



АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА КОЛЛАЙДЕРАХ

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

НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ

На примере прогнозирования радиационных полей при проектировании экспериментов на коллайдерах SSC и БАК с использованием различных транспортных программ определены основные источники неопределенностей. Показано, что основной вклад в неопределенности вносят модельные представления геометрии и материалов, генераторов описания p - p и p - A взаимодействий и нейтронных данных. Обсуждается понятие фактора запаса (Safety Factor, SF) в эксперименте CMS на БАК, определяются области с различными значениями SF.

Введение

Прогнозирование радиационных полей (РП) проводится при проектировании и эксплуатации ускорителей и экспериментальных установок. Основной аппарат для этого – пакеты программ переноса излучения методом Монте-Карло [1].

Мы предлагаем анализ достоверности и надёжности результатов моделирования радиационного поля на основе опыта такой работы на БАК [2] и в эксперименте CMS [3]. Важно уметь качественно и количественно оценить основные неопределенности расчета, поскольку статистические ошибки моделирования, как правило, много меньше возможных систематических ошибок.

1. Классификация неопределенностей

Основные группы неопределенностей связаны с:

- погрешностями модели задачи (точностью описания геометрии и материалов);
- точностью алгоритмов транспорта частиц;
- достоверностью данных о сечениях взаимодействия частиц с веществом;
- погрешностью программ-генераторов образования вторичных частиц в первичном взаимодействии;
- правильностью выбора алгоритмов сбора интересующих нас функционалов и настройки энергетических порогов транспорта и образования частиц;

- коэффициентами нормировок для возможных сценариев задачи.

2. Неопределенности модели

Современная модель эксперимента CMS – это математическое описание геометрии и материалов детекторов и экспериментального зала, созданное на основе доступных производственных чертежей, спецификации материалов, а также параметров и допусков для подсистем. Никакая модель не может воспроизвести реальный дизайн с абсолютной точностью, это требует слишком больших усилий и ресурсов. Требуется компромисс между степенью детализации геометрии и эффективностью моделирования.

На рис. 1 показана эволюция модели баррельного и торцевого трека CMS (ТК) для программы FLUKA [4].

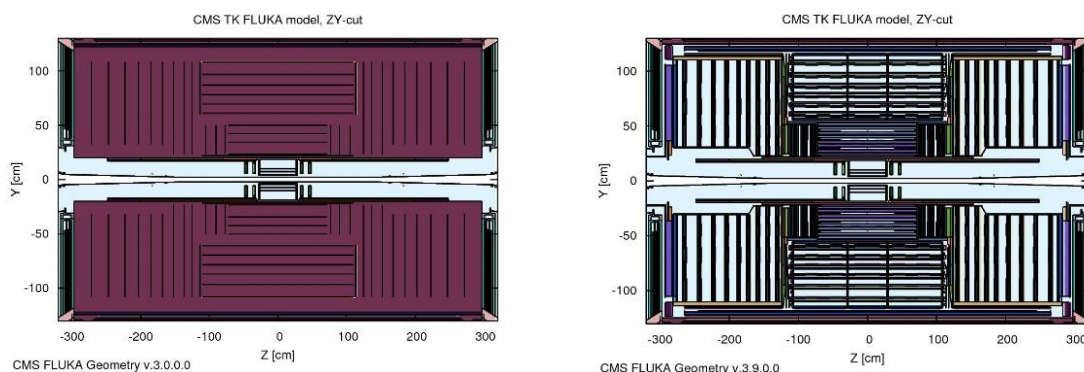


Рис. 1: слева модель CMS ТК v.3.0.0.0, справа ТК v.3.9.0.0

В первоначальной модели ТК (версия v.3.0.0.0, 1997 год) [5] был описан набор кремниевых цилиндрических слоев в баррельной части и кремниевых дисков для торцевых областей, причем масса кремниевых сенсоров составила 73% от проектной. Остальное пространство было заполнено усредненным материалом, описывающим инфраструктуру детектора массой 2150 кг, что составляет 62% от проектной. Модель v.3.9.0.0 (февраль 2015 г.) описывает текущую конструкцию ТК с высоким уровнем детализации элементов, включая механическую структуру, сенсоры, радиальные и аксиальные сервисы (кабели, коннекторы и систему охлаждения) и спецификацию материалов, принятую в проекте. Такое различие между исходной и окончательной версиями приводит к росту флюенса всех частиц на 30% (см. рис. 2, слева), флюенса эквивалентных нейтронов с энергией 1 МэВ в кремнии на 15% (рис. 2, справа).

Использование усредненных материалов (гомогенное приближение) не всегда оправдано. Так, ожидаемое значение поглощенной дозы в слое сцинтиллятора адронного

калориметра с тонкой продольной сегментацией вдвое выше значения поглощенной дозы, усредненной по всему слою [6].

Состав и композиция материала не всегда известны точно, неопределенность может быть более 100%. Это касается не только основных конструкционных материалов, но и примесей. Содержание воды в бетоне, влажность воздуха могут быть критически важными для точности описания переноса низкоэнергетических нейтронов. Форма нейтронных спектров очень чувствительна к содержанию водорода в материалах.

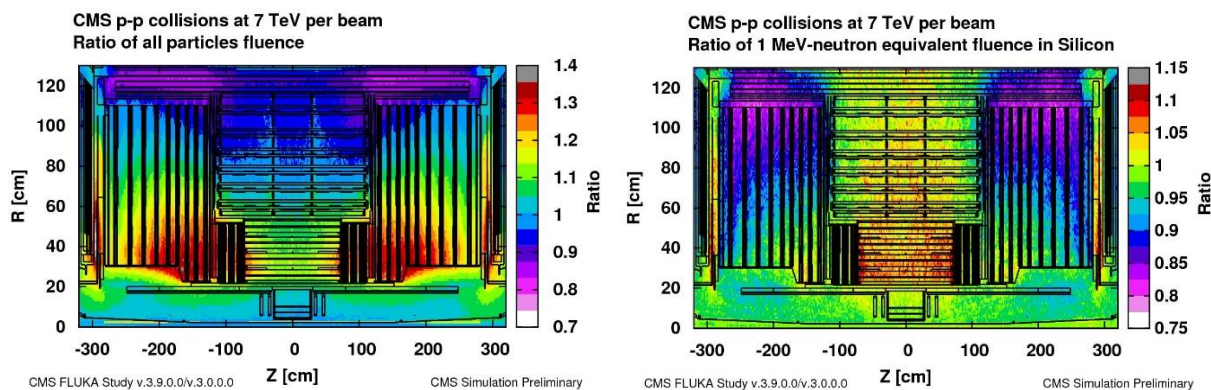


Рис. 2: слева – пространственное распределение отношения результатов расчета флюенса всех частиц для версий v.3.9.0.0 и v.3.0.0.0; справа – такое же отношение для расчета эквивалентного потока нейтронов с энергией 1 МэВ

Содержание серебра, кобальта и никеля в составе материалов важно для исследования уровней наведенной радиоактивности.

Существуют неопределенности, обусловленные несоответствием реального объекта проекту. Особенно сложно получить информацию о часто изменяющейся инфраструктуре эксперимента. По этой причине необходима постоянная валидация геометрии установки и зала, сравнение с моделью и расчетный анализ влияния различий на результаты.

Точность описания геометрии особенно важна вблизи первичных источников излучения. В современных экспериментах на коллайдерах к источникам излучения можно отнести не только точку встреч пучков, но и охранные коллиматоры, защищающие сверхпроводящие элементы магнитной структуры ускорителя от вторичного излучения из точки встреч. Поэтому вещество вблизи траектории пучка частиц – вакуумная камера, элементы вакуумной системы, коллиматоры – должно быть описано в модели по возможности точно. Модернизация эксперимента, как правило, идет отдельно с модернизацией ускорителя, поэтому обязанность группы, ведущей расчеты РП, отслеживать изменения в проекте ускорителя и проверять их влияние на условия проведения эксперимента.

3. Неопределенности алгоритмов транспорта частиц

Этот вид неопределенностей вызван несовершенством алгоритмов транспорта частиц. Во многих транспортных кодах реализована достаточно грубая коррекция длины пути при описании многократного рассеяния заряженных частиц, а также отсутствует коррекция сечения и изменения величины ионизационных потерь на шаге транспорта заряженной частицы. Существенный вклад в неопределенность вносит алгоритм транспорта заряженной частицы в магнитном поле. Трекинг частицы выполняется итерациями до достижения заданной точности при пересечении границы ячейки геометрии.

Качество алгоритмов отдельных программ обычно проверяется с помощью эталонных тестов на макроскопическом уровне (толстые мишени, сложные геометрические формы). В эксперименте, если есть такая возможность, необходимо сравнивать результаты расчётов по разным программам для выявления погрешностей [7].

4. Неопределенности данных сечений взаимодействия частиц

Еще одним источником неопределенностей являются данные сечений взаимодействия частиц с веществом. Как и в предыдущем случае, это в большей степени ответственность авторов кода, но и в эксперименте желательно сравнение разных программ, как в полной геометрии, так и вычислительных бенчмарках.

Необходимо упомянуть погрешности, возникающие при различных подходах к использованию групповых и поточечных данных для моделирования переноса низкоэнергетических нейтронов ($E < 20$ МэВ). Так, при использовании заблокированных и неблокированных нейтронных данных [8, 9] возникают различия от 10 до 300%, в зависимости от задачи [10].

5. Неопределенность генераторов образования вторичных частиц

На рис. 3 слева показано распределение множественности заряженных адронов по псевдобыстроте для двух генераторов: DPMJET III [11, 12] и PYTHIA8 [13, 14] (с параметрами настройки для CMS) при моделировании протон-протонного взаимодействия с энергией 7+7 ТэВ. Очевидно, что существует проблема с описанием выхода заряженных адронов в диапазоне $2 < |\eta| < 7.5$. На рис. 3 справа показано пространственное распределение отношения результатов этих двух расчетов (PYTHIA/DPMJET) для центральной области эксперимента CMS. Для больших значений η (в основном это дифракционные частицы) различие достигает фактора 1.5. Таким образом, использование

различных генераторов в качестве источника не даёт отличий в центральной области CMS, но в задачах, связанных с детекторами, расположенными вблизи пучка, или с радиационными нагрузками на сверхпроводящие магниты около экспериментальной зоны возможны заметные расхождения.

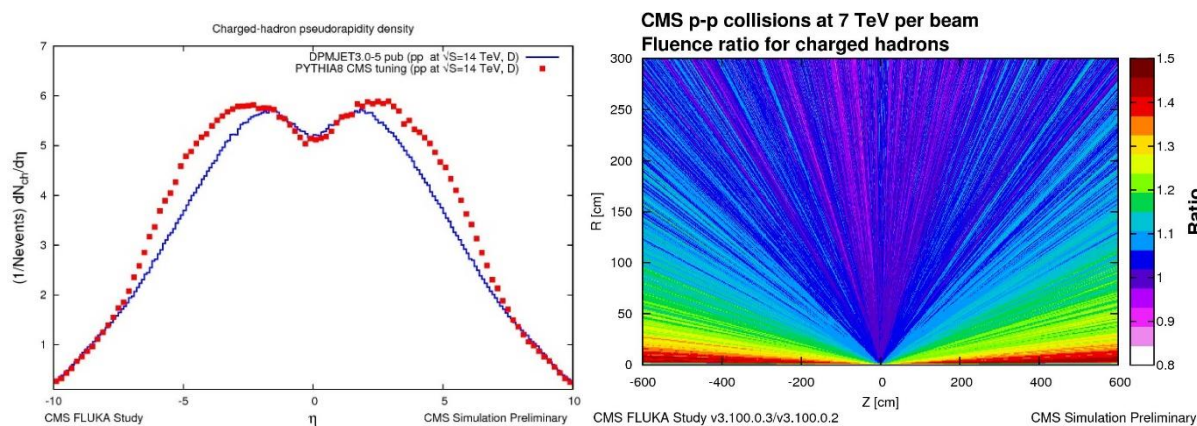


Рис. 3: слева – распределение множественности вторичных заряженных адронов по псевдобыстроте для протон-протонного столкновения при энергии 7+7 ТэВ, расчет - DPMJET3.0 и PYTHIA8; справа - пространственное распределение отношения результатов этих двух расчетов (PYTHIA/DPMJET) для центральной области CMS

6. Неопределенности алгоритмов сбора радиационных функционалов и энергетических порогов для образования и транспорта частиц

Неопределенности алгоритмов сбора связаны в первую очередь ограниченностью самих алгоритмов, поскольку энергия частицы усредняется на шаге транспорта, а пространственные, энергетические и прочие ячейки для сбора информации имеют дискретный размер.

Значительные неопределенности возникают из-за некорректного использования величин энергетических порогов образования и транспорта частиц. Пороги следует выбирать в соответствии с задачей. Так, при моделировании эффектов DPA или NIEL в кремниевых детекторах и электронике [15] следует использовать пороги для адронов – 1 кэВ, для нейтронов – 0.01 МэВ, для лептонов -- 50 кэВ. В случае оценки ожидаемой поглощенной дозы пороги в гетерогенных структурах (например, в адронном калориметре) для сопряженных областей должны быть одинаковыми, чтобы выполнялось условие электронного равновесия.

Следует помнить, что некоторые функционалы сами по себе являются приближениями. Так, эквивалентный поток нейтронов с энергией 1 МэВ дает оценку сечений повреждения электроники с точностью 30-40%.

7. Другие неопределенности

Неопределенность в нормировке финальных результатов связана в первую очередь с ошибками определения величины неупругого сечения при рабочей энергии (в расчетах для CMS принято 80 мб) и неопределенностью измерения интегральной светимости в каждом сеансе. Эти погрешности относительно невелики.

Еще одна часто встречающаяся проблема – необходимость предварительной оценки результата, который мы хотим получить, и анализ статистических проблем, которые могут при этом возникнуть. Это особенно важно для многоступенчатых расчетов, например, таких, где стыкуются рождение частиц в первичном источнике, транспорт через магнитную структуру ускорителя и моделирование РП в относительно небольшой области. При проведении вычислений рождения и транспорта частиц не все вероятные процессы должны быть рассмотрены, иначе есть риск потерять искомый эффект из-за его недостаточной статистической обеспеченности на фоне тривиальных процессов. В качестве примера можно привести задачу расчета радиационных нагрузок на обмотки сверхпроводящие магнитов или детекторы, расположенные на расстоянии в несколько десятков метров от точки встреч пучков CMS [16]. Решение подобных задач нужно начинать с определения тех областей фазового пространства РП, которые создают исследуемый эффект, и отслеживать именно их статистическую обеспеченность на всех стадиях расчета, регулируя список рассматриваемых процессов и пороги транспорта частиц (см. п. 3).

8. Программное обеспечение

Существует большое количество пакетов программ для моделирования РП. Это, прежде всего, универсальный инструментарий GEANT4 [17] и наиболее приспособленный для радиационных приложений пакет FLUKA [4]. Эти два пакета обладают наиболее развитой периферией (средствами работы с геометрией и алгоритмами обработки результатов вычислений) и наибольшим опытом верификации в различных условиях использования. Есть также большое количество других, более узко специализированных программ, которые используются в тех центрах, где находится группа поддержки такого ПО.

В больших проектах (SSC, БАК и эксперименты на них) на первых этапах проектирования привлекалось большое число ПО и проводились сравнения результатов расчётов для ещё сравнительно простых конфигураций задачи. В этих бенчмаркингах были обнаружены ошибки в популярных пакетах моделирования, связанные, как правило, с недостаточной отлаженностью алгоритмов при рекордных параметрах (при высоких

энергиях, или, наоборот, при описании эффектов воздействия низкоэнергетического нейтронного излучения). Определенную проблему представляет ограниченность константного обеспечения описания физических процессов. При отсутствии данных для какого-либо элемента должна быть автоматически предложена разумная альтернатива вместо нулевых или бесконечно больших сечений. Подобные сравнения позволяют обнаружить большое количество неопределенностей как в модели, так и в используемых программах [7, 18].

В ходе развития эксперимента в результате анализа надёжности результатов, удобства использования и т.п. в конце концов остается один пакет, который и используется в дальнейшем. С усложнением модели и количества вариантов расчётных задач параллельная поддержка нескольких пакетов в одном эксперименте требует слишком больших ресурсов. На этом этапе становится наиболее важной систематическая работа по верификации модели и используемых генераторов.

Заключение

Использование оцененных источников неопределенностей позволяет прогнозировать точность моделирования РП при развитии и изменениях конструкции эксперимента и ускорителя. Практика моделирования и прогнозирования РП показывает, что основной вклад в источник неопределенностей вносят модельные представления геометрии и материалов.

Для удобства анализа в сотрудничестве CMS было введено понятие фактора запаса (Safety Factor). В качестве ориентира при оценке уровней радиационных полей и интенсивности радиационных повреждений по результатам расчетных прогнозов необходимо использовать коэффициент запаса 1.5 для центрального трекера, 2 для калориметрии и 3 для мюонной системы и экспериментального зала CMS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ажгирей, И.Л. и др. *Прогнозирование радиационных полей в эксперименте CMS на БАК*, Протвино, 2025, Препринт НИЦ КИ-ИФВЭ 2025-7.
- [2] Evans, L., Bryant, P., *J. Instrum.*, 2008, vol. 3, № 08, S08001-S08001.
- [3] The CMS Collaboration, Chatrchyan, S., Hmayakyan, G., Khachatryan, V., et al., *J. Instrum.*, 2008, vol. 3, № 08, S08004-S08004.
- [4] <https://fluka.cern>

- [5] CMS Collaboration. *The CMS tracker system project: Technical Design Report*. CERN, Geneva, Switzerland, 1997, CERN-LHCC-98-006, CMS TDR 5.
- [6] Kurochkin, I., *Radiation Study for HE using FLUKA simulation*, CMS Upgrade Week, KIT, Karlsruhe, 31.03-04.04.2014
- [7] CMS Collaboration. *The Muon Project Technical Design Report*. CERN, Geneva, Switzerland, 1997, CERN-LHCC-97-010, CMS TDR 3.
- [8] Cuccoli, E., Ferrari, A., Panini, G.C. *A group library from JEF 1.1 for flux calculations in the LHC machine detectors*, JEF-DOC-340 (1991)
- [9] Абагян, Н.О и др., *Групповые константы для расчета реакторов и защиты*, М., Энергоиздат, 1981.
- [10] Kurochkin, I., *Calculational Benchmark for Neutron Transport in Iron Slab*, BRIL Radiation Simulation Meeting, 19 February, 2025.
- [11] Roesler, S., Engel, R., Ranft, J., in: *Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications*, Berlin, Springer, 2000, p. 1033-1038.
- [12] Fedynitch, A. *Cascade equations and hadronic interactions at very high energies*, PhD thesis, Karlsruhe Institute of Technology, 2015, CERN-THESIS-2015-371.
- [13] Bierlich, Ch. Et al., *A comprehensive guide to the physics and usage of PYTHIA 8.3*, SciPost Phys. Codebases 8 (2022), 10 November 2022.
- [14] Sjöstrand, T., *Comput. Phys. Commun.*, V. 246, 106910 (2020).
- [15] Nordlund K., et al., *Nat. Commun.* V. 9:1084 (2018)
- [16] Albrow, M.G. et al., *J. Instrum.*, 2009, vol. 4, T10001.
- [17] <https://geant4.web.cern.ch/>
- [18] Sirotenko, V., Azhgirey, I., Uzunian, A., SDC Note SDC-93-493, 1993.