

Цифровая калориметрия в протонной томографии

Акишина Е.П.

Протонная терапия

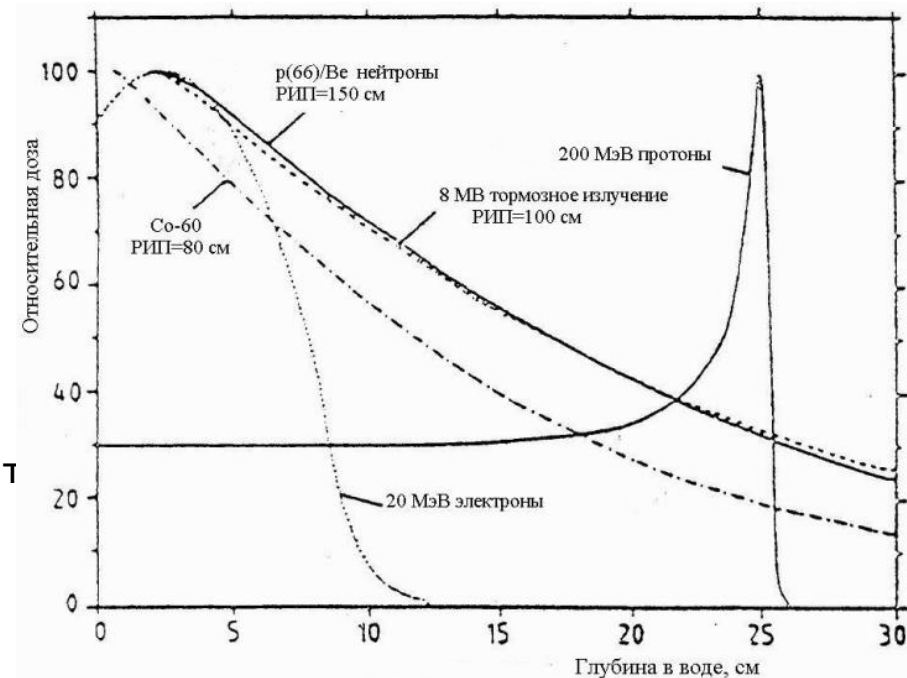
Протонная терапия – современный вид радиотерапии, использует ускоренные протоны для облучения. Основная причина интереса к протонной терапии в существенно более благоприятных для успешного лечения дозовых распределениях в теле пациентов по сравнению с самыми продвинутыми технологиями фотонной, электронной и нейтронной терапии

При взаимодействии протонов с клетками, повреждается ДНК, что приводит к их гибели. Использование протонов в лечении актуально, т к практически вся доза выделяется в ткани на миллиметрах пробега (максимум называют пиком Брэгга). Это позволяет снизить нагрузку на здоровые ткани. Но необходим точный расчет доставляемой дозы, размера воздействуемых тканей и их местоположение.

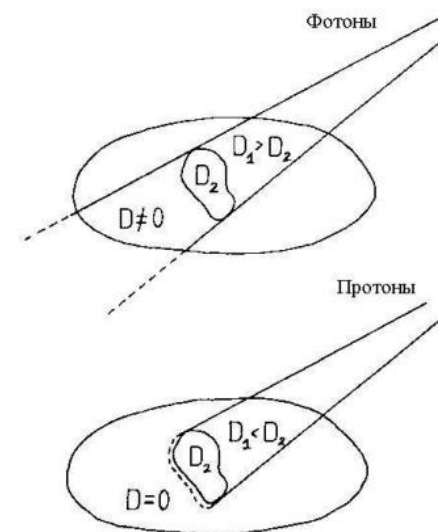
Для эффективного лечения необходима предварительная диагностика тканей с высокой точностью. В существующих центрах протонной терапии расчеты дозы делают на основе рентгеновской КТ и позиционирование пациента с помощью рентгенограмм. Однако рентгеновские снимки игнорируют различия в процессах физического взаимодействия между протонами и фотонами, и могут быть неточны. Также у рентгенограмм ограничена способность отображать опухоли ввиду недостаточно заметной разницы в поглощении рентген лучей опухоли и близких тканей.

Эта область медицины связана с разработкой, реализацией и использованием сложных и дорогостоящих систем облучения. Основные *преимущества протонной терапии:*

- 1) *Меньшая общая доза*
- 2) *Улучшенный контроль локализации воздействия*
- 3) *Быстрая и точная регулировка доставки дозы в зону.*



Глубинное распределение поглощенной дозы в воде для разных видов ионизирующего излучения



Качественное сравнение доз, создаваемых в разных областях

Протонная компьютерная томография

Применение протонной компьютерной томографии – оптимальный выбор для проведения протонной лучевой терапии.

Она позволит уменьшить ошибки в определении диапазона максимальной потери энергии частиц, уточнить нахождение положения пика Брэгга.

Это возможно с помощью разработки цифрового трекингового калориметра (ЦТК) с высоким разрешением. Цифровые калориметры состоят из нескольких сегментированных слоев и регистрируют общее количество частиц пучка, проходящих через объем детектора. В протонной томографии используются гетерогенные калориметры, в которых функции поглощения и детектирования разделены. Такие калориметры имеют структуру сэндвич – слои поглотителя чередуются с детектирующими слоями, что дает возможность послойного отслеживания протона на всем пути.

В работе рассмотрен новый тип компактного ЦТК на основе кремниевых пиксельных сенсоров.

Подготовка проекта

За основу был взят проект группы из Норвегии (University of Bergen) по разработке прототипа Цифрового Трекингового Калориметра для Протонной Томографии.

Проводится совместная работа с ЛФВЭ (отдел кремниевых трековых систем) и группой СПбГУ (Санкт-Петербургский Государственный Университет), группой ЛИТ.

План развития ОИЯИ включает создание инновационного центра для проведения экспериментальных и клинических исследований в области протонной терапии. Пилотной установкой будущего медицинского центра станет протонный медицинский ускоритель MSC-230.

Подготовка проекта теоретическая часть:

- выбор среды для моделирования, оценки параметров ЦТК - пакет GATE (GEANT4)
- разработка геометрической модели ЦТК

Подготовка проекта экспериментальная часть:

- Для определенной геометрической модели прототипа цифрового трекового калориметра было проведено моделирование транспорта протонов через его слои, что позволило выбрать материал поглотителя и оптимизировать его толщину.

Прототип протонного томографа

Идея протонной визуализации – измеряя остаточную энергию протона, проходящего ткани, можно определить тормозную способность ткани вдоль пути. Визуализация создается как проекционное изображение, или протонная КТ (набор проекций, полученные при вращении объединяются в трехмерную карту). Реализуется путем восстановлением траектории отдельного протона на основе откликов (хитов) трекового детектора с последующим вычислением средних потерь энергии протона вдоль траектории трека за сравнительно небольшое время.

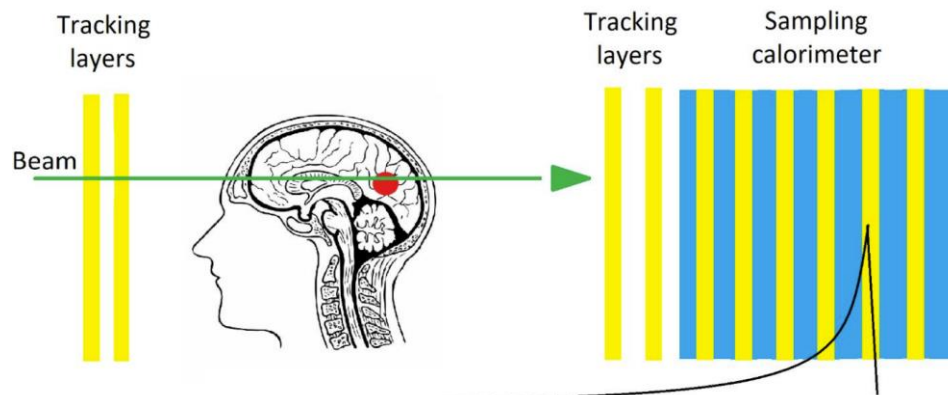


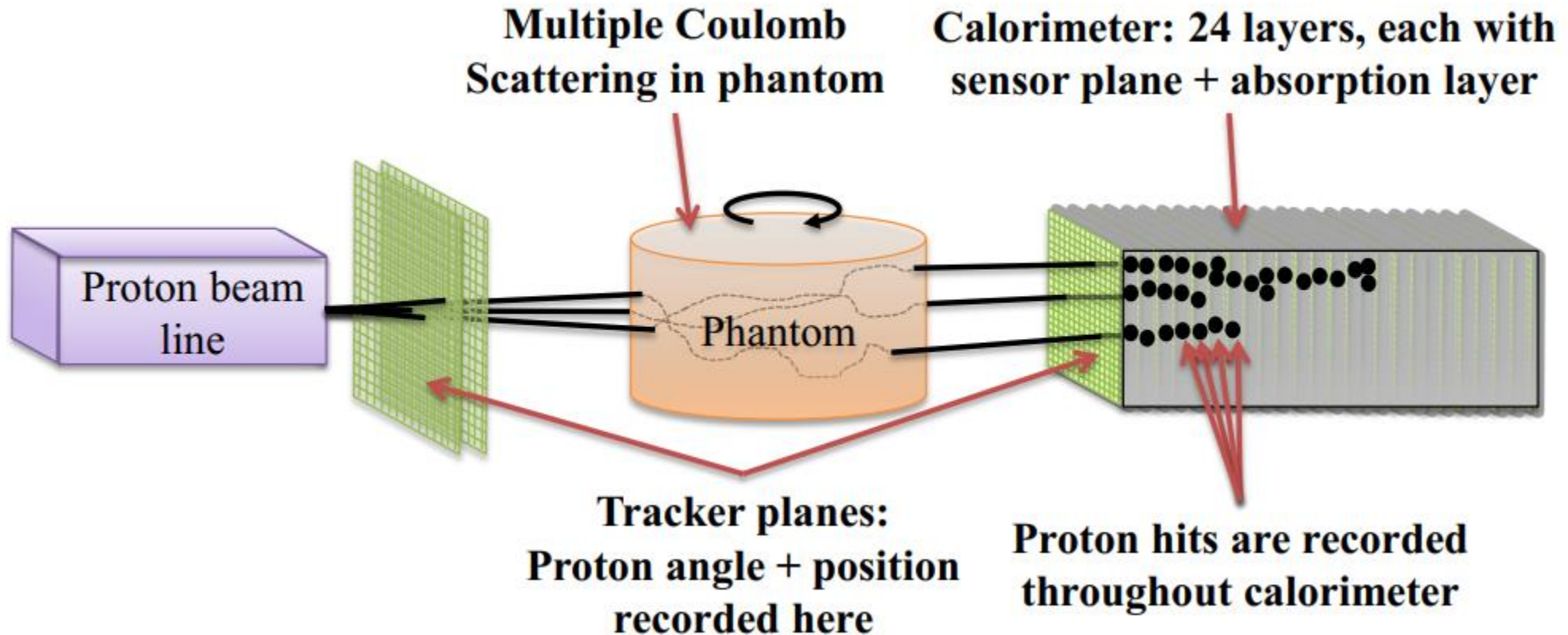
Рисунок 3 - концепция протонного томографа

Компоненты ПРОТОТИПА:

- протонный пучок
- 2 слоя позиционных сканеров из монолитных активных пиксельных сенсоров (МАПС) на подложке из углеродного композита,
- облучаемый объект (phantom) заполняемый воздухом или водой
- цифровой трековый калориметр (ЦТК)

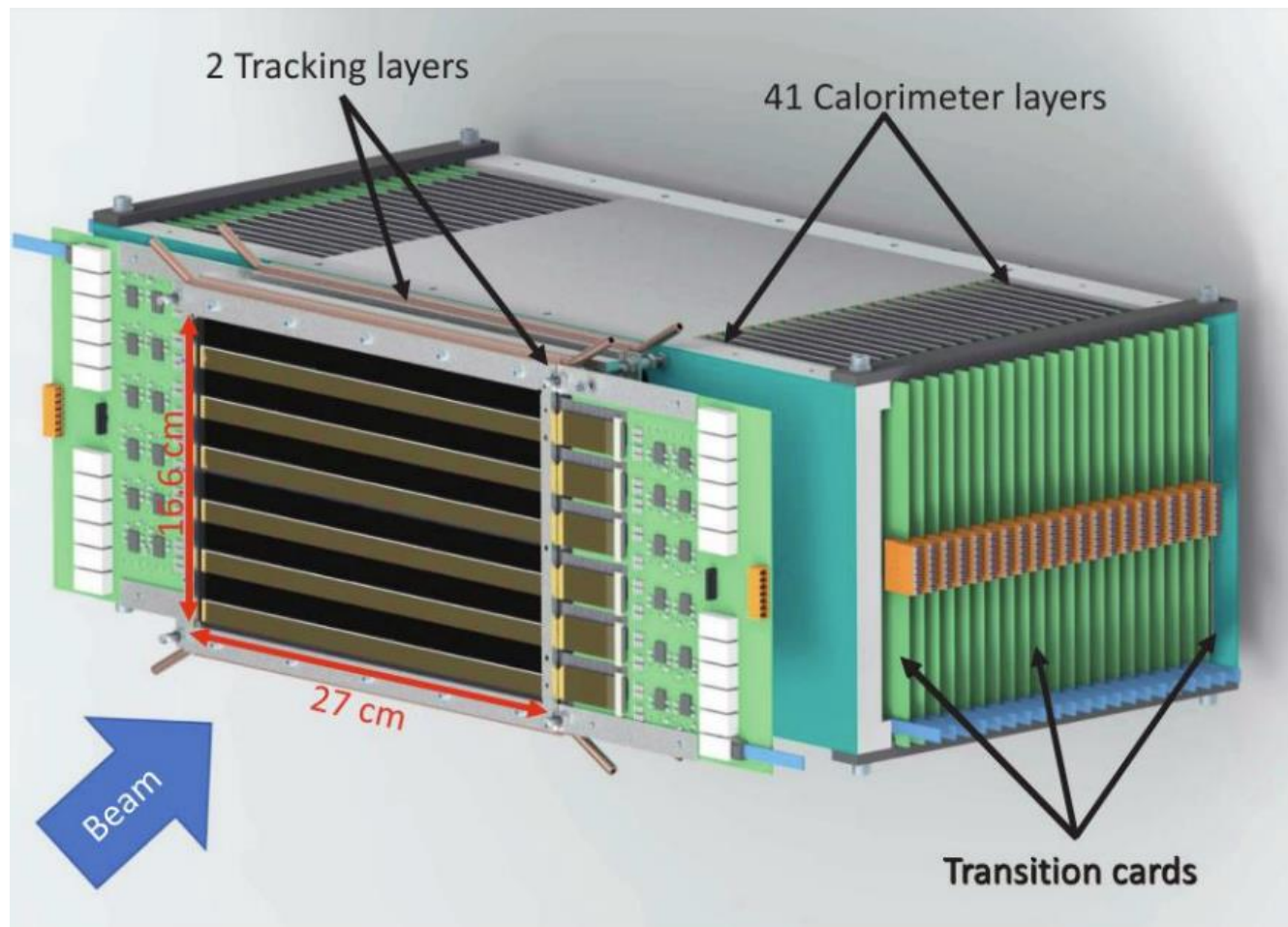
Создана геометрической модели прототипа ЦТК из 48 слоев и транспорта через него симуляцией Монте Карло протонов с энергией 200-230МэВ.

Геометрическая модель



Пучок входящих протонов проходит через фантом (вода, воздух, пациент), а затем проходит сквозь позиционные сканеры и calorimeter ЦТК. Алгоритм реконструкции трека вычисляет начальный вектор и пробег каждого протона, от 100–10000 одновременных треков

Цифровой калориметр высокого разрешения



Схематическое изображение системы цифрового трекингового калориметра Bergen pCT.

Какова конструкция детектирующих слоев?

Коллаборацией Bergen pCT предложено использовать пиксельные детекторы нового поколения ALPIDE на основе сенсоров МАПС.

Размеры ЦТК и толщина слоев поглотителей подобраны экспериментально исходя из анализа данных пробегов протонов для терапевтических значений 50–230 MeV.

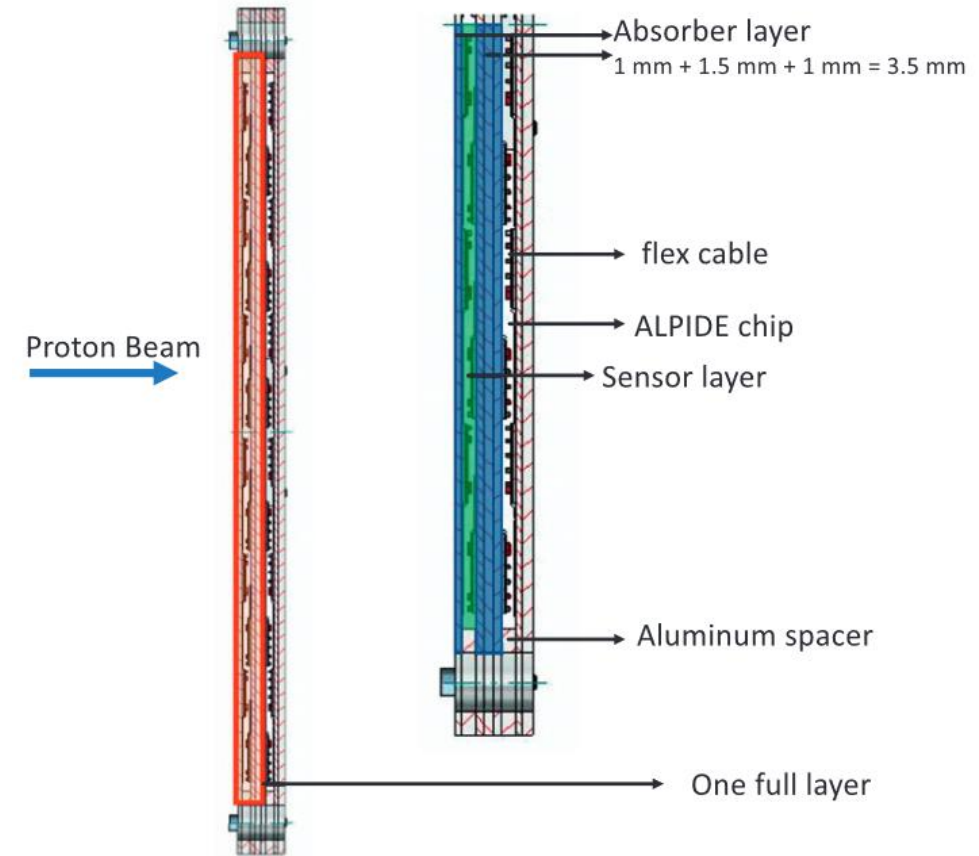
Монолитный Активный Пиксельный Сенсор (МАПС)

Монолитные активные пиксельные детекторы – новый класс пиксельных детекторов. Имеют высокую степень гранулярности – много элементарных детектирующих устройств на единицу площади.

Созданы по технологии КМОП (комплементарная структура металл — оксид — полупроводник).

- высокое пространственное разрешение треков (5 мкм)
- высокая эффективность регистрации (99.9%)
- эффективное время обработки сигнала сенсорами (5 мкс)
- низкий уровень шума Fake Hit Rate (FHR) меньше 10^{-6} срабатываний на событие на пиксель
- небольшой уровень потребляемой мощности
- надежной радиационной стойкостью пиксельных сенсоров.

Позволяют регистрировать и большое кол-во протонов в каждом цикле считывания. Их значительное быстродействие сводит к минимуму время облучения пациента.



GATE

(Geant4 Application for Tomographic Emission)

Какой программный пакет использован для реализации геометрии прототипа установки?

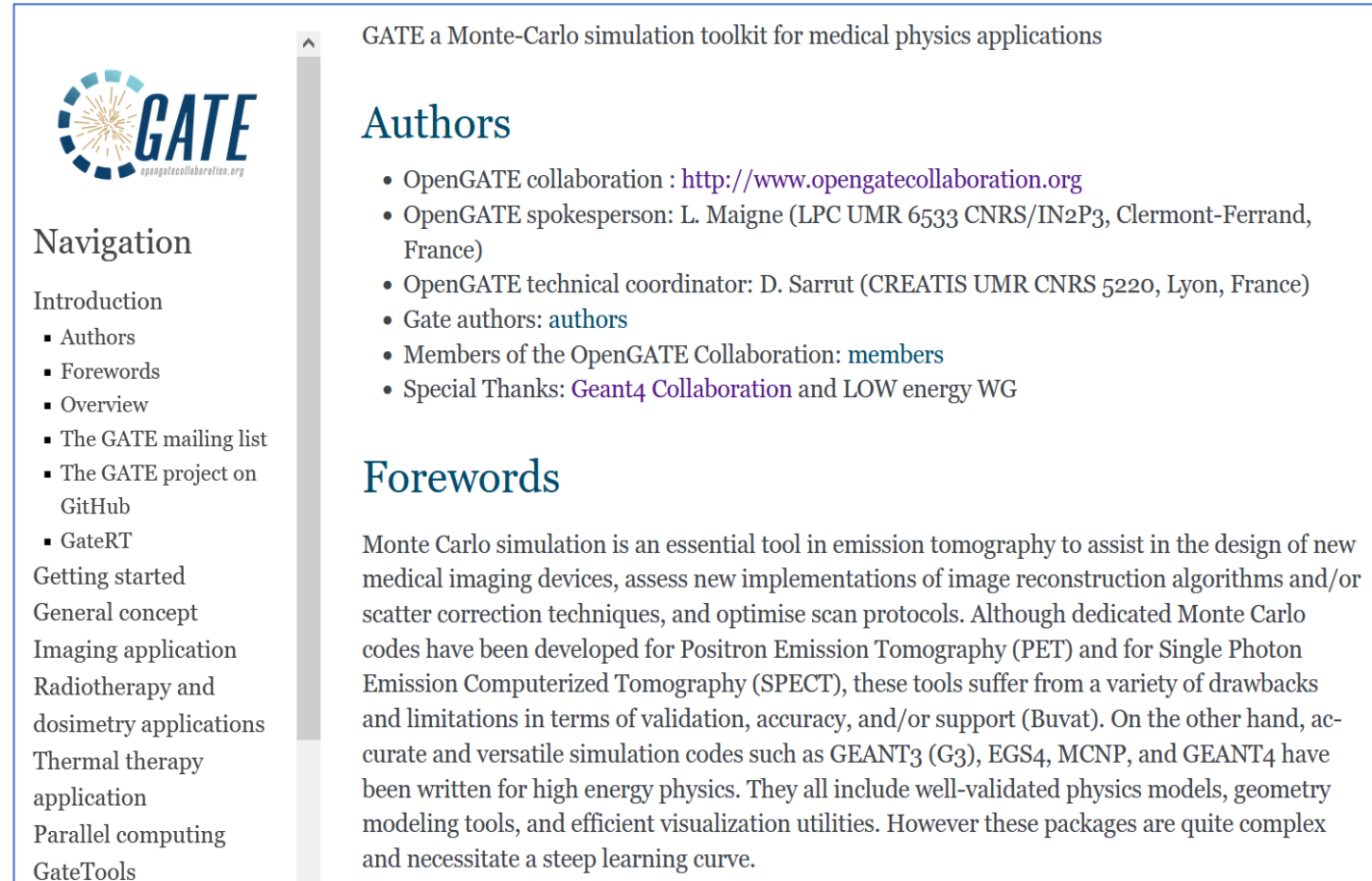
GATE - набор инструментов МК моделирования физических процессов в медицинской физике для эмиссионной томографии. Используем его для получения “сырых” данных.

Установлен в ЛИТ на платформе


командой HYBRILIT

- создан основе GEANT4
- написан на C++ (работает на Linux, Unix, MacOS)
- подходит для разных видов томографии (ПЭТ и ОФЭКТ).
- удобство и гибкость моделирование - позволяет разрабатывать с помощью макросов

Подходит для моделирования конструкций детекторов, движения частиц, происходящих физических процессов.



GATE a Monte-Carlo simulation toolkit for medical physics applications



Navigation

- Introduction
 - Authors
 - Forewords
 - Overview
 - The GATE mailing list
 - The GATE project on GitHub
 - GateRT
- Getting started
- General concept
- Imaging application
- Radiotherapy and dosimetry applications
- Thermal therapy application
- Parallel computing
- GateTools

Authors

- OpenGATE collaboration : <http://www.opengatecollaboration.org>
- OpenGATE spokesperson: L. Maigne (LPC UMR 6533 CNRS/IN2P3, Clermont-Ferrand, France)
- OpenGATE technical coordinator: D. Sarrut (CREATIS UMR CNRS 5220, Lyon, France)
- Gate authors: [authors](#)
- Members of the OpenGATE Collaboration: [members](#)
- Special Thanks: [Geant4 Collaboration](#) and LOW energy WG

Forewords

Monte Carlo simulation is an essential tool in emission tomography to assist in the design of new medical imaging devices, assess new implementations of image reconstruction algorithms and/or scatter correction techniques, and optimise scan protocols. Although dedicated Monte Carlo codes have been developed for Positron Emission Tomography (PET) and for Single Photon Emission Computerized Tomography (SPECT), these tools suffer from a variety of drawbacks and limitations in terms of validation, accuracy, and/or support (Buvat). On the other hand, accurate and versatile simulation codes such as GEANT3 (G3), EGS4, MCNP, and GEANT4 have been written for high energy physics. They all include well-validated physics models, geometry modeling tools, and efficient visualization utilities. However these packages are quite complex and necessitate a steep learning curve.

GATE

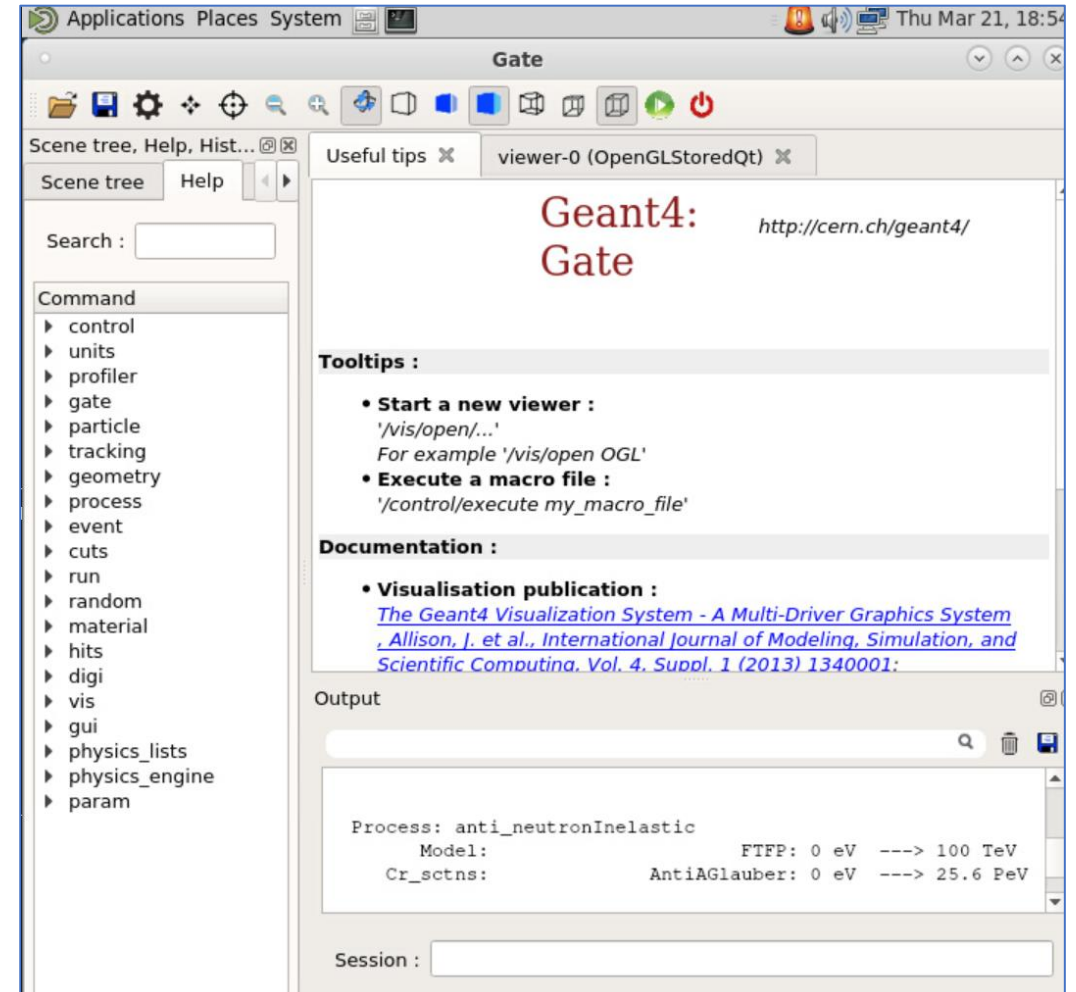
(Geant4 Application for Tomographic Emission)

Для симуляции прохождения протонов через прототип установки используем макросы написанные в GATE.

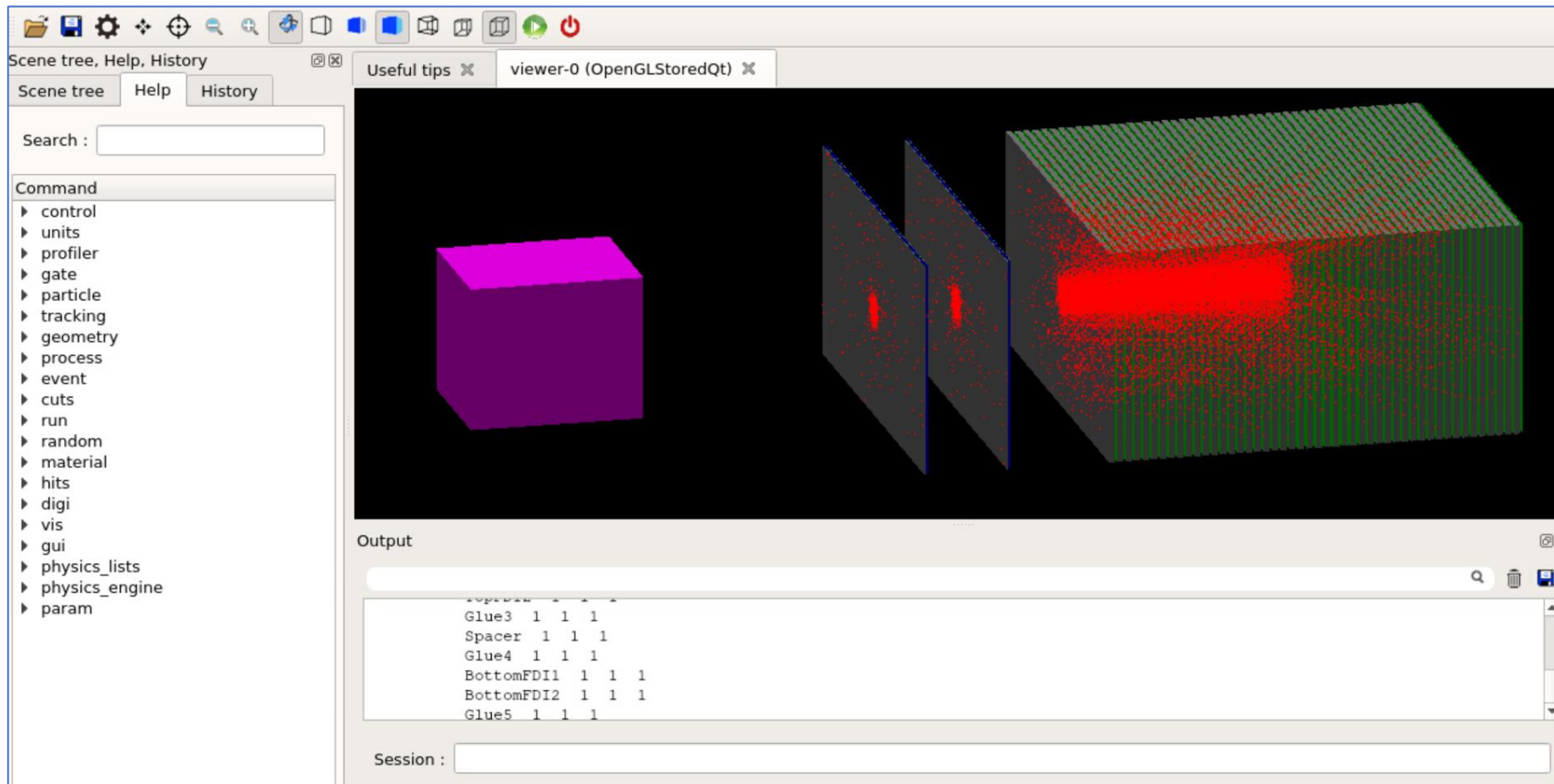
Макрос включает в себя команды, описывающие компоненты моделирования в правильном порядке.

Компонентами являются геометрия детектора, параметры пучка частиц, физические процессы, визуализация, вывод данных.

Выполнение макроса в среде Gate командой
`/control/execute Main.mac`



GATE визуализация



Пример готовой визуализации в GATE.

Позволяет построить геометрию детектора, траектории частиц, хиты и т.д. Результатам симуляции Монте-Карло транспорта протонов с энергией 230 МэВ. ЦТК состоит из 48 слоев.

GATE macros

Обычно создается несколько макросов – для геометрии, для физических процессов и т.д.

Пример макроса использованного для создания геометрической модели установки, параметров пучка.

Используем файл GateMaterials.db для задания материалов.

```
/gate/geometry/setMaterialDatabase GateMaterials.db
/gate/world/geometry/setYLength 3500.0 mm
...
/gate/world/vis/setVisible false

# ===== phantom =====
/gate/world/daughters/name phantom
/gate/phantom/placement/setTranslation 0 0 0 mm
...
/gate/phantom/geometry/setXLength 91.0 mm
/gate/phantom/geometry/setYLength 91.0 mm
# ===== end phantom =====

# ===== Tracker scanner is located behind the phantom, before DTC

/gate/world/daughters/name scanner_1
/gate/world/daughters/systemType scanner
/gate/world/daughters/insert box
/gate/scanner_1/daughters/name Layer_1
/gate/Layer_1/daughters/name CarbonEpoxy1
/gate/Layer_1/daughters/name Glue_1
/gate/Layer_1/daughters/name ALPIDE_Tracker
...

# ===== DTC =====
/control/alias num_dtc_layers 48          # Number of the DTC layers
/control/alias Absorber_thickness 3.5     # Absorber, mm
/control/multiply Absorber_thickness_um {Absorber_thickness} 1000. # mm -> um
...
```

GATE macros

Макрос - сборка геометрической модели, визуализация с помощью команд GEANT4.

Вывод - запись данных в файл формата .root

```
...
# ***** geometry calculation *****
# # DTC position, = dtc_front_pos_z + dtc_length/2
/control/divide half_dtc_length {dtc_length} 2.
/control/add dtc_scanner_pos_z {dtc_front_pos_z} {half_dtc_length}

# # Layer position relative to the dtc_scanner, = -(dtc_length - Layer_length)/2
/control/subtract Layer_pos_z {dtc_length} {Layer_length}
/control/multiply Layer_pos_z {Layer_pos_z} -0.5

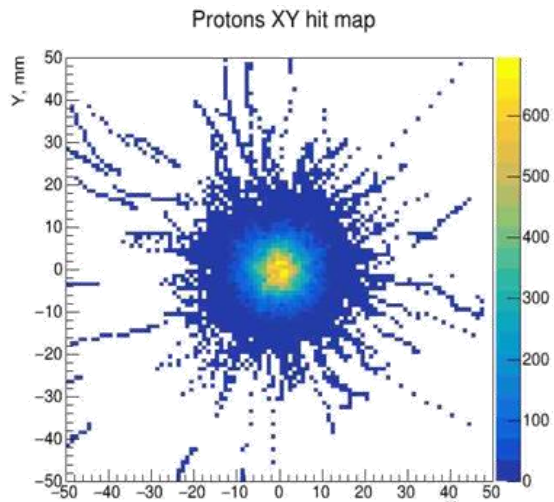
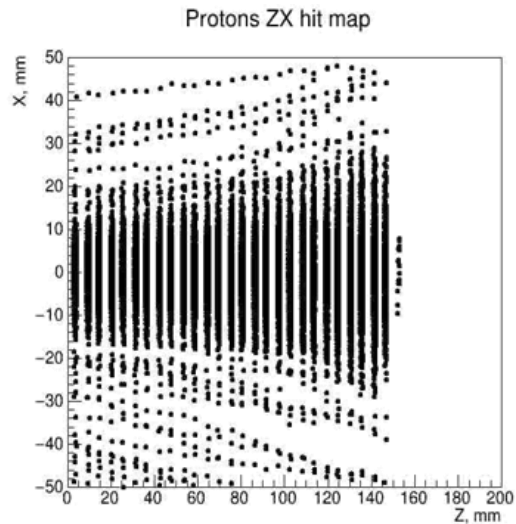
# # Absorber relative to the Layer centre
/control/subtract Absorber_pos_z_um {Layer_length_um} {Absorber_thickness_um}
/control/multiply Absorber_pos_z_um {Absorber_pos_z_um} -0.5

/gate/source/uniformBeam/gps/pos/centre 0. 0. -400 mm

/vis/open OGLSQt
/vis/viewer/reset
/vis/viewer/set/viewpointThetaPhi 100 15
/vis/viewer/zoom 0.8
/vis/viewer/set/style surface
/vis/drawVolume
/tracking/storeTrajectory 1
# /vis/scene/add/trajectories
#/vis/scene/add/axes
/vis/scene/add/hits

/gate/output/root/enable
/gate/output/root/setFileName proton_230MeV_test_nor
```


Трекинг протонов в ЦТК



Для восстановления событий в детекторе, необходима реконструкция треков протонов проходящих сквозь слои ЦТК. Алгоритм восстановления траекторий должен учитывать особенности геометрии.

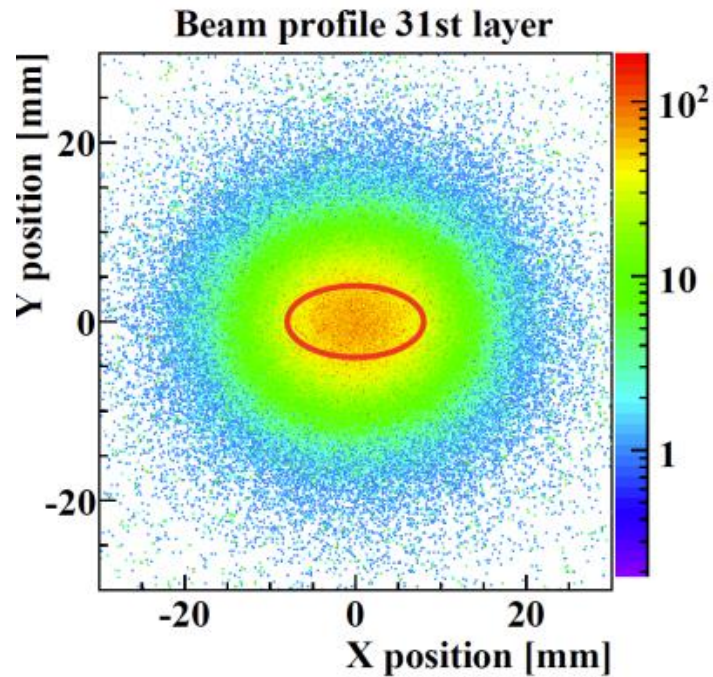
Реконструкция траекторий ведется на основании карты хитов (срабатываний) по плоскостям.

Траектория протонов в веществе в большинстве случаев близка к прямой линии, но реконструкция осложняется эффектом многократного кулоновского рассеяния (много малых угловых отклонений), и кластерным срабатыванием сенсоров. Необходимы алгоритмы учитывающие подобные зашумления.

Процедура должна быть быстрой. Треки протонов не достигших пика Брега необходимо удалять из анализа, они не должны портить эффективность алгоритма.

Карта хитов протонов в продольной и поперечной плоскости ЦТК
Поглотитель - AL толщиной 3.5 мм,
фантом - вода, энергия - 230 МэВ.

Трекинг протонов в ЦТК



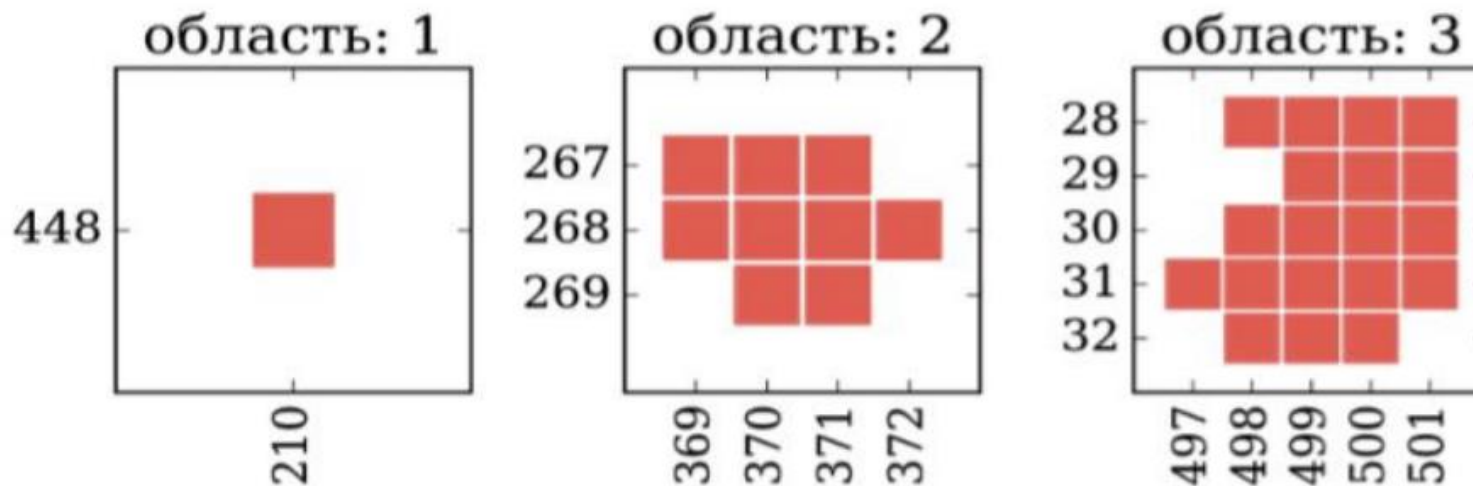
Клинический пучок протонов обычно имеет гауссово распределение перед прохождением фантома. Очевидно, что именно в сердцевине пучка необходимо приложить больше всего усилий для эффективной реконструкции трека, поскольку плотность треков и, следовательно, сложность правильной реконструкции, является самым высоким в этой области.

Необходимо учитывать это в моделировании.

Кластеризация хитов

Присутствует эффект срабатывания соседних сенсоров в пиксельной матрице. В местах пересечения протонного трека и сенсора активируются области пикселей из-за процессов диффузии заряда.

Необходимо удалить шум, который обычно выглядит как изолированные одно- и двух-пиксельные кластеры. При этом требуется кластеризация сработавших сенсоров и определение центра масс кластера. Возможны пересечения кластеров разных протонов, потребуется алгоритм разделения кластеров.



Примеры срабатывания как одного так и кластера пикселей МАПС.

Данные экспериментов НИЦ "Курчатовский Институт ПИЯФ"

Заключение

Применение протонов в лучевой терапии является актуальным, позволяет снижать нагрузки на здоровые ткани.

Разработка прототипа прибора для проведения протонной КТ решает задачи по улучшению качества подготовительных исследований для проведения протонной терапии.

Использование в качестве детекторов цифровых трековых калориметров (ЦТК) на основе монокристаллических активных пиксельных сенсоров (МАПС) является новым методом в ПКТ (протонной компьютерной томографии), который позволит восстанавливать треки большого числа протонов быстро и точно, регистрировать остаточные энергии каждого протона и, соответственно, получать более качественную КТ.

Подобная разработка даст возможность внедрять технологию в дальнейшем в клиническую практику.

В настоящее время приступили к решению задачи по восстановлению траекторий движения протонов, детально анализируется структура данных для разработки эффективного и быстродействующего алгоритма.