моделирования радиационного поля

В общем случае задача расчёта характеристик РП состоит в построении пространственно-временной картины развития адронно-электромагнитного каскада (АЭК) в веществе. Элементарная частица или атомное ядро, попадая в вещество, взаимодействует с ядром вещества и производит адроны и лептоны меньших энергий, которые, в свою очередь, могут порождать следующие поколения элементарных частиц. В развитии каскада могут участвовать частицы с энергиями, различающимися на многие порядки: от тысяч ГэВ до долей эВ. Пространственно-временная структура и количество частиц-участников АЭК зависит от распределения материалов (то есть от геометрии задачи), а также структуры магнитных и электрических полей в рассматриваемой области.

При достаточно высокой энергии частицы, инициировавшей АЭК, в процессе его развития происходит большое количество разнообразных физических процессов, которые необходимо корректно учитывать в задачах радиационной физики. Так, множественное рождение лептонов приводит к интенсивным электромагнитным ливням и,

как следствие, к высоким локальным дозовым нагрузкам. Мезоны, образующиеся в АЭК, с высокой вероятностью при распаде имеют в конечном состоянии мюоны, способные проникать через протяженные слои вещества. При размене энергии АЭК между всё большим количеством адронов попутно рождается большое количество нейтронов низких энергий. Взаимодействуя с веществом, они замедляются до тепловых энергий (долей эВ). В этой области для многих ядер резко возрастает сечение радиационного захвата нейтрона, в результате которого излучаются фотоны с энергией, которая может превосходить 10 МэВ. Пренебрежение учётом этих процессов при низких энергиях может приводить к существенной недооценке дозовой и фоновой нагрузки на чувствительные элементы экспериментальной установки.

Теория переноса излучения [40, 41] является основным математическим аппаратом для физики космических лучей и ядерных реакторов, а также активно используется в экспериментальной физике, прикладных ядерно-физических задачах и атмосферной оптике. Процессы переноса излучения в среде описываются интегро-дифференциальными уравнениями переноса, которые имеют сложный вид, а интересующие характеристики поля излучения (доза, поток и т. д.) являются функционалами от их решений. На данной теории базируются расчетные схемы для моделирования АЭК. АЭК представляет собой процесс многократных актов взаимодействий частиц с веществом. Как правило, решение подобных задач невозможно без использования некоторых приближений и численных методов из-за сложных физических и геометрических факторов.

При описании АЭК рассматривается процесс переноса частиц (излучения) от некоторого источника. Такой процесс можно представить в виде последовательности элементарных процессов:

- рождение частицы (испускание её источником, или после неупругого взаимодействия или распада родительской частицы);
- одно или несколько взаимодействий со средой, в промежутках между которыми она движется свободно;
- гибель частицы в результате одного из взаимодействий или распада (или вылет из рассматриваемой системы без возвращения в неё).

Изложенный выше процесс поведения частиц описывается нестационарными интегро-дифференциальными уравнениями переноса частиц (кинетическими уравнениями Больцмана).

Главное место среди численных методов решения уравнения переноса в физике высоких энергий занимает метод Монте-Карло (ММК) [42, 43]. По сути, ММК есть модельный эксперимент, “симуляция”, где, в отличие от реального эксперимента, можно в широких пределах варьировать условия “опыта”. Иногда ММК дополняется другими методами или приближениями метода Монте-Карло.

Наиболее распространённый способ реализации ММК в задачах переноса излучения – прямое моделирование временной последовательности процессов, происходящих при прохождении излучения через вещество. Для корректной оценки поведения частиц основной концепцией моделирования ММК является использование большого числа историй, каждая из которых имеет случайный характер.

Главное, что необходимо знать для проведения математического моделирования – это полное описание вероятностей взаимодействий частиц. Значения этих вероятностей определяют длину пробега частицы, тип взаимодействия или распада, задают новое значение энергии и направления движения частицы после взаимодействия и рождение новых частиц. При этом можно пренебречь процессами, которые несущественны для конкретной задачи, а также установить нужную степень детализации геометрии и начальных условий, исходя из требуемого уровня точности решения задачи.

Таким образом, при моделировании прохождения излучения через вещество алгоритм ММК может быть представлен последовательностью случайных шагов. Зная величину длины пробега частицы и закон распределения плотности вероятности координат, где может происходить взаимодействие излучения с веществом, и используя методы математической статистики, можно получить абсолютные значения координат одного из возможно реализующихся событий. Затем для конкретного процесса, который произошёл в этой точке, моделируются множественности рождающихся частиц и их кинематические параметры. Рождённые частицы транспортируются до следующей точки их размножения или гибели. Каждая частица порождает новый каскад независимо от других частиц и каскадов. Вероятность взаимодействия частицы полностью определя-

ется её кинематическими параметрами и не зависит от того, каким образом она пришла в эту точку.

Существует большое количество пакетов программ для моделирования АЭК методом Монте-Карло. В приложениях радиационной физики один из наиболее популярных – FLUKA CERN [12–15]. Пакет GEANT4 [44-46] широко используется во всех экспериментах на БАК для исследования эффективности работы детекторов и анализа регистрируемых событий, но для полномасштабного моделирования РП в экспериментальном зале применяется сравнительно редко из-за меньшего (по сравнению с FLUKA) быстродействия. Часто эти два пакета используются комбинированно: общие характеристики РП рассчитываются по FLUKA с учетом всех особенностей геометрии вокруг объекта исследований, затем данные об АЭК передаются в GEANT для подробного моделирования отклика конкретного детектора [47].

6. Опыт организации расчётов в CMS

Организация работы по моделированию радиационных полей прошла через 3 этапа за более чем 30 лет развития CMS. С начала 90-х гг. прошлого века до 1999 г. отдельные группы исследователей работали над решением задач для интересов создания технического проекта эксперимента CMS [48] и его подсистем [7-11]. Каждая группа использовала собственное ПО для моделирования АЭК, в частности, FLUKA, MARS [49, 50], GEANT3, GCALOR [51]. Синхронизация моделей эксперимента, используемых в разных пакетах моделирования, проводилась эпизодически.

При подготовке инженерного проекта мюонной системы CMS [8] было принято решение о необходимости стандартизации исходных данных для расчётов, то есть геометрических моделей, списка используемых материалов, описания магнитных полей. Был разработан общий документ с описанием совокупности всей доступной на тот момент технической информации. Естественно, каждая программа использует свой алгоритм (язык) описания геометрии со своими ограничениями. Результаты расчёта флюенса фотонов с использованием разных программ моделирования (FLUKA, MARS и GCALOR) различались до 15 раз в области мюонной камеры ME12 и до 2.5 раз в области ME4 [8]. Поле в ME12 определяется пробоем (punchthrough) адронов через матери-

ал адронного калориметра в мюонную камеру, поле в ME4 – в основном альбедо (обратным рассеянием) частиц от поглотителя TAS.

Третий этап начался после запуска БАК. С одной стороны, появилась однозначность исходной информации о конструкции эксперимента, с другой стороны, это описание стало настолько сложным, что небольшие (1–3 человека) группы пользователей различных пакетов программ симуляции уже не могли позволить себе поддерживать актуальную модель описания задачи с достаточной точностью. В результате эволюции был выбран единственный **базовый пакет для полноценного моделирования** – FLUKA CERN, являющийся оптимальным с точки зрения компромисса между быстродействием, качеством физических алгоритмов и гибкостью описания сложных задач.

Моделирование – это неотъемлемая часть процесса проектирования, обеспечивающая обратную связь для различных конфигураций детектора, схем защиты и конструкций компонентов. Это единственный способ спрогнозировать параметры радиационного поля и предсказать радиационные эффекты при изменениях в конструкции экспериментальной установки или ускорительного оборудования.

Для выполнения расчётов необходимо иметь:

- **Пакет программ для моделирования АЭК** методом Монте-Карло.
- Пакет программ – **генератор**, описывающий характеристики первичного взаимодействия протонов в точке встречи при энергиях до 7+7 ТэВ.
- **Модель** для конкретной расчётной задачи, которая включает собственно геометрическую модель, описание магнитных полей и настройки алгоритма транспорта частиц.
- ПО и **репозиторий** для представления результатов моделирования.
- Для ряда задач (например, для расчётов ускорительного фона) – **интерфейсы** (источники) для сопряжения разных стадий моделирования.

Основной пакет программ для моделирования распространения излучения в детекторе и экспериментальном зале CMS – FLUKA CERN [12–15]. Пакет MARS [49, 50] применяется для упрощённых тестовых расчётов, быстрой оценки относительного эффекта при изменении параметров вычислительной модели, и для моделирования ускорительного фона при необходимости транспортировки частиц на длинной (сотни метров) базе в IR5 [52, 53]. В радиационных приложениях GEANT4 [44-46] используется

многими группами CMS для специальных фоновых исследований, обычно на локальных (ограниченных) моделях.

Многокомпонентное РП в зоне эксперимента перекрывает широкий энергетический диапазон. На практике используются несколько функционалов этого поля для прогнозирования радиационных повреждений. Наиболее важные из них:

- Флюенс адронов с энергией выше 20 МэВ. Используется для предсказания уровней SEU и SEE в электронных цепях [38, 54].
- Флюенс нейтронов и оценка нейтронного спектра. Нейтроны являются основными переносчиками энергии РП на большие расстояния от источника.
- Флюенс эквивалентных нейтронов с энергией 1 МэВ, который обычно пропорционален объёмным повреждениям кремния, а также воздействию на электрические и оптические свойства систем сбора сигнала, такие, как ток утечки, напряжение обеднения и эффективность сбора заряда. Вклады в этот функционал для различных типов частиц в зависимости от их энергии учитываются в соответствии с экспериментально определёнными коэффициентами [38].
- Поглощённая доза (часто употребляется термин TID – total ionizing dose). Накопление дозы для электроники приводит к изменениям порогового напряжения и росту паразитного тока. Степень деградации сцинтиляторов и оптоволокна также пропорциональна накопленной дозе.
- Флюенс всех заряженных частиц важен для оценки радиационного фона.
- Флюенс мюонов важен для учёта в физическом анализе.
- МАД служит для оценки уровня наведённой радиоактивности.

В качестве **генератора** для моделирования первичных протон-протонных, протон-ядерных или ядро-ядерных взаимодействий в области пересечения пучков используется пакет DPMJET-III [55, 56], интегрированный в пакет FLUKA. В расчётах для физического моделирования в CMS используется пакет PYTHIA8 [57, 58]. Группа RadSim провела сравнительные исследования параметров вторичных частиц, рождающихся при взаимодействии протонов при энергии 7+7 ТэВ в описаниях DPMJET-III и PYTHIA8, и не нашла существенных различий, которые могли бы повлиять на конфигурацию РП в CMS.

Модель для расчётной задачи включает геометрическое описание эксперимента, ускорительного оборудования, экспериментального зала, инфраструктуры и прилегающих участков ускорителя, точную (по возможности) спецификацию всех материалов и описание магнитных полей, а также параметры настройки алгоритма транспорта частиц: энергетические пороги транспорта, точность локализации границ объектов и инструкции для сбора информации (список вычисляемых функционалов, их детализация и расположение областей сбора информации). Сюда же входят необходимые пользовательские процедуры с описанием дополнительных параметров, которые нельзя определить через общий файл исходных данных.

Модельное представление геометрии – это совокупность данных о типах элементов, которыми описывается геометрия расчетной задачи (реальных объектов и пространства между ними), и методов работы с этими элементами. Включает также детальное описание материалов задачи. Модель используется геометрическим модулем программы для определения точки пересечения траектории частицы с границами элементарных геометрических объектов и с границами ячеек сбора информации.

Основное время работы вычислительной программы, как правило, тратится на выполнение процедур геометрического (транспортного) модуля. Дополнительно важно учитывать время, которое тратится пользователем на подготовку, проверку и модификацию исходных данных, описывающих геометрию задачи.

В программах моделирования переноса частиц методом Монте-Карло чаще всего встречаются реализации *аналитического* представления геометрии. В этом подходе геометрия расчетной задачи – это набор аналитически заданных поверхностей второго порядка, которые определяют границы сред. Описание сложной трехмерной геометрии в аналитическом представлении реализуется с помощью комбинаторного подхода [59]. Такой подход заключается в задании для каждой поверхности правила определения, по какую сторону от нее находится точка с заданными координатами: одна из сторон назначается внешней, другая внутренней. Тогда исследуемую область пространства можно представить в виде набора зон, каждая из которых состоит из точек, лежащих внутри одного и вне другого множества граничных поверхностей. Впервые такой подход к аналитическому описанию геометрии был продемонстрирован в программе MORSE [60, 61], а затем – FLUKA.

Текущая версия геометрической модели CMS (раздел входного файла FLUKA, содержащий описание геометрии и материалов) содержит более 15 000 строк кода. Необходимость оптимизации геометрии определяется тем, что геометрическая модель – это ПО, существующее уже более 30 лет, которое создавалось, развивалось и модифицировалось многими пользователями, часто работавшими в рамках своей подсистемы и не имевшими представления о полной геометрической модели эксперимента. В результате появляется масса дублирований при описании базовых поверхностей, при помощи которых описываются реальные геометрические объекты. Это приводит к неоправданному усложнению геометрической модели, уменьшению скорости счёта и увеличивает вероятность ошибок в ПО. Поэтому оптимальным является решение регулярно проводить оптимизацию модели и ограничить количество пользователей, имеющих доступ к её редактированию.

Описание геометрии FLUKA постоянно обновляется для включения текущих изменений в конфигурацию CMS, таких, как добавление новых элементов радиационной защиты и вакуумного оборудования. Для улучшения достоверности моделирования уточняется состав используемых материалов, детализируется структура детекторов и фронтальной электроники, добавляются ранее пропущенные элементы (например, кабеля и механические структуры). Также следует поддерживать модели будущих конфигураций на ключевых этапах по мере продвижения проектов модернизируемых и создаваемых подсистем.

На рисунках 9, 10 показаны сечения геометрической модели CMS для Фазы 2 БАК. Продольный размер области, описываемой моделью, около 50 м, поперечный – около 30 м. На рисунке 10 слева представлена модель трекера [62], справа - нового тайминг-детектора релятивистских частиц MTD [63].

Трудоёмкость работы со сложной геометрией – серьёзный ограничивающий фактор для использования того или иного пакета программ в больших сотрудничествах. Необходимо иметь средства для проверки адекватности модели. Простейший способ – это визуализация (графическое представление) модели и сравнение с исходными данными. Пользователи FLUKA применяют пакет FLAIR [64, 65] для модификации и проверки геометрии.

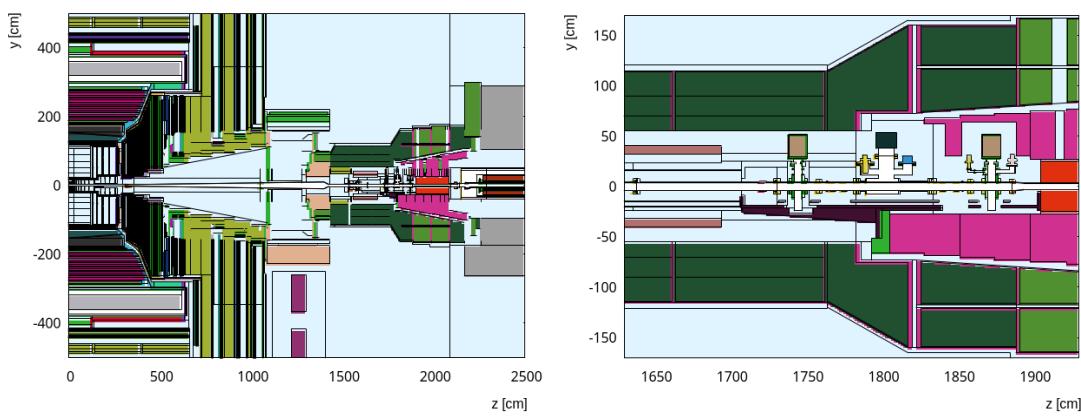


Рис. 9. Вертикальное сечение правой части геометрической модели эксперимента CMS (Фаза 2) в пакете FLUKA (версия v.6.0.0.2). Слева показана центральная часть эксперимента, передний калориметр и передняя защита. Справа: элементы вакуумного оборудования БАК внутри защиты FS, размещённые перед поглотителем TAS.

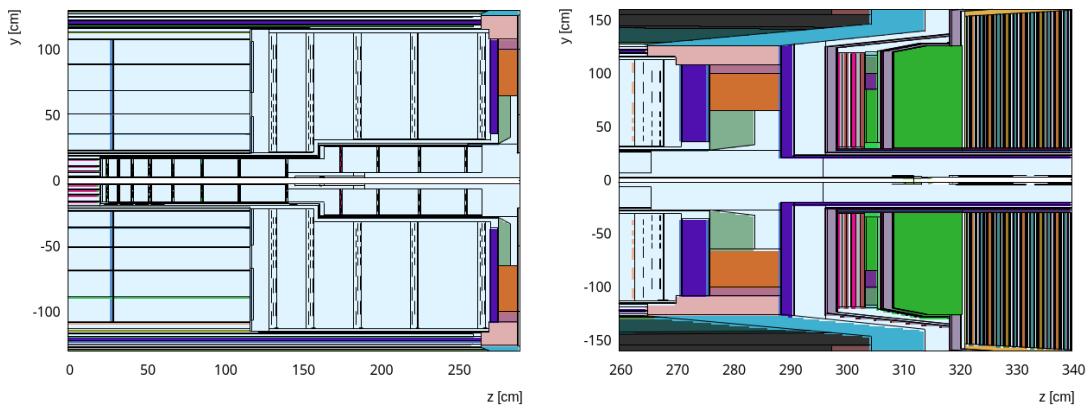


Рис. 10. Вертикальное сечение правой части геометрической модели эксперимента CMS в пакете FLUKA (версия v.6.0.0.2). Слева: трекер. Справа: торцевой детектор MTD, расположенный между трекером и торцевым электромагнитным калориметром.

Пакет программ FLAIR – это интерфейс, используемый для нескольких кодов Монте-Карло. Первоначально он был разработан для FLUKA, где его уникальные особенности во многом способствовали успеху как FLUKA, так и FLAIR. Начиная с версии 3 FLAIR этот интерфейс был выделен в отдельный пакет программ, что позволило легко интегрировать другие пакеты моделирования транспорта частиц. Текущее направление развития – сделать FLAIR универсальным инструментом для выполнения вычислений с

одинаковыми входными данными с использованием FLUKA, GEANT4, PENELOPE [66] и в дальнейшем - других популярных пакетов моделирования, таких как MCNP [67] и PHITS [68].

FLAIR предоставляет следующие возможности:

- Пользовательский интерфейс для простого и почти безошибочного редактирования, а также проверки входного файла во время редактирования.
- Интерактивный редактор геометрии, позволяющий редактировать тела и области в визуальном/графическом виде с немедленной отладочной информацией.
- Компиляция, запуск и мониторинг статуса FLUKA во время прогона пакета моделирования.
- Внутренний интерфейс для постобработки результатов расчёта.
- Библиотека материалов и геометрических объектов для упрощения редактирования, хранения и совместного использования в других проектах.

Для подтверждения достоверности получаемых результатов необходимо отслеживать преемственность моделей и выстраивать их иерархию. Модели могут различаться временной привязкой, детализацией, настройкой для решения определённых классов задач. В CMS были подготовлены базы данных для хранения набора моделей, использованных группой в течение последних 10 лет, ориентированные как на разработчиков ПО, так и на членов сотрудничества. Необходимо поддерживать не только актуальные модели, но и исторические – для пересчёта в случае уточнения описания детекторов и инфраструктуры эксперимента, а также для отслеживания устойчивости результатов вычислений при переходе к новым версиям пакета FLUKA.

Каждая расчётная задача имеет уникальный 4-уровневый индекс [69] для однозначной идентификации. Новый тег присваивается при любом изменении в исходных файлах, которое может повлиять на результат моделирования или формат собираемых данных. Сюда входят любые изменения геометрии, параметров моделирования, пользовательских файлов, внешних источников и карт магнитного поля. Первый уровень используется для указания на этап развития эксперимента (например, 4 и 5 – для Сеансов 2 и 3 Фазы 1, соответственно, 6 – для фазы 2), четвёртый – для дифференциации вариантов, отличающихся минимальными изменениями в геометрии или параметрах расчёта.

Описание материалов. При проведении расчётов наведённой радиоактивности стала очевидна необходимость учитывать также минорные (на уровне долей процента) примеси некоторых изотопов в материалах, поскольку нестабильные изотопы, возникающие в результате ядерных реакций, могут очень сильно (на порядки величины) различаться по своему вкладу в интенсивность наведённого РП. Так, например, небольшое количество серебра в контактах кабелей может создавать существенную часть вклада в суммарную МАД от всего массива кабелей после облучения. При расчётах наведённой радиоактивности стали должны быть с высокой точностью учтены концентрации никеля, кобальта и марганца.

Интерфейсы необходимы для сопряжения результатов исходного расчёта со входом последующего при выполнении многоступенчатых задач. Например, для расчёта ускорительного фона в CMS выстраивается вычислительная цепочка из нескольких этапов моделирования. В общем случае это:

- Моделирование формирования гало пучка и его перехвата (вычисление параметров заброса) первичными коллиматорами систем подавления дисперсии пучка [70]. Моделирование процесса краевого рассеяния протонов в первичных коллиматорах и взаимодействий (АЭК) во вторичных коллиматорах. Последующий транспорт сохранившихся протонов с малым отклонением по амплитуде или импульсу в магнитной структуре ускорителя до перехвата первичными или вторичными коллиматорами систем DS или третичными коллиматорами ТСТ в прямолинейных промежутках. Запись промежуточного файла с параметрами взаимодействий протонов, перехваченных ТСТ в IR5. На этом этапе использовались программы SixTrack [71] или STRUCT [72].
- Моделирование процесса упругого рассеяния протонов пучка на ядрах остаточного газа внутри вакуумной камеры ускорителя. Последующий транспорт упруго рассеянных протонов до перехвата коллиматорами систем DS или ТСТ. Запись промежуточного файла с параметрами взаимодействий протонов, перехваченных ТСТ в IR5. Применяются SixTrack либо STRUCT.
- Моделирование неупругих взаимодействий протонов пучка с ядрами остаточного газа в IR5, транспортировка продуктов взаимодействий до границы эксперимен-

тального зала, запись промежуточного файла. Используются пакеты FLUKA либо MARS.

- Моделирование неупругих взаимодействий протонов третичного гало пучка с коллиматорами ТСТ и транспортировка продуктов взаимодействий до границы экспериментального зала, запись промежуточного файла. Применяются пакеты FLUKA либо MARS.

Отдельный класс задач, в котором используются интерфейсы – **расчёты уровней наведённой радиоактивности**. В основном эти расчёты выполняются в группе RP (Radiation Protection) CERN, которая готовит карты МАД и разрабатывает планы доступа персонала к оборудованию. В обязанности группы RadSim входит подготовка и предоставление актуальной модели эксперимента и проведение бенчмаркинга собственных тестов в CMS.

При малом времени выдержки (после облучения) доминируют короткоживущие радионуклиды, то есть распределение МАД примерно соответствует распределению потока адронов высоких энергий. При большом времени выдержки доминируют долгоживущие изотопы. В этом случае распределение сильно зависит от композиции близлежащих материалов.

В сложных случаях неизбежна модификация геометрии, рассматриваемой на разных стадиях решения задачи моделирования поля наведённого излучения. Например, первая часть расчётной задачи – моделирование АЭК в “закрытой” рабочей геометрии детектора. В процессе АЭК в результате неупругих взаимодействий адронов с атомными ядрами производятся остаточные ядра, многие из которых нестабильны и могут в дальнейшем распадаться с испусканием гамма-излучения. Информация о концентрации изотопов в ячейках геометрической модели запоминается (готовится интерфейс). Детектор при обслуживании находится в одной из открытых конфигураций. Для расчёта уровней наведённой радиоактивности вокруг частей детектора должна быть использована открытая геометрия. Последовательность подобных физических задач может решаться по отдельности, но гораздо эффективнее иметь возможность делать расчёты в рамках единой модифицируемой модели. Для этого необходимо связать первичное представление геометрии с результатами расчётов АЭК, а затем иметь возможность

трансформировать геометрическую модель, поворачивая, перемещая или удаляя отдельные объекты, а также добавляя новые (например, временную локальную защиту персонала или модель человеческого тела). На втором этапе производится моделирование распространения гамма-излучения, возникающего при распаде радиоактивных изотопов, и расчёт МАД. Этот подход был реализован в рамках программного комплекса FLUKA/FLAIR/SESAME [73] и был применён сначала для эксперимента CMS, а затем и в других проектах.

Использование SESAME кардинально повышает эффективность расчётов наведённого излучения в открытой конфигурации CMS и планирования работы персонала с активированным оборудованием во время технических остановок.

Представление результатов. Результаты выполнения расчётных задач (подробная статистика, накопленная в привязке к определённой модели) сохраняется для всех важных этапных моделей и доступна для всех членов сотрудничества. Для этого подготовлено специальное ПО – Radiation Simulation Plotting Tool [33], которое позволяет заказывать онлайн графическую или численную информацию о функционалах РП в различных областях детектора или зала CMS.

7. Бенчмаркинг вычислений

В настоящее время в сотрудничестве CMS принято, что совокупный “фактор безопасности” для расчётов РП в центральной области (трекер, электромагнитный калориметр) равен 1.5, в промежуточной (адронный калориметр) – 2, на периферии (мионая система и зал) – 3 [19]. При размещении оборудования в определённой области эксперимента следует принять во внимание, что в результате неопределённости модели или физических алгоритмов реальные радиационные нагрузки могут оказаться выше расчётных в соответствующее количество раз.

Единственный способ верификации результатов моделирования – попытаться получить экспериментальные данные о радиационном поле и сравнить с расчётом. Поскольку модель CMS достаточно сложна, а физические алгоритмы пакета FLUKA регулярно проверяются в бенчмарках с простыми и легко воспроизводимыми условиями [74, 75], наша главная задача – проверить адекватность геометрической модели и исходной информации, на которой она построена. Сложность проблемы заключается в

отсутствии универсальных экспериментальных методов измерения РП во всём диапазоне энергий и сортов частиц излучения. Все существующие подходы дают ограниченные результаты лишь по некоторым характеристикам поля излучения – например, свёртку спектра адронов или нейтронов с функцией чувствительности (ФЧ) прибора, поглощённую дозу или МАД.

Сами по себе детекторы экспериментальной установки CMS не предназначены для получения данных о радиационных полях. Прямые измерения РП при помощи подсистем обычно требуют разработки специальных триггеров для отбора информации и анализа, чтобы выделить сигнал от радиационного фона [47]. Иногда измерения степени деградации детектора вследствие радиационных повреждений сравнивают с расчётными предсказаниями. Так, было проведено измерение тока утечки и напряжения обеднения в пиксельном и стриповых детекторах центрального трекера CMS и сравнение с прогнозами FLUKA [76]. Ток утечки в слоях стрипового детектора согласуется с расчётами в пределах 20%. Для напряжения обеднения согласие в пределах 10%.

Оптимальная стратегия – использовать относительно простые и надёжные радиационные мониторы с известной ФЧ, разместив их в нескольких легко доступных позициях с заведомо разным спектром излучения и перекрыв, таким образом, пространство экспериментального зала вокруг главных источников рассеянного излучения. Если доступны несколько типов мониторов, каждый со своей ФЧ, то следует дополнить ими уже образованную сеть, в нескольких точках разместив рядом мониторы разных типов, чтобы иметь возможность оценить корректность расчётного спектра РП путём сравнения показаний мониторов различного типа.

В CMS рассматриваются возможности расширить методики измерения характеристик поля и число специализированных детекторов РП. В Таблице 1 приведены результаты расчёта динамического диапазона функционалов РП в экспериментальном зале CMS для условий Фазы 2 БАК [20].

Желательно, чтобы мониторы, используемые для бенчмаркинга, удовлетворяли следующим требованиям:

- Кроме знания стандартной ФЧ монитора, которая может быть применена для свёртки спектра излучения для сравнения расчёта с измерениями, полезно провести ин-

дивидуальную калибровку каждого монитора в доступных полях, поскольку мониторы одного типа, как правило, не идентичны.

- Может оказаться важным использование угловых поправок к ФЧ монитора, так как угловое распределение излучения в экспериментальном зале весьма анизотропно и различно для разных частей энергетического спектра.
- Рекомендуется, чтобы показания мониторов были достаточно просто интерпретируемые. Сигнал нейтронного монитора не должен зависеть от гамма-фона, а чувствительность монитора обязана оставаться стабильной хотя бы в течение года, то есть прибор должен обладать высокой радиационной стойкостью и стабильностью.
- Данные, поступающие с мониторов, должны быть включены, кроме глобальной сети БАК, ещё и в локальную сеть сбора данных, чтобы иметь возможность оперативного контроля качества данных и работоспособности наших детекторов.
- Мониторы должны находиться в фиксированном положении (и ориентации) в течение нескольких лет, чтобы отслеживать изменения РП после ежегодных технических остановок и вмешательства в конструкцию эксперимента. Также необходимо разработать процедуру ежегодной оперативной калибровки *in situ*.

Таблица 1:

Динамический диапазон функционалов РП в местах возможного размещения радиационных мониторов. D_a – поглощённая доза (TID), F_h – флюенс адронов с энергией выше 20 МэВ, F_{neq} – флюенс эквивалентных нейтронов с энергией 1 МэВ, dF_{neq}/dt – поток эквивалентных нейтронов с энергией 1 МэВ, F_{nth} – флюенс тепловых нейтронов. Центральная область означает периферию центрального детектора, переднего калориметра и передней защиты. Интегральные величины нормированы на интегрированную 4000 фб^{-1} , поток эквивалентных нейтронов – на мгновенную светимость $7.5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Величина	Центральная область		Балконы (электроника)	
	Минимум	Максимум	Минимум	Максимум
$D_a [\text{Гр}]$	0.90 ± 0.15	96 ± 4	2.9 ± 0.2	18 ± 2
$F_h [\text{см}^{-2}]$	$(5.6 \pm 0.9) \times 10^6$	$(1.05 \pm 0.01) \times 10^{12}$	$(5.3 \pm 0.2) \times 10^9$	$(1.46 \pm 0.02) \times 10^{11}$
$F_{neq} [\text{см}^{-2}]$	$(3.75 \pm 0.07) \times 10^{10}$	$(3.49 \pm 0.01) \times 10^{12}$	$(1.09 \pm 0.01) \times 10^{11}$	$(6.58 \pm 0.04) \times 10^{11}$
$dF_{neq}/dt [\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}]$	$(6.98 \pm 0.14) \times 10^2$	$(6.56 \pm 0.02) \times 10^4$	$(2.04 \pm 0.02) \times 10^2$	$(12.35 \pm 0.08) \times 10^3$
$F_{nth} [\text{см}^{-2}]$	$(3.56 \pm 0.08) \times 10^{10}$	$(4.50 \pm 0.01) \times 10^{12}$	$(1.78 \pm 0.02) \times 10^{11}$	$(4.22 \pm 0.02) \times 10^{11}$

CMS уже использует нейтронные мониторы GFPC, мониторы МАД REMUS, комбинированные радиационные мониторы LHC RM.

Мониторы **GFPC** (Gas Filled Proportional Chamber) [20, 77, 78] оценивают поток медленных нейтронов, используя частоту реакций захвата тепловых нейтронов на ядрах бора ^{10}B . Тепловые нейтроны образуются в замедлителе, окружающем камеру. Мониторы калибруются индивидуально на нейтронном Am-Be источнике для оценки индивидуальных различий, но, поскольку они эксплуатируются в гораздо более жёстком поле, для интерпретации сигнала также используется подробная расчётная калибровка с учётом угловой анизотропии чувствительности. Совпадение показаний мониторов с расчётами вокруг переднего калориметра – в пределах 30%, что весьма неплохо, учитывая сложную геометрию и наложение сигнала от различных источников нейтронов в этой области.

REMUS (The Radiation and Environment Monitoring Unified Supervision System) [79] – газонаполненные ионизационные камеры, первоначально предназначенные для измерения МАД наведённого излучения в зале после сеанса работы ускорителя. Могут также быть использованы в смешанном РП во время сеанса, поскольку имеют большой динамический диапазон, а их ФЧ известна [80]. Согласуются с расчётами в пределах фактора 2 [81, 82], что вполне удовлетворительно для экспериментального зала.

LHC RM (Radiation Monitor). Недорогой комбинированный монитор на коммерческих стандартных элементах электроники для параллельного измерения нескольких параметров РП [83-85]. Изготавливается в ЦЕРН. Измеряет поглощённую дозу (TID) при помощи металл-оксид-кремниевых полевых транзисторов (RADFET), флюенс эквивалентных нейтронов с энергией 1 МэВ с помощью PIN-диодов, флюенс высокоенергетических (выше 20 МэВ) адронов и флюенс тепловых нейтронов путём подсчёта сбоев одиночных событий (SEU) в блоках памяти SRAM. Одновременные измерения нескольких величин, важных для определения вероятности повреждения электроники, помогают сопоставить численные расчеты и понять сложное поле.

Этот монитор может быть базовым для образования основной 3D сети для онлайн контроля РП. Сейчас в CMS задействовано около 30 таких мониторов, всего на БАК – более 500.

Прибор разработан в первую очередь для контроля “горячих” участков на БАК и других ускорителях ЦЕРН с высокой мощностью дозы и спектром, включающим значительную долю заряженных адронов высоких энергий. Радиационное поле в экспери-

ментальном зале CMS сравнительно мягче и в основном определяется нейтронами с энергией в десятки МэВ и ниже. Для успешного использования LHC RM в условиях относительно мягких полей CMS необходимо проанализировать тестовые измерения, проведённые в рассеянных полях и подобрать соответствующие поправочные коэффициенты.

Предварительные сравнения показаний LHC RM по измерению флюенса высокогенеретических адронов показывают, что отличие расчёта от данных – в пределах фактора 2. Дальнейший анализ предполагается проводить, сравнивая показания групп мониторов, локализованных в одной области (или в сходных условиях), а также наблюдая за динамикой их откликов и корреляций между ними на протяжении нескольких сеансов.

Также рассматривается и испытывается детектор **TetraBall** [86]. Это относительно новый (для использования при высоких энергиях) нейтронный спектрометр, оптимизированный для работы в полях экспериментального зала CMS. TetraBall объединяет функциональность нескольких сфер Боннера [87] в едином замедлителе; он оснащён 42 SiC детекторами, размещёнными в тетраэдральной геометрии. Благодаря внутреннему свинцовому радиатору его ФЧ простирается до энергий в несколько ГэВ.

Успешные сравнения расчётов и измерений наведённой радиоактивности выполнены для трекера и центрального участка вакуумной камеры [54, 82]. Они подтвердили корректность описания геометрии в этой области, а также адекватность описания материалов вблизи измеренных участков, включая сам детектор, а также фронтальную электронику, систему поддержки и кабели.

8. Заключение

В большом эксперименте на ускорителе, особенно если он является рекордным по энергии или интенсивности используемых пучков, моделирование радиационных условий и измерение параметров радиационного поля должны планироваться и развиваться так же, как и работа других подсистем. Целесообразно с самого начала построить экспертную систему, предоставляющую данные и прогностические оценки о радиационных нагрузках в ответ на запросы различных групп эксперимента.

В настоящее время программный пакет FLUKA является оптимальным для проведения моделирования АЭК в сложной геометрии эксперимента. Применение возможностей FLAIR позволяет дополнительно использовать в расчётах также и другое ПО с исходной моделью FLUKA, что даёт возможность вычислительного бенчмаркинга с применением программ с разными наборами физических алгоритмов и оценки погрешности, определяемой этим фактором.

Наиболее полная информация для любой части эксперимента поступает из расчётов, и радиационные мониторы следует развёртывать для слежения за главными источниками рассеянного излучения. Поэтому мониторинг излучения в эксперименте должен прежде всего решать проблему бенчмаркинга расчётов РП, а не контроля дозы в местах размещения электроники.

При кооперации технических и финансовых возможностей нескольких экспериментов на БАК представляется перспективным дополнить онлайн-мониторинг излучения систематическим использованием пассивных активационных детекторов, для чего сейчас не имеется соответствующего оборудования.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за полезные обсуждения А.Д. Рябчиковой, коллегам по BRIL CMS Project, CMS Technical Coordination и LHC Background Studies Group, а также всем сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, принимавшим участие в этой работе на разных этапах.

Список сокращений

АЭК	адронно-электромагнитный каскад
БАК	Большой адронный коллайдер
ММК	метод Монте-Карло
МАД	мощность амбиентного эквивалента дозы
ПО	программное обеспечение
РП	радиационное поле
ФЧ	функция чувствительности
ЦЕРН	Европейский центр ядерных исследований (CERN, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)
ВН	(Beam Halo) компонент ускорительного фона, определяемый интенсивностью перехвата гало пучка системой подавления дисперсии
BRIL	(Beam Radiation Instrumentation and Luminosity) проект в рамках сотрудничества CMS
CMS	(Compact Muon Solenoid) эксперимент на БАК
DBG	(Distant Beam Gas) компонент ускорительного фона, определяемый интенсивностью упругих взаимодействий частиц пучка с ядрами остаточного газа в ионопроводе БАК
DS	(Dispersion Suppressor) система подавления дисперсии пучка
FIN	(Fixed Iron Nose) элемент передней защиты CMS
FS	(Forward Shielding) передняя защита
HL-LHC	(High Lumi Large Hadron Collider) вторая очередь БАК
IP	(Insertion Point) точка пересечения пучков в БАК
IR	(Insertion Region) прямолинейный промежуток на БАК
LBG	(Local Beam Gas) компонент ускорительного фона, определяемый интенсивностью неупругих взаимодействий частиц пучка с ядрами остаточного газа в ионопроводе БАК
MB	(Muon Barrel) центральная мюонная система CMS
ME	(Muon Endcap) торцевая мюонная система CMS
MTD	(Minimum ionizing particles Timing Detector) подсистема в CMS на HL-LHC

- NRM (Neutron and Radiation Monitoring) группа в проекте BRIL CMS
- RadSim (Radiation Simulation) группа в проекте BRIL CMS
- SDC (Solenoidal Detector Collaboration) проект эксперимента на SSC
- SEE (Single-Event Effects) стохастические эффекты, вызываемые единичными частицами.
- SEL (Single Event Latch-Up) короткое замыкание в электронной схеме, вызванное прохождением единичной частицы через чувствительную область
- SEU (Single-Event Upset) изменение состояния (ошибка), вызванное прохождением одиночной ионизирующей частицы.
- SSC (Superconducting Super Collider) проект сверхпроводящего коллайдера в США, закрытый в 1993 на этапе активного строительства
- TAS (Target Absorber Secondary) поглотитель вторичных частиц для защиты фокусирующего триплета от излучения из IP
- TID (Total Ionizing Dose) поглощённая доза
- TCT (Tertiary Collimator Target) третичный коллиматор системы подавления дисперсии пучка

Список литературы

- [1] Evans, L. and P. Bryant. *LHC Machine*. JINST. 2008. Vol. 3. No. 08. S08001-S08001. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/s08001
- [2] The ATLAS Collaboration. *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*. JINST. 2008. Vol. 3, no. 08, S08003-S08003, DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/s08003
- [3] The ALICE Collaboration. *The ALICE Experiment at the CERN LHC*. JINST. 2008. Vol. 3. No. 08. S08002-S08002. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/s08002
- [4] The CMS Collaboration. *The CMS experiment at the CERN LHC*. JINST. 2008. Vol. 3. No. 08. S08004-S008004. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004
- [5] The LHCb Collaboration. *The LHCb Detector at the LHC*. JINST. 2008. Vol. 3. No. 08. S08004-S008004. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004
- [6] Aberle O. et al. *High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC): Technical design report*. CERN, Geneva, Switzerland, 2020. CERN Yellow Reports CERN-2020-010. DOI: 10.23731/CYRM-2020-0010
- [7] CMS Collaboration. *The CMS tracker system project: Technical Design Report*. CERN, Geneva, Switzerland, 1997. CERN-LHCC-98-006, CMS-TDR-5.
- [8] CMS Collaboration. *The Muon Project Technical Design Report*. CERN, Geneva, Switzerland, 1997. CERN/LHCC 97-32, CMS TDR 3.
- [9] CMS Collaboration. *The CMS magnet project: Technical Design Report*. CERN, Geneva, Switzerland, 1997. CERN-LHCC-97-010, CMS-TDR-1.
- [10] CMS Collaboration. *Electromagnetic Calorimeter Technical Design Report*. CERN, Geneva, Switzerland, 1997. CERN/LHCC 97-33, CMS TDR 4.
- [11] CMS Collaboration. *The Hadron Calorimeter Design Report*. CERN, Geneva, Switzerland, 1997. CERN/LHCC 97-31, CMS TDR 2.
- [12] <https://fluka.cern>
- [13] Battistoni G., et al. *Overview of the FLUKA code*. Ann. Nucl. Energy. 2015. Vol. 82. P. 10-18. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.11.007
- [14] Ahdida C., et al. *New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code*. Frontiers in Physics. 2022. Vol. 9. 788253. DOI: /10.3389/fphy.2021.788253
- [15] Hugo G., et al. *Latest FLUKA developments*. EPJ Nuclear Sciences & Technologies. 2024. Vol. 10. DOI: /10.1051/epjn/2024023
- [16] CMS Muon group. *Measurement of the background in the CMS muon detector in pp-collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* , Eur. Phys. J. C. 2024, Vol. 84. P. 955, DOI:10.1140/epjc/s10052-024-13077-x

- [17] CMS Collaboration. *Technical proposal for the Phase-II upgrades of the CMS detector*. CERN, Geneva, 2015. CERN-LHCC-2015-010, LHCC-P-008, CMS-TDR-15-02. DOI: 10.17181/CERN.VU8I.D59J
- [18] Dabrowski A. *Upgrade of the CMS instrumentation for luminosity and machine induced background measurements*. Nucl. Phys. B. 2016. Vol. 273-275, P. 1147-1154, DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.180
- [19] CMS Collaboration. *The Phase-2 Upgrade of the Beam Radiation, Instrumentation, and Luminosity Detectors, Conceptual Design*. CERN, Geneva, Switzerland, 2019. CMS-TDR-19-003, CMS NOTE-2019/008
- [20] CMS Collaboration. *The Phase-2 Upgrade of the CMS Beam Radiation Instrumentation and Luminosity Detectors*. CERN, Geneva, Switzerland, 2021. CERN-LHCC-2021-008, CMS-TDR-023.
- [21] *Engineering Design Review of Forward Shielding System*. CERN CMS-GM-RR-0009 INFR-EDR-01.
- [22] Huhtinen M. *Background in the outer muon system with the staged shielding during the initial years of LHC*. CMS IN/98-025. CERN, 1998.
- [23] Ажгирей И.Л., В.В. Таланов. *Анализ эффективности передней радиационной защиты детектора CMS на LHC*. ПТЭ. 2002, № 4. С.79-86.
- [24] CMS. *The Compact Muon Solenoid Letter of Intent*. CERN/LHCC 92-3.
- [25] Kulik A. *Rates in the SDC muon chambers and optimal design*. SSC SDC-91-30
- [26] Waters L. *Neutron currents in the SDC*. SDC Note SDC-92-361.
- [27] Azhgirey I. and A. Uzunian. *Calculations of backgrounds for SDC Forward Muon Spectrometer*, in: SDC Forward Muon Workshop 18-29.01.1993. SDC-92-414, Vol.1, P.343.
- [28] Azhgirey I.L. and A.V. Uzunian. *Muon chambers occupancy in the low energy background fields*. CERN CMS TN/94-265.
- [29] Battistoni G. et al. *Background calculations for the ATLAS detector and hall*. ATLAS IN GEN-NO-010 (94).
- [30] Huhtinen M. and P.A. Aarnio. *Radiation problems at LHC experiments, I: Neutral particle background*. CERN CMS TN/94-135
- [31] Bruce R. et al. *Sources of machine-induced background in the ATLAS and CMS detectors at the CERN Large Hadron Collider*. Nucl. Instr. Meth. A. 2013. Vol. 729, P. 825-840, DOI: 10.1016/j.nima.2013.08.058
- [32] Azhgirey I.L. et al. *Beam-Induced Background Simulation for the CMS Experiment at the LHC*. in: Proceedings of 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia, 2021. P. 225, DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA55
- [33] Mallows S. et al. *Monte Carlo simulations of the radiation environment for the CMS experiment*. Nucl. Instr. Meth. A. 2016, vol. 284, p. 30-32, DOI: 10.1016/j.nima.2015.11.044

- [34] Stepenov A. *Measurement of signal decrease in Forward Calorimeter due to radiation damage in Run 2*. CERN, Geneva, Switzerland, 2020. CMS Detector Note CMS-DN-2020-044.
- [35] CMS Collaboration. *Search for decays of stopped exotic long-lived particles produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* . JHEP. 2018. No. 05. P. 127, DOI:10.1007/JHEP05(2018)127. arXiv:1801.00359.
- [36] CMS Collaboration. *Search for new physics in final states with a single photon and missing transverse momentum in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* . JHEP. 2019. No. 02. P. 074. DOI:10.1007/JHEP02(2019)074. arXiv:1810.00196.
- [37] Baumann, R. *Soft Errors in Advanced Computer Systems*. IEEE Design & Test of Computers. 2005. No. 05-06. P. 258-266.
- [38] *Overview of radiation effects on detector systems*. Eds. I. Dawson, M. Moll, F. Faccio, A. Weidberg. DOI: 10.23731/CYRM-2021-001.3. in: *Radiation effects in the LHC experiments: Impact on detector performance and operation*. Ed. Ian Dawson. CERN Yellow Reports: Monographs, CERN-2021-001. P. 3, DOI: 10.23731/CYRM-2021-00
- [39] Cimmino A. and R. Froeschl. *Radiological characterization of material in the CMS cavern for LS2*. CERN, Geneva, Switzerland, 2019. Technical Report EDMS 2116795.
- [40] Кольчужкин А.М., В.В. Учайкин. *Введение в теорию прохождения частиц через вещество*. М., Атомиздат, 1978.
- [41] Гусев Н.Г. и др. *Защита от ионизирующего излучения, Том 1, Физические основы защиты от излучения*. М., Энергоатомиздат, 1989.
- [42] Франк-Каменецкий А.Д. *Моделирование траекторий нейтронов при расчёте реакторов методом Монте-Карло*. М., Атомиздат, 1978.
- [43] Соболь И.М. *Численные методы Монте-Карло*. М., Наука, 1973.
- [44] Allison J. et al. *Recent Developments in GEANT4*. Nucl. Instr. Meth. A. 2016. Vol. 835. P. 186-225. DOI: /10.1016/j.nima.2016.06.125
- [45] Allison J. et al. *GEANT4 Developments and Applications*. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. Vol. 53. P. 270-278. DOI: 10.1109/TNS.2006.869826
- [46] Agostinelli S. et al. *GEANT4 – A Simulation Toolkit*. Nucl. Instr. Meth. A. 2003. Vol. 506. P. 250. DOI: /10.1016/S0168-9002(03)01368-8
- [47] Abbas M. et al. *Benchmarking LHC background particle simulation with the CMS triple-GEM detector response to background particles for the CMS experiment*. JINST. 2021. Vol. 16. P. 12026. DOI: 10.1088/1748-0221/16/12/P12026
- [48] CMS Collaboration. *The Compact Muon Solenoid Technical Proposal*. CERN, Geneva, Switzerland, 1994. CERN/LHCC 94-38.
- [49] Azhgirey I.L. and V.V. Talanov. *Status of MARS program complex*. in: Proceedings of XVIII Charged Particle Accelerator Workshop, Protvino, Russia, 2000. Vol. 2. P. 184.

- [50] Ажгирей И.Л. и др. *MARS93. Развитие комплекса программ ИФВЭ для моделирования ядерно-электромагнитных каскадов в области энергий до 20 ТэВ*. Протвино, 1993. ИФВЭ 93-19.
- [51] Zeitnitz C. *The GEANT-CALOR interface and benchmark calculations of ZEUS test calorimeters*. Nucl. Instr. Meth. A. 1994. Vol. 349. P. 106. DOI: 10.1016/0168-9002(94)90613-0
- [52] Azhgirey I. et al. *Machine-induced Background in the Near-beam Detectors (IR1/IR5)*. LHC Project Note 414. CERN, 2008.
- [53] Albrow M.G. et al. *The FP420 R&D project: Higgs and New Physics with forward protons at the LHC*. JINST. 2009. Vol. 4. T10001. DOI: 10.1088/1748-0221/4/10/T10001
- [54] *Simulation of radiation environments*. Eds. I. Dawson, S. Mallows. DOI: 10.23731/CYRM-2021-001.35. in: *Radiation effects in the LHC experiments and impact on detector performance and operation*. Ed. Ian Dawson, CERN Yellow Reports: Monographs, CERN-2021-001. P. 35. DOI: 10.23731/CYRM-2021-001
- [55] Roesler S., R. Engel, and J. Ranft. *The Monte Carlo event generator DPMJET-III*. in: *Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications*. Berlin, Springer, 2000. P. 1033-1038. DOI: 10.1007/978-3-642-18211-2_166
- [56] Fedynitch A. *Cascade equations and hadronic interactions at very high energies*. PhD thesis: 27.11.2015, Karlsruhe Institute of Technology, 2015. CERN-THESIS-2015-371. DOI: 10.5445/IR/1000055433
- [57] Sjostrand T. et al. *An Introduction to PYTHIA 8.2*. Comput. Phys. Commun. 2015. Vol. 191. P. 159-177. DOI: 10.1016/j.cpc.2015.01.024
- [58] Sjostrand T., S. Mrenna and P. Skands. *PYTHIA 6.4 Physics and Manual*. JHEP. 2006. Vol. 05, P. 026. DOI: 10.1088/1126-6708/2006/05/026
- [59] Таланов В.В. *Формализация алгоритма моделирования транспорта частиц*. Протвино, 1994. ИФВЭ 94-137.
- [60] Emmett, M.B. *The MORSE Monte Carlo Radiation Transport Code System*. ORNL, Oak Ridge, TN, USA, 1984. ORNL-4972/R2.
- [61] Emmet, M.B. *MORSE-CGA, A Monte Carlo Radiation Transport Code with Array Geometry Capability*. ORNL, Oak Ridge, TN, USA, 1985. ORNL-6174.
- [62] CMS Collaboration. *The Phase-2 upgrade of the CMS tracker, Technical Design Report*. CERN, Geneva, Switzerland, 2017. CERN-LHCC-2017-009, CMS-TDR-014.
- [63] CMS Collaboration. *A MIP timing detector for the CMS Phase-2 upgrade, Technical Design Report*. CERN, Geneva, Switzerland, 2019. CERN-LHCC-2019-003, CMS-TDR-020.
- [64] <https://flair.web.cern.ch/flair>
- [65] Donadon A., G. Hugo, C. Theis, V. Vlachoudis. *FLAIR3 – recasting simulation experiences with the Advanced Interface for FLUKA and other Monte Carlo codes*. EPJ Web Conf. 2024. Vol. 302. DOI: /10.1051/epjconf/202430211005

- [66] Salvat F. *PENELOPE-2018, a code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport*. In: Workshop Proceedings, Barcelona, Spain, 28.01-01.02.2019. NEA/MBDAV/R – 2019, p. 1
- [67] Werner C.J. *MCNP Version 6.2 Release Notes*. LANL, Los Alamos, USA, 2018. LA-UR-18-20808. DOI: 10.2172/1419730
- [68] Sato T. *Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) version 3.02*. J. Nucl. Sci. Technol. 2018. Vol. 55. P .684-690. DOI: 10.1081/00223131.2017.1419890
- [69] Guthoff M. *The CMS nominal FLUKA Model; version 1.0.0.0*. CERN, Geneva, Switzerland, 2015. CERN-CMS-NOTE-2015-004.
- [70] Trenkler T. and J.B. Jeanneret. *K2: A Software Package evaluating Collimation Systems in Circular Colliders (Manual)*. CERN SL/Note 94-105 (AP), 1994.
- [71] De Maria R. *SixTrack Version 5: Status and New Developments*. In: Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia, 2019. P. 3200–3203. DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2019-WEPTS043
- [72] Baishev I., A. Drozhdin and N. Mokhov. *STRUCT program User's Reference Manual*. SSCLab, Dallas, USA, 1994. SSCL-MAN-0034.
- [73] Cooijmans T. and M. Guthoff. *SESAME Documentation. Release 2.1.2*. CERN, Geneva, Switzerland, 2015. Rep. CERN EDMS 1520812. Vol. 1.
- [74] Nakao N. et al. *Measurement and simulations of high energy neutrons through a various thickness of concrete and steel shields using activation detectors at CHARM and CSBF*. Journal of Nuclear Science and Technology, 2024. Vol. 61, No. 4, P. 429-447. DOI: 10.1080/00223131.2023.2239243
- [75] Bozzato D. et al. *Monte Carlo intercomparison and benchmark of the neutron streaming in the ramified access maze of the CERN High-energy AcceleRator Mixed field (CHARM) facility at CERN*. Nucl. Instr. Meth. A. 2024. vol. 1066. P. 169565, DOI: /10.1016/j.nima.2024.169565
- [76] *Measurements of radiation damage on sensors*. Eds. A. De Cosa, B. Nachman, P. Collins, DOI: 10.23731/CYRM-2021-001.59. In: *Radiation effects in the LHC experiments: Impact on detector performance and operation*. Ed. Ian Dawson. CERN Yellow Reports: Monographs. CERN-2021-001. P. 59. DOI: 10.23731/CYRM-2021-001
- [77] Gribushin A.M. et al. *A Neutron Field Monitoring System for Collider Experiments*. Instrum. Exp. Tech. 2017. Vol. 60. P. 167-174. DOI: 10.1134/S0020441217020051
- [78] Azhgirey I. et al. *Neutron monitors for high energy accelerators*. Proceedings of 26th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2018), IHEP, Protvino, Russia, October 1–5, 2018. P. TUPSA38. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2018-TUPSA38
- [79] Forkel-Wirth D. et al. *Radiation monitoring system for the environment and safety project*. CERN ST Note 2002-006-MA. 2002.
- [80] Theis C. et al. *Field calibration studies of the PMI ionization chamber in the UX85 cavern*. Tech. Rep. CERN, 2008.

- [81] Azhgirey I. et al. *Benchmarking of the Radiation Environment Simulations for CMS experiment at LHC*. Proceedings of the 12th Int. Particle Acc. Conf. IPAC2021, Campinas, Brazil, 2021. P. 2235-2238. DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB317
- [82] Wanczyk J. *Measurements and estimates of the radiation levels in the CMS Experimental Cavern using Medipix and RAMSES monitors, and the FLUKA Monte Carlo code*. Master thesis: 31.07.2019. Krakow, AGH University of Science and Technology, 2019. CERN-THESIS-2019-212.
- [83] Spezia G. et al. *Operational Experience of the LHC RADiation MONitoring (RADMON) System*. Proceedings of Science. 2012. Vol. 143. DOI: 10.22323/1.143.0024
- [84] Røed K. et al. *Method for Measuring Mixed Field Radiation Levels Relevant for SEEs at the LHC*. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2012. Vol. 59. No. 4, P. 1040-1047. DOI: 10.1109/TNS.2012.2183677
- [85] Kramer D. et al. *LHC RadMon SRAM Detectors Used at Different Voltages to Determine the Thermal Neutron to High Energy Hadron Fluence Ratio*. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2011. Vol. 58. P. 1117-1122. DOI: 10.1109/TNS.2011.2105891
- [86] Bedogni R. et al. *TetraBall: A single-moderator neutron spectrometer for HL-LHC*. Nucl. Instr. and Meth. A. 2024. Vol. 1068. P. 169805. DOI: 10.1016/j.nima.2024.169805
- [87] Bramblett R.L. et al. *A New Type of Neutron Spectrometer*. Nucl. Instr. Meth. 1960. Vol.9. P. 1-12.

Рукопись поступила 31 октября 2025 г.

И.Л. Ажгирей и др.

Прогнозирование радиационных полей в эксперименте CMS на БАК.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 11.11.2025 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 5. Уч.-изд.л. 3,84. Тираж 68. Заказ 8. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

<http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2025-7,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2025
