



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
"КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ"



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ИМЕНИ А.А. ЛОГУНОВА
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

РАСЧЕТ ФОРМЫ БОЛЮСА В ИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

А. А.Ларионов¹, О.П.Ющенко¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» - Институт физики
высоких энергий им. А.А. Логунова.

ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии 01–06 июля 2025 года

Актуальность работы

- В Протвино при Институте физики высоких энергий (НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ) строится типовой клинический центр ионной терапии. Здесь, на специализированном углеродном пучке, будут испытываться новейшие методики лучевой терапии, которые в дальнейшем начнут применять по всей стране. Одной из важнейших задач, которая стоит перед сотрудниками института – это создание быстрой системы планирования ионной лучевой терапии.

Ионная лучевая терапия

- Физика ионной лучевой терапии сильно отличается от протонной и фотонной. Это связано с значительным вкладом фрагментационных процессов (вклад фрагментов в физическую дозу может достигать 20%).
- Единственным корректным способом моделирования взаимодействия ионов с веществом является использование методов Монте-Карло.
- Существующие пакеты МК (GEANT4, FLUKA и др.)
- Поэтому крайне важно создание, такой программы, которая будет на порядки быстрее существующих пакетов МК и не будет хуже по точности.

Учет параметров в системе планирования ионной лучевой терапии



Болюс

- **Болюсы(компенсаторы)** — это ключевые элементы для формирования точного распределения дозы на дистальной стенке при лучевой терапии.
- Эти устройства представляют собой замедлители, создаваемые с учётом сложной формы целевой опухоли, и служат для обеспечения точного соответствия задней границы распределения дозы дистальной стенки мишени.
- Поэтому крайне важно разработать алгоритм позволяющий эффективно рассчитывать оптимальные формы болюсов, обеспечивая точное позиционирование пика Брэгга на дистальной стенке опухоли, для повышения точности и эффективности процедуры ионной лучевой терапии.

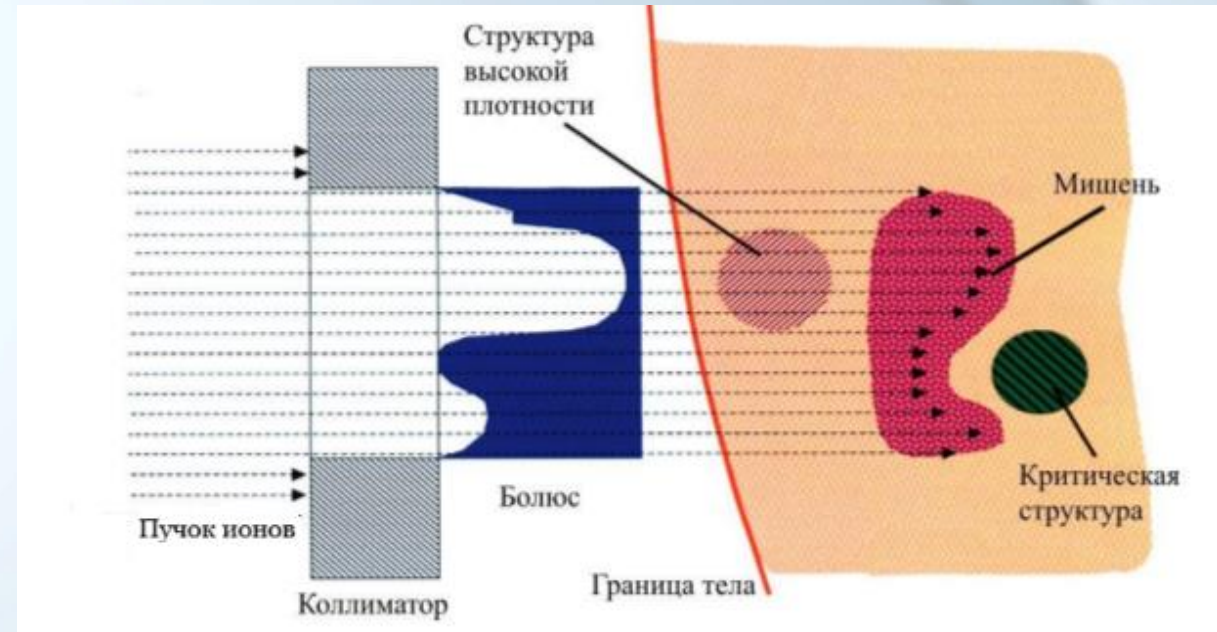


Рис.1 Схематичное использование болюса и коллиматора.

Алгоритм расчета болюса

- 1) Для каждой линии вокселей мы определяем энергию иона, которую он должен иметь, чтобы пик Брэгга был точно на задней стенке.
- 2) Таким образом, мы формируем набор входных энергий, для всей опухоли.
- 3) Мы выбираем максимальную энергию. Для этой энергии нам не требуется добавлять какой-либо материал на пути пучка.
- 4) Для всех других энергий мы должны на пути пучка расположить определенной количество вещества, которое обеспечит входную энергию в пациента, соответствующую этой воксельной линии.

Алгоритм расчета болюса

- Учет в Монте-Карло фрагментации является весьма ресурсозатратным процессом, что приведет к огромному количеству вычислений. Однако известно, что **локализация пика Брэгга зависит исключительно от электромагнитных взаимодействий (ионизационные потери)**, а большая часть времени расходуется на расчет моделирования адронных процессов.

Именно поэтому мы отключаем адронные процессы, оставив только электромагнитные взаимодействия.

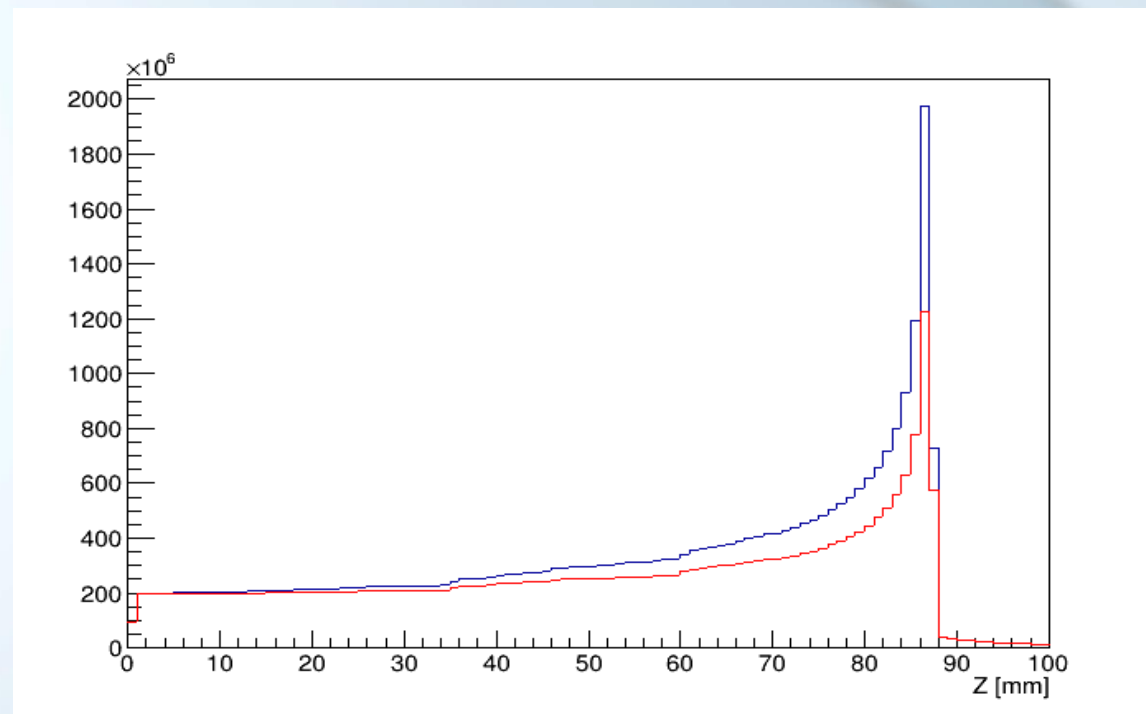


Рис. 2 Сравнение энергоснабжения в реальном фантоме пациента для всех физических процессов (красная линия) и только электромагнитных (синяя линия).

Форма болюса

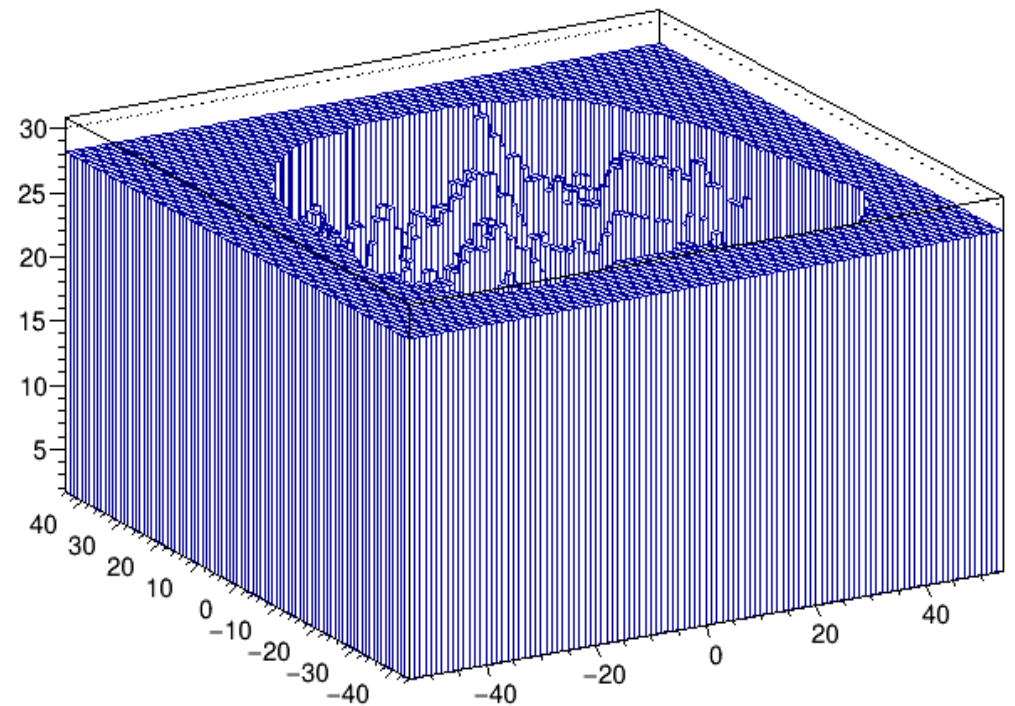
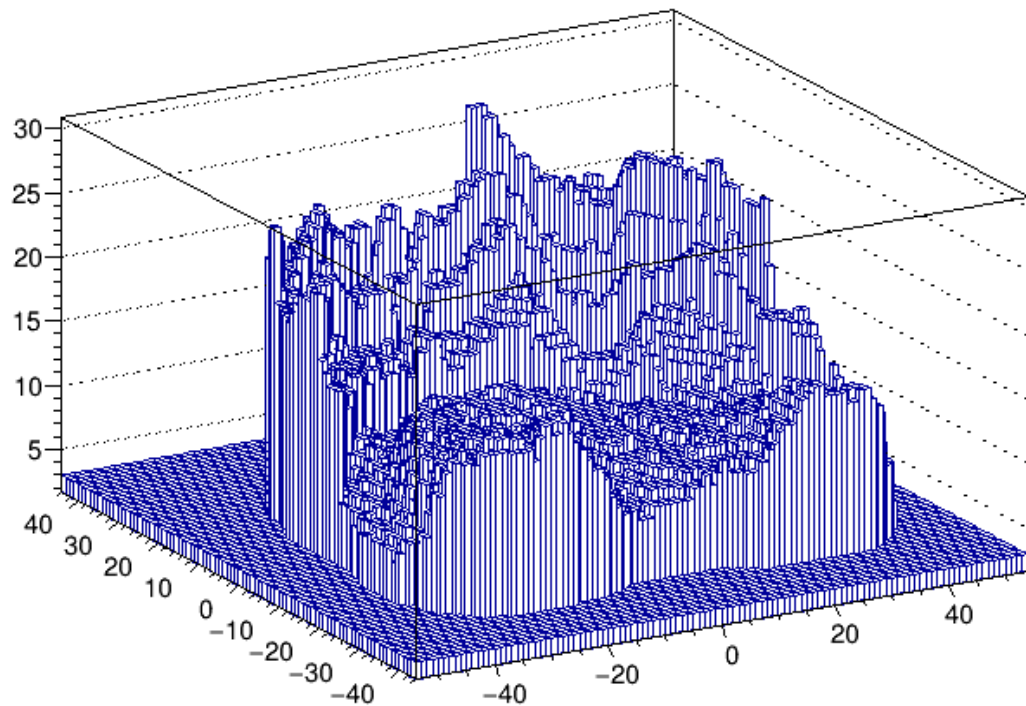


Рис. 3 Формы болюса для реального пациента с «открытой» и «закрытой» геометрии. Все размеры в мм.

Пример напечатанного болюса

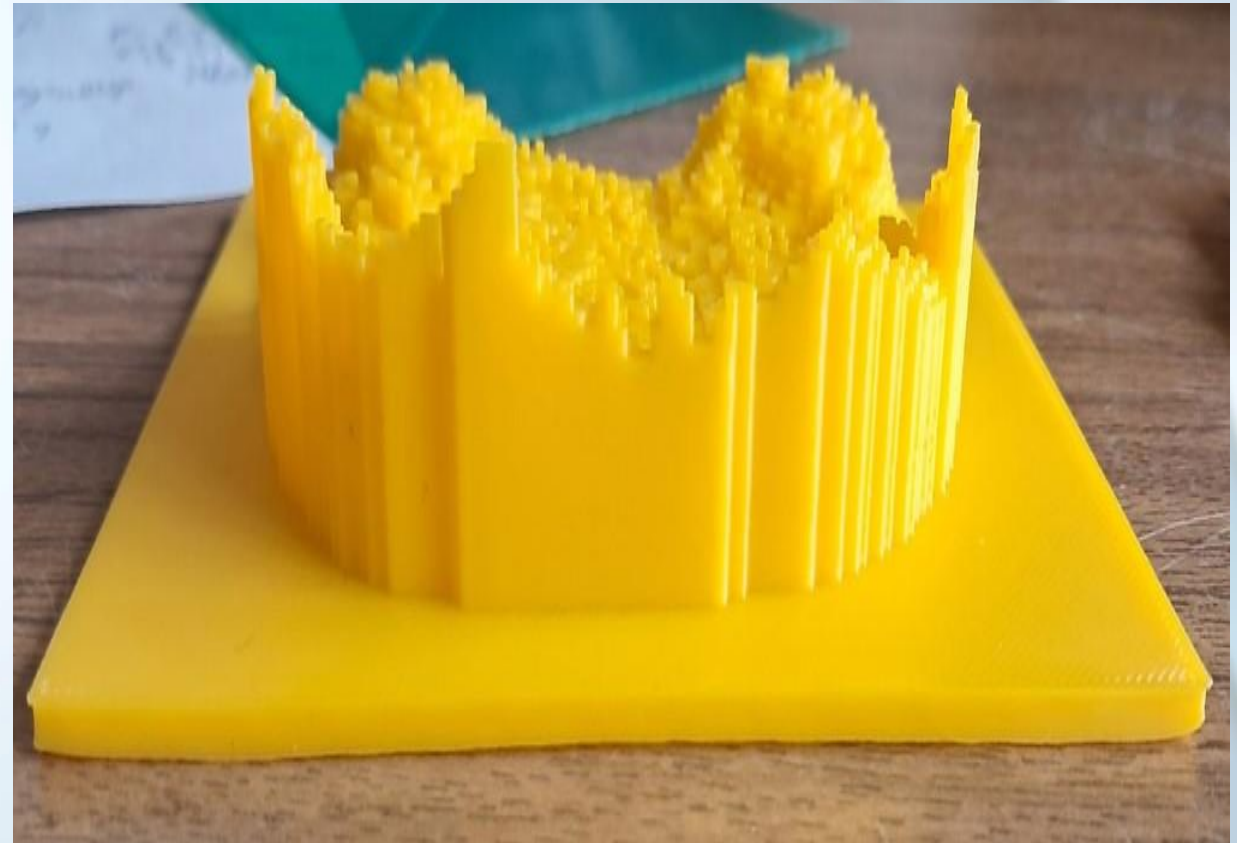


Рис. 4 Напечатанный болюс на 3D-принтере из PLA пластика

Верификация результатов

- Для проверки полученной формы, было проведено полномасштабное моделирование с использованием GEANT4. Были включены все физические процессы (в том числе и адронные). Анализировалось положение пика Брэгга для каждой воксельной линии, полученное с помощью GEANT4 в сравнении с положением дистальной стенки.
- На рисунке 5 можно наблюдать, почти полное попадание пика Брэгга на дистальную стенку опухоли .

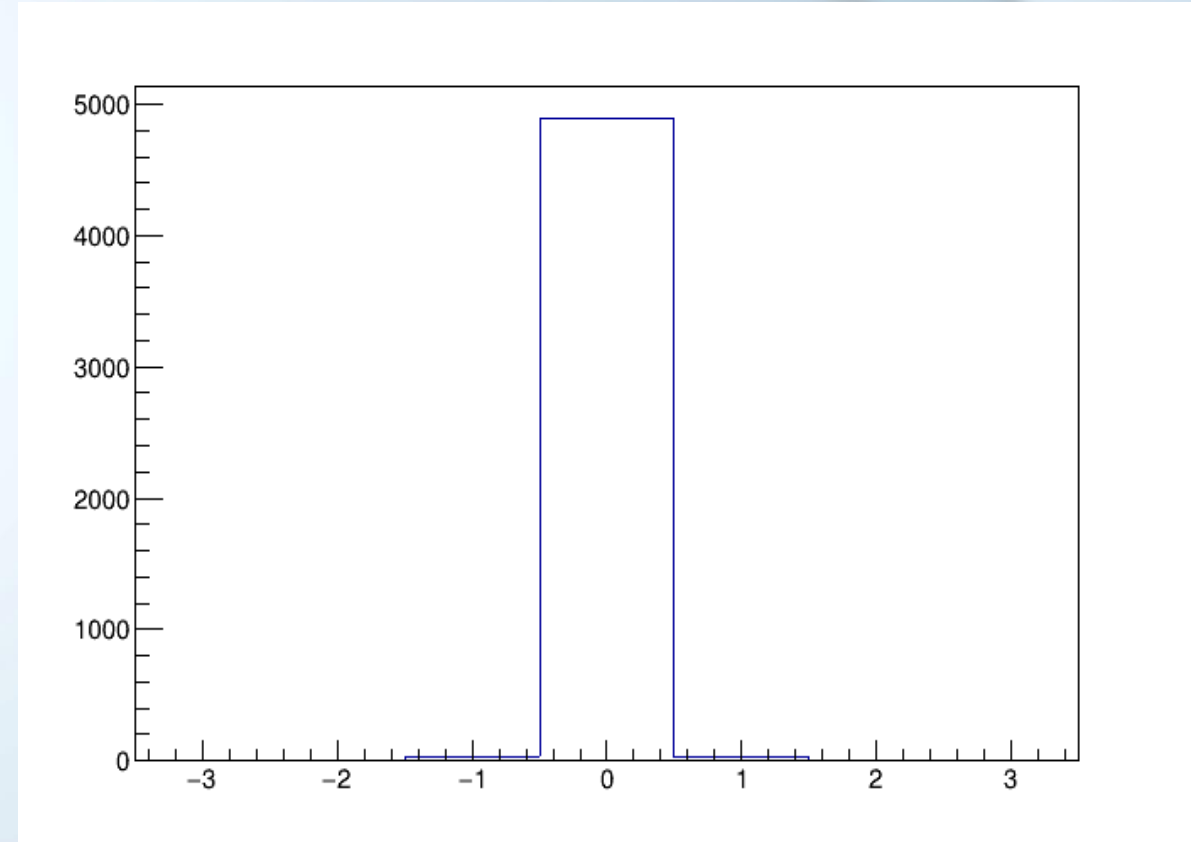


Рис. 5 Разность положения пика Брэгга при наличии болюса и положением дистальной стенки для каждой воксельной линии.

Заключение

- Представлен быстрый и точный алгоритм расчета формы болюса.
- Осуществлена проверка данного алгоритма на КТ реального пациента.
- Проведена верификация полученной формы болюса, из которой следует отличное совпадение положения пика Брэгга с положением дистальной стенки.
- Разработанные алгоритмы реализованы в виде пакета на языке C++ в объектно-ориентированном подходе и являются частью физического ядра СБМК.