Тема работы

Разработка детектора для мониторирования потока нейтронов на установке БНЗТ ИЯФ СО РАН.

Состав коллектива

Поросев Вячеслав Викторович, с.н.с., ИЯФ СО РАН, к.ф.-м.н., porosev@inp.nsk.su,

уч.запись: vvporosev

Грантовая поддержка

Грант РНФ № 19-72-30005 “Разработка ускорительного источника эпитепловых нейтронов и проведение бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей.”, руководитель Таскаев С.Ю.,2023 – 2025 гг.

Аннотация

В данном исследовании были проведены расчеты дозовых распределений, формируемых нейтрон-генерирующей мишенью, на установке БНЗТ в режиме максимально приближенном к режимам планируемых облучений пациентов. Полученные результаты использовались при разработке конструкции детектора для регистрации сопутствующего гамма излучения и пространственной локализации его источников.

Научное содержание работы

Постановка задачи

В настоящее время, в ИЯФ СО РАН активно ведется разработка ускорительного источника эпитепловых нейтронов для проведение бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей и подготовка к клиническим испытаниям. Отдельно от разработки самого источника стоит задача измерения и верификация формируемых дозовых полей. Таким образом, необходимо разработать как средства диагностики, так и провести верификацию получаемых с ее помощью результатов. Поэтому важным аспектом является отработка методики моделирования отклика детектора в различных условиях облучения и поиска путей дальнейшего улучшения его параметров.

Современное состояние проблемы

Бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) — перспективный метод лечения рака, в котором используется факт высокой вероятности захвата тепловых нейтронов изотопом бор-10, накопленного в опухолевых клетках и, как следствие, большое локальное энерговыделение приводящее к гибели клеток от воздействия продуктов проходящей ядерной реакции.

Оценить дозу БНЗТ, которая зависит от потока нейтронов и концентрации бора в тканях во время лечения достаточно трудно и в основном доза облучения оценивается на основе модельных расчетов. Обычно результаты таких расчетов

сравниваются с результатами измерений регистрируемых потоков нейтронов на источнике с использованием борсодержащих детекторов. В тоже время существует проблема верификации процесса облучения с учетом возможной динамики расположения борсодержащих препаратов в теле пациентов из-за длительности сеанса облучения. Для решения этой проблемы ранее была предложена методика оценки локальных доз по измерению сопутствующего гамма излучения из реакции 10B(n,a)7Li + 478 кэВ, однако практическая реализация данного метода сталкивается с рядом проблем, в частности необходимости разделения сигнала от фоновой линии 511 кэВ (K. Okazaki, H.Tanaka, T.Takata, S. Kawabata, K. Akabori, Y. Sakurai, Evaluation of the energy resolution of a prompt gamma-ray imaging detector using LaBr3(Ce) scintillator and 8 × 8 array MPPC for an animal study of BNCT. Applied Radiation and Isotopes, Volume 163, 2020, https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109214. Caracciolo, A., Mazzucconi, D., Ferri, T. et al. Prompt gamma-ray imaging in realistic background conditions of a boron neutron capture therapy facility. Sci Rep 15, 18626 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-03764-4, Jiye Qiu et al., Comprehensive design study of the Si/TlBr semiconductor-based Compton camera for 478 keV prompt gamma-ray imaging in boron neutron capture therapy. Japanese Journal of Applied Physics 64, 097001 (2025) https://doi.org/10.35848/1347-4065/ae02d5).

.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

В рамках выполнения данной работы были выполнены следующие работы: проведение расчетов методом Монте-Карло с помощью пакета моделирования GEANT4 (https://geant4.web.cern.ch/) дозовых распределений в водном фантоме на установке БНЗТ, а также моделирование процесса детектирования, сопутствующего гамма излучения. Спецификой данного пакета, написанного на C++ и реализованная под UNIX, является возможность распараллеливания вычислений на все доступные вычислительные потоки, что позволяет кратно ускорить вычисления.

Полученные результаты

В качестве детектора способного решить поставленную задачу нами рассматривается комптоновская гамма-камера. Данный детектор состоит из последовательно расположенных двух чувствительных элементов – рассеивающего детектора и детектора полного поглощения. Регистрируя координаты и энергию электрона отдачи, а также траекторию и энергию рассеянного фотона, можно реконструировать конус возможного расположения источника излучения. В настоящий момент выбор материала для применения в составе сцинтилляционного детектора полного поглощения, а также в качестве рассеивающего детектора, имеющего приемлемое энергетическое разрешение очень ограничен. Практически единственным кандидатом для решения данной задачи и имеющим приемлемое энергетическое разрешение является бромид лантана - LaBr3:Ce. С его помощью удается получить энергетическое разрешение детектора для энергии гамма-излучения 662 кэВ от 2,5 % до 3,5 %.

Для оценки влияния различных факторов на задачу восстановления координаты регистрируемых частиц в сцинтилляционном детекторе, нами было проведено моделирование сцинтилляторов с характерной площадью 15 х 15 мм2 и различной

толщины. Для регистрации света, образующегося в сцинтилляторе, в моделировании использовалась матрица микропиксельных лавинных фотодиодов с размером фоточувствительной области 3 x 3 мм2. Пример геометрии расчетов и пример регистрируемого пространственного распределения светового потока от одного события представлен на рисунке 1.

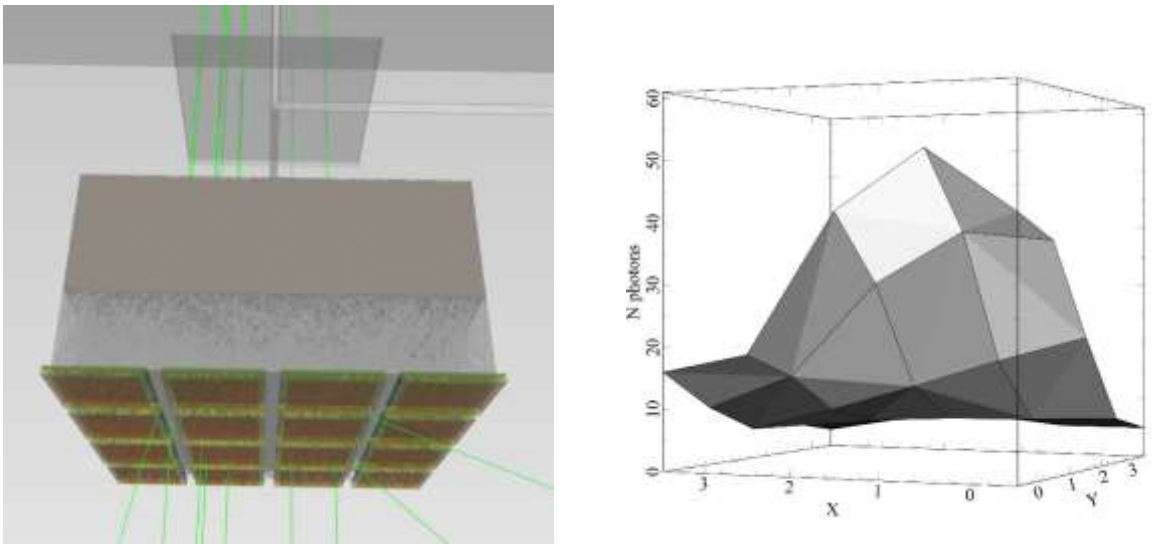

Рисунок 1 - Общий вид расположения сцинтиллятора и фотоприемников, использованный в моделировании (слева). Пример пространственного распределения регистрируемых световых фотонов в сцинтилляторе от одного зарегистрированного фотона.

На рисунке 2 показаны результаты восстановления координаты детектируемой частицы и ее энергии по пространственному распределению сигнала, регистрируемого матрицей фотоприемников с помощью нейронной сети, обученной на данных, полученных в процессе моделирования.

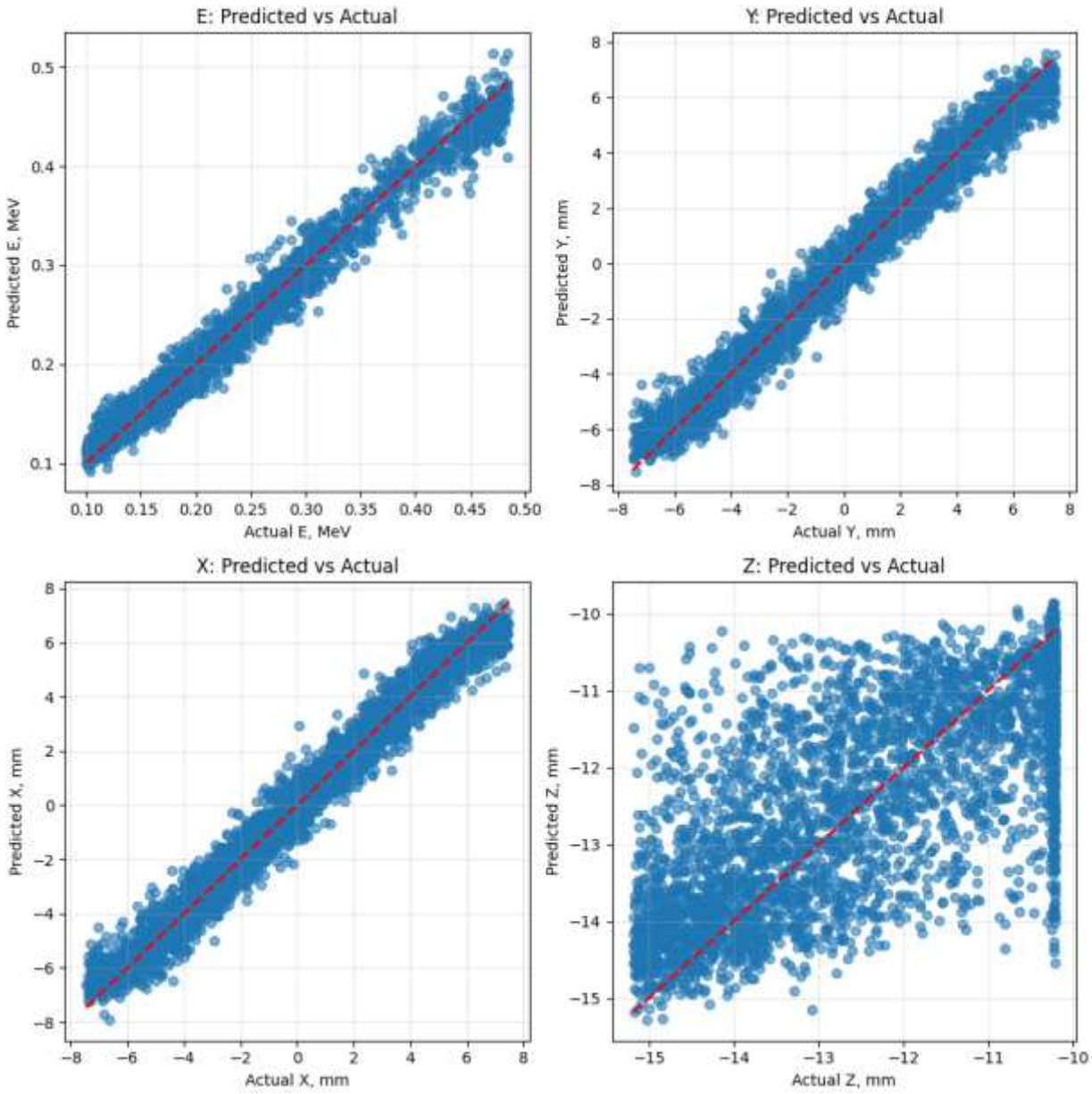

Рисунок 2. Пример восстановленная энергия зарегистрированного фотона и его координаты для сцинтиллятора толщиной 5 мм.

Таким образом, применение матрицы фотоприемников с отбором событий с потерями энергией более 10 кэВ при толщине сцинтиллятора 5 мм позволяет восстановить координату зарегистрированной частицы с разрешением ~ 1мм, что существенно снижает требования к числу каналов регистрации в считывающей электронике. Пример реконструкции расположения точечного источника на основе данных двух идентичных детекторов на основе LaBr3:Ce представлен на рисунке 3.

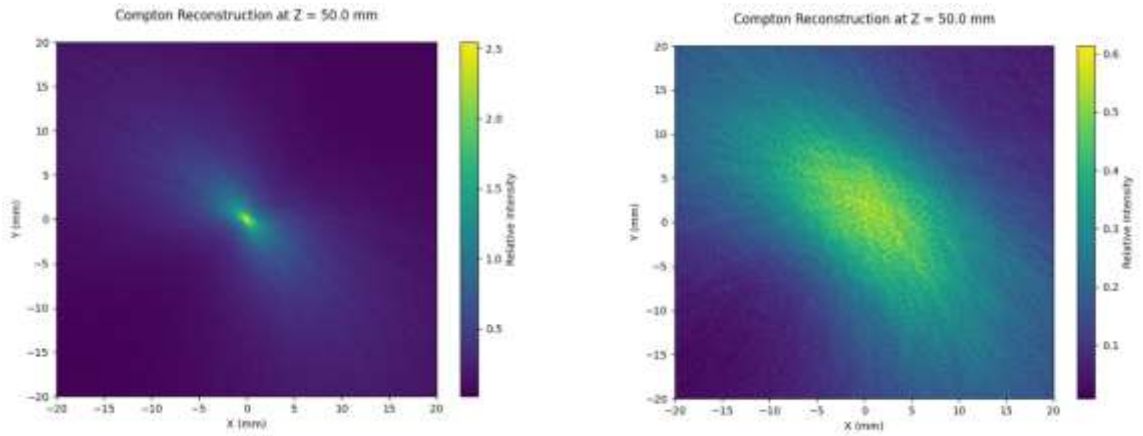

Рисунок 3. Пример реконструкции положения точечного источника на основе истинных значений координат и величины энерговыделения в сцинтилляторах (слева) и на основе восстановленных из зарегистрированного светового сигнала (справа) данных.

Из представленных данных следует, что концепция комптоновской гамма-камеры для локализации фотонов с энергией 478 кэВ с помощью сцинтиллятора LaBr3:Ce и матричного съема оптического сигнала, идентифицирующих реакцию захвата нейтронов 10B, представляется реализуемой.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Для иллюстрации эффекта использования кластера достаточно сказать, что моделирование прохождения 1E+9 сгенерированных нейтронов занимало порядка 4- 5 дней при наличии 80 доступных вычислительных ядер при статистической точности результата позволяющей проводить сравнение результатов с экспериментальными данными. Моделирование такой задачи на персональном компьютере за приемлемое время не представляется возможным.

Публикации

нет

Ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также Ваши предложения по их совершенствованию.

Все работает замечательно.